

Тезисы докладов,
включенных в программу
международной конференции

Физика.СПб

20–24 октября 2025 года

Организатор

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Алферовский университет

При поддержке

ООО «ИННО-МИР»

Программный комитет

Аверкиев Никита Сергеевич (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) — председатель

Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) — заместитель председателя

Арсеев Петр Иванович (ФИАН)

Гавриленко Владимир Изяславович (ИФМ)

Дьяконов Михаил Игоревич (Université Montpellier II, France)

Дунаев Андрей Валерьевич (ОГУ им. И.С. Тургенева)

Иванчик Александр Владимирович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Калашникова Александра Михайловна (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Карачинский Леонид Яковлевич (ООО «Коннектор Оптикс»)

Конников Семен Григорьевич (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Кучинский Владимир Ильич (СПбГЭТУ, ФТИ им. Иоффе)

Нестоклон Михаил Олегович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Пихтин Никита Александрович (ООО «Эльфолум», ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Рудь Василий Юрьевич (СПбПУ)

Степина Наталья Петровна (ИФП им. А.В. Ржанова)

Теплова Наталья Витальевна (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Организационный комитет

Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) — председатель

Азбель Александр Юльевич (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Бекман Артем Александрович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Дюделев Владислав Викторович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Когновицкая Елена Андреевна (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева)

Корнышев Григорий Олегович (СПбАУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Лосев Сергей Николаевич (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Рябочкина Полина Анатольевна (МГУ им. Н.П. Огарёва)

Черотченко Евгения Дмитриевна (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Чистяков Дмитрий Владимирович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Фельчина-Абдулразак Саусан Хассановна (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

Международная конференция 2025 года продолжает традицию Итоговых семинаров по физике и астрономии по результатам конкурсов грантов для молодых ученых, проводившихся в Санкт-Петербурге с середины 1990-х годов. В этом сборнике представлены тезисы всех докладов, включенных в программу конференции. Сборник тезисов докладов, представленных на конференции, будет доступен на сайте ФизикА.СПб после ее окончания.

Спонсоры конференции



РОСАТОМ



Solar
Laser
Systems



ТИДЕКС

НАУЧНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ОПТИКА



Астрономия и астрофизика

О возможном влиянии солнечного квазидвухвекового цикла на температуру Северного полушария Земли

Огурцов М. Г.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: *maxim.ogurtsov@mail.ioffe.ru*

Возможность связи между квазидвухсотлетней вариацией в температуре Северного полушария Земли и солнечным циклом Зюсса исследована при помощи: (а) шести реконструкций солнечной активности и (б) семи палеорекоonstrукций температуры Северного Полушария, охватывающих временные промежутки до 2000 лет. Были рассчитаны коэффициенты линейной и нелинейной корреляции между квазидвухсотлетними циклами в температуре и солнечной активности. Коэффициенты нелинейной корреляции вычислялись на основании оценок взаимной информации. Оказалось, что хотя значимость коэффициентов как линейной, так и нелинейной корреляции не слишком велика, для нелинейной корреляции она всё же существенно выше, чем для линейной. Причём в одном случае значимость нелинейной корреляции между квазидвухвековыми вариациями в температуре и солнечной активности достигла величины $p=0.07$. Полученный результат указывает на то, что связь между квазидвухсотлетними циклами в температуре Северного полушария и солнечной активностью в действительности может существовать, но иметь при этом сильно нелинейный характер. Выявление и изучение солнечного влияния на климат в таком случае оказывается непростой задачей требующей серьёзного усовершенствования методов математической статистики. Обсуждены другие возможные причины искажения связи между квазидвухвековыми вариациями в температуре и активности Солнца.

Эксперимент TAIGA – новые результаты и перспективы развития.

Буднев Н. М.¹

¹ИГУ

e-mail: nbudnev@api.isu.ru

К настоящему времени основной объем знаний о потоках гамма-квантов высоких энергий получен с использованием установок H.E.S.S., MAGIC и VERITAS, в состав которых входит от 2 до 5 так называемых IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes). Однако ограниченный размер эффективной площади (менее 0,1 кв. км) этих установок не позволяет регистрировать гамма-кванты с энергией выше 100 ТэВ со значительной статистикой. Прорыв в изучении ПэВатронов произошел с началом работы высокогорных установок, регистрирующих заряженные частицы широких атмосферных ливней (ШАЛ): Tibet-ASgamma, HAWC и LHASSO. С их помощью были зарегистрированы гамма-кванты с энергией более 100 ТэВ от десятков галактических источников, а также от двух источников (Крабовидная туманность и J2032+4102) были зарегистрированы гамма-кванты с энергией более 1 ПэВ.

В 2022 году в Тункинской долине (Республика Бурятия) завершено создание гибридного комплекса TAIGA-1 [1] в проектной комплектации, который позволяет, в том числе, на высоком уровне точности исследовать энергетические спектры отдельных групп ядер космических лучей в широком диапазоне энергий и, впервые, черенковским методом изучать потоки гамма-квантов с энергией порядка и выше 100 ТэВ.

В докладе представлены новые результаты исследования энергетического спектра легкой компоненты космических лучей (протоны + гелий), анализ которых позволяет сделать следующие выводы. Вплоть до энергии 1000 ТэВ не наблюдается резкого уменьшения доли легкой компоненты космических лучей, как это было получено в эксперименте ARGO-YBJ [2]. Классическое колено в спектре космических лучей при энергии порядка 3 ПэВ определяется легкой компонентой, доля которой при этой энергии уменьшается в 3 раза. При энергии около 20-30 ПэВ отчетливо видна вторая особенность в легкой компоненте; она совпадает с уменьшением наклона спектра всех частиц при энергии 20 ПэВ, обнаруженным в экспериментах Тунка [3], KASCADE-Grande [4] и др., но в легкой компоненте наблюдается впервые.

Также приводятся результаты измерения энергетического спектра гамма-излучения Крабовидной туманности, источника Бумеранг и других с помощью моно, стерео и гибридной методик наблюдений, а также поиска гамма-квантов в ТэВном диапазоне энергий от гамма-всплесков по оповещениям (алертам) от систем GCN и AMON. В частности, в полученных за 158 часов данных наблюдений Крабовидной туманности двумя атмосферными черенковскими телескопами комплекса TAIGA-1 в период с 2020 по 2022 год стерео методом выделено 174 гамма-кванта высоких энергией от Крабовидной туманности на уровне значимости 12 σ , построенный по этим данным энергетический спектр хорошо согласуется со спектром, полученным на высокогорной установке LHAASO [5].

В целом, опыт первых лет эксплуатации установки TAIGA-1 подтвердил эффективность заложенных в проект подходов для создания установки большой площади для ПэВной гамма-астрономии. В докладе приводятся планы и первые результаты работ по разработке комплекса TAIGA-100 с гибридной системой детекторов на площади около 100 кв.км, который откроет уникальные возможности не только для решения многих задач гамма-астрономии сверхвысоких энергий и физики космических лучей, изучения транзитных явлений различной природы и длительности, включая гамма-всплески, но и поможет понять многие проблемы астрофизики частиц.

Список литературы

1. Budnev N. et al TAIGA—A hybrid array for high energy gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics. Nucl.Instrum.Meth.A. volume 1039, 167047, 2022.
2. Bartoli B. et al. Knee of the cosmic hydrogen and helium spectrum below 1 PeV measured by ARGO-YBJ and a Cherenkov telescope of LHAASO. Phys. Rev. D. - volume 92, 092005, 2015.
3. V.V. Prosin et al. Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays According to the Data of the TAIGA Astrophysical Complex // Bull.Russ.Acad.Sci.Phys.. volume 87, 1043, 2023
4. W. D. Apel, et al. The spectrum of high-energy cosmic rays measured with KASCADE-Grande //Astropart. Phys. volume 36, 183, 2012.
5. Zhen Cao et al. Peta-electron volt gamma-ray emission from the Crab Nebula. Science. volume 373, issue 6553, 425, 2021

Влияние темпа фотоионизации на нагрев полярной шапки радиопульсара J0901-4046

Барсуков Д. П.¹, Попов А.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: bars.astro@mail.ioffe.ru

Радиопульсар J0901-4046 является в настоящее наиболее медленно вращающимся "нормальным" радиопульсаром среди известных. Период его вращения составляет $P = 75.89$ с [1]. Темп уменьшения его периода составляет $\dot{P} = 2.25 \cdot 10^{-13}$ [1], что дает оценку напряженности дипольного магнитного поля на поверхности нейтронной звезды в районе магнитного полюса $B_{\text{дip}} \approx 2.6 \cdot 10^{14}$ Гс [1]. Его характеристический возраст, оцененный по темпу торможения, составляет $\tau \approx 5.3$ Млет [1]. В работе [2] было предложено объяснение работы радиопульсара J0901-4046 в рамках предположения, что стандартный метод оценки напряженности дипольного поля приводит сильному занижению его значения. В работе [2] предполагалось, что радиопульсар имеет только токовые потери энергии и что он близок к ортортогональному, т.е. угол наклона $\chi \approx 90^\circ$. Напротив, в работе [3] после тщательного анализа свойств радиоизлучения этого пульсара было показано, что угол его наклона на самом деле очень мал $\chi \approx 11^\circ$, т.е. пульсар близок к соосному. В работе [3] было предложено аналогичное объяснение работы радиопульсара J0901-4046. При этом предполагалось, что напряженность дипольного поля у него превышает полученную по

темпу торможения оценку B_{dip} почти на два порядка $B_{dip} \gtrsim 2.5 \cdot 10^{16}$ Гс. При этом стандартные методы оценки угла наклона дают для этого радиопульсара скорее значение $\chi \sim 40^\circ - 60^\circ$. Впрочем, недавно в работе [4] было показано, что свойства радиоизлучения у долгопериодических радиопульсаров обладают рядом особенностей заметно отличающих их от остальных "нормальных" радиопульсаров. И поэтому, возможно, применение стандартных методик оценки угла наклона является некорректным. В данной работе мы продолжаем развивать альтернативную модель объясняющую работу радиопульсара J0901-4046. Мы предполагаем, что величина его дипольного магнитного поля соответствует значению, определяемому стандартным методом по темпу торможения. Но зато, предполагаем что на поверхности нейтронной звезды присутствует крайне мелкомасштабное магнитное поле с напряженностью сравнимой с дипольным магнитным полем. К недостатку рассматриваемой модели надо отнести узкий диапазон конфигураций мелкомасштабного поля и сильную зависимость от температуры поверхности нейтронной звезды, поскольку в рассматриваемой модели предполагается разрушение образовавшихся позитрониев, т.е. связанных пар электрона и позитрона, тепловым излучением с поверхности нейтронной звезды. При этом в настоящее время температура поверхности нейтронной звезды не измерена, известен только верхний предел на полную рентгеновскую светимость $L_x \lesssim 3.2 \cdot 10^{30}$ эрг/с [1]. Поэтому в данной работе мы рассматриваем в качестве возможных значений температуры $T = (1-3) \cdot 10^5$ К, что не противоречит данному пределу. А с другой стороны, учитывает тот факт, что радиопульсар B0950+08 имеет такую температуру поверхности звезды при в три раза большем характеристическом возрасте $\tau 17.5$ Млет [5]. Так что мы вполне можем ожидать, что как и у радиопульсара B0950+08 нейтронная звезда у радиопульсара B0901-4046 все еще не остыла до меньших температур.

Список литературы

1. M. Caleb, I. Heywood, K. Rajwade et al, Nature Astronomy, v. 6, p. 828-836 (2022).
2. E.M. Novoselov, V.S. Beskin, A.K. Galishnikova et al, MNRAS, v. 494, p. 3899-3911 (2020).
3. D.N. Sob'yanin, Phys. Rev. D, v. 107, id. L081301 (2023).
4. И.Ф. Малов, АЖ, т. 101, с. 625-631 (2024).
5. G.G. Pavlov, B. Rangelov, O. Kargaltsev et al, ApJ, v. 850, id. 79 (2017).

Исследование корреляций и частотно-фазовой синхронизации в динамике спектральной плотности потока радиоизлучения квазаров

Демин С. А.¹, Демина Н.Ю.¹, Минкин А.В.²

¹ИФ КФУ, ²ЕГПУ КФУ

e-mail: Sergey.Demin@kpfu.ru

В настоящее время методы *наук о сложности* эффективно применяются для исследования эволюции сложных систем разнообразной природы: астрофизической, физической, химической, биологической и медицинской, социальной [1, 2]. При этом под сложной системой понимается объект, состоящий из значительного (порой огромного) числа взаимодействующих элементов. Исследуются свойства как отдельных компонентов в составе целого, так и их взаимодействие, которое приводит к уникальным свойствам сложных систем: эмерджентности, нестационарности и динамической перемежаемости, самоорганизации, коллективным явлениям и процессам и другим.

Здесь мы используем метод фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС) [3, 4] – теоретический подход к изучению динамики авто- и кросс-корреляций временных сигналов, генерируемых сложными системами. В качестве примера рассматривается изменение во времени спектральной плотности потока радиоизлучения квазаров, фиксируемых одновременно на частотах 2.7 ГГц и 8.1 ГГц [5]. Квазары были открыты в 60-х гг. XX века как источники радиоизлучения с очень малыми угловыми размерами (меньше 10") и затем отождествлены со звездообразными объектами. Согласно наиболее распространенным представлениям квазары являются активными ядрами далеких галактик, находящихся на стадии формирования, в которых сверхмассивная черная дыра поглощает вещество из газопылевого диска. При движении слоев падающего вещества возникают коллективные эффекты и резонансные явления, которые в конечном итоге отражаются на динамике излучения квазара.

Основой ФШС-методологии является введение специфических соотношений для описания и параметризации различных типов нерегулярностей в рассматриваемой динамике: нерегулярностей-всплесков и нерегулярностей-скачков, отражающих резонансные и хаотические вклады в поведение изучаемой системы. Для этого сформулированы соответствующие процедуры и алгоритмы извлечения информации, которые реализуются при сопоставлении общих феноменологических выражений для разностных моментов в и спектров мощности с соответствующими зависимостями, построенными на основе измеряемых сигналов. В дополнение к этому, двухпараметрические ФШС кросс-корреляторы позволяют устанавливать динамическую связность или частотно-фазовую синхронизацию сигналов, продуцируемых распределенными системами. Ранее развиваемая методология была представлена, например в работе [6], при решении другой астрофизической задачи - параметризации динамики микроквазара GRS 1915+105. Анализ эволюционной динамики рентгеновского излучения при аккреции позволил модифицировать существующую

классификацию состояний этой двойной системы по характеру проявления «хаоса» в ее эволюции на разных временных интервалах.

В настоящем исследовании возможности ФШС-подхода продемонстрированы в ходе анализа радиоизлучения квазаров (рассмотрены репрезентативные типы зависимостей ФШС-параметров и характеристик на примере двух квазаров), генерируемого внутренними областями аккреционного диска на разных частотах. Изученные в работе квазары, согласно полученным результатам, обладают различным типом динамики радиоизлучения, что отражает существенно разный характер процессов, протекающих на данных объектах. Динамика первого квазара отличается четко выраженным набором собственных частот со слабо проявляющимися эффектами нестационарности и высоким уровнем частотно-фазовой синхронизации. Напротив, динамика второго квазара характеризуется высокой нестационарностью, отсутствием различного набора резонансных частот и значительным влиянием эффектов динамической перемежаемости.

Результаты настоящего исследования будут представлять интерес для специалистов, исследующих процессы и явления, в том числе коллективные, приводящие к генерации излучения в аккрецирующих астрофизических объектах, а также ученых, развивающих статистические подходы или методы машинного обучения для выявления скрытой информации во временных сигналах, генерируемых сложными системами [7].

Список литературы

1. Kwapien J., Drożdż S. Physical approach to complex systems // *Physics Reports*. - 2012. - Vol. 515, Is. 3–4. - P. 115-226.
2. Fan J., Meng J., Ludescher J., et al. // *Physics Reports*. - 2021. - Vol. 896. - P. 1-84.
3. Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: Информация в хаотических сигналах. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
4. Timashev S.F., Panishev O.Y., Polyakov Y.S., et al. Analysis of cross-correlations in electroencephalogram signals as an approach to proactive diagnosis of schizophrenia // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. - 2012. - Vol. 391. - P. 1179-1194.
5. Tanizuka N., Khan M.R. Dynamical structure of quasar radio wave intensity fluctuations from daily to yearly period. - *Noise and Fluctuations ICNF-2003*, Ed. J. Sikula / Brno: Brno University of Technology, 2003. - P. 813-816.
6. Polyakov Yu.S., Neilsen J., Timashev S.F. Stochastic variability in X-ray emission from the black hole binary GRS 1915+105 // *The Astronomical Journal*. - 2012. - Vol. 143, No. 6. - P. 148-157.
7. Ndong'u S., Grobler T., Wijnholds S.J., et al. Advances on the morphological classification of radio galaxies: A review // *New Astronomy Reviews*. -2023. - Vol. 97. - P. 101685.

Оценка чувствительности детектора Борексино к ядерным переходам с нарушением принципа Паули

Драчнев И. С.¹, А.В. Дербин, И.С. Ломская, В.Н. Муратова, Н.В. Ниязова, Д.А. Семенов, Е.В. Унжаков.

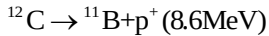
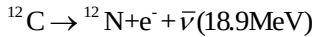
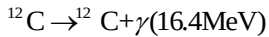
¹ПИЯФ, НИЦ «Курчатовский Институт»

e-mail: drachnev_is@pnpi.nrcki.ru

Детектор Borexino - большой сцинтилляционный нейтринный детектор, расположенный в лаборатории LNGS (Италия). Главным достижением коллектива данного эксперимента является беспрецедентно низкий уровень радиационного фона, который при массе чувствительного объема сцинтиллятора в 278 тонн составляет единицы отсчетов в сутки выше порога 200 кэВ, определяемого распадами ¹⁴C. Рекордно низкий уровень радиационного фона позволяет использовать этот детектор для поиска различных редких процессов.

Впервые возможность нарушения принципа Паули (ПП) обсуждались самими В.~Паули и П.~Дираком. Существующие теоретические модели, предсказывающие наличие нарушения ПП, не свободны от противоречий. Первые результаты поиска переходов внутри ядер ¹²C с нарушением ПП с детектором Borexino, были проведены в работе [1] на 48.5 кт-днях статистики.

В в настоящей работе была определена чувствительность детектора Borexino на статистической выборке в 583 кт-дней [2]. Рассматривались следующие процессы, идущие с нарушением ПП:



Благодаря увеличенной экспериментальной статистике были установлены новые ограничения на время жизни ядра ¹²C относительно непаулевских переходов.

Список литературы

1. New experimental limits on the Pauli-forbidden transitions in ¹²C nuclei obtained with 485 days Borexino data, G. Bellini et al.(Borexino coll.), Phys. Rev. C, vol. 81 iss. 3 pp. 034137
2. Improved measurement of solar neutrinos with of Borexino exposure, M. Agostini et al. (Borexino coll.), vol. 101 iss. 6 pp. 062001

Спектральная эволюция коротких гамма-всплесков по наблюдениям в эксперименте Конус-Винд

Свинкин Д. С.¹ Пантелеева В. А.², Фредерикс Д. Д.¹, Лысенко А. Л.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: svinkin@mail.ioffe.ru

Популяция коротких гамма-всплесков (с длительностями менее ~ 2 с) существенно неоднородна. Основную часть событий, вероятно, составляют всплески от слияний компактных объектов: двух нейтронных звезд или нейтронной звезды и чёрной дыры. Помимо этого, в популяции присутствуют всплески, связанные с коллапсами ядер массивных звёзд и начальные импульсы внегалактических гигантских вспышек магнитаров. Популяция гамма-всплесков, вызванных слияниями, также неоднородна и содержит так называемые короткие всплески с продлённым излучением, за основным коротким эпизодом излучения которых следует менее интенсивное излучение с длительностью до сотен секунд.

Одним из возможных путей разделять всплески, связанные с разными источниками, является исследование временной эволюции спектра события в гамма-диапазоне. Было показано, что единственный известный к началу 2025 года короткий гамма-всплеск, отождествленный с гравитационно-волновым событием от слияния двух нейтронных звёзд, GRB 170817A, имел существенную спектральную эволюцию излучения с появлением тепловой компоненты в течение всплеска [1], схожая эволюция в дальнейшем была выявлена у ряда других коротких всплесков [2]. Исследование наиболее ярких коротких всплесков показало значимую корреляцию интенсивности и жесткости спектра, характеризуемой пиковой энергией $E_F(E)$ спектра [3]. Наиболее яркие внегалактические гигантские вспышки магнитаров GRB 051103 и GRB 200415A имеют практически идентичный профиль спектральной эволюции - миллисекундный жесткий начальный пик, переходящий в более слабое затухающее излучение с экспоненциальным спаданием жесткости [4].

За более 30 лет наблюдений с 1994 в эксперименте Конус-Винд зарегистрировано более 560 коротких гамма-всплесков, что, в настоящее время, является одной из наибольших по объему однородных выборок подобных событий, детальный анализ спектральной эволюции которых существенно дополнит результаты, полученные по данным других инструментов [5].

В докладе представлен предварительный анализ спектральной эволюции коротких гамма-всплесков по данным Конус-Винд. В частности, исследуется временная эволюция жесткости событий и корреляция жесткость-интенсивность в ходе всплеска. Полученные результаты обсуждаются в контексте классификации коротких всплесков на физические типы их источников.

Список литературы

1. Goldstein, et al., An ordinary short gamma-ray burst with extraordinary implications: Fermi-GBM detection of GRB 170817A // *ApJL* 848, L14, 2017

2. von Kienlin, et al., Fermi-GBM GRBs with characteristics similar to GRB 170817A // *ApJ* 876, 89, 2019
3. Ghirlanda, et al., Spectral evolution of Fermi/GBM short gamma-ray bursts // *MNRAS Letters*, 410, L47
4. Svinkin et al., A bright gamma-ray flare interpreted as a giant magnetar flare in NGC 253 // *Nature*, 589, 211, 2021
5. Lysenko et al., The Third Konus-Wind Catalog of Short Gamma-Ray bursts // *PASA*, accepted, 2025 (arxiv:2410.16896)

Астероид 2024 PT5: «спутник» Земли сроком на два месяца

Мартюшева А. А.¹, Девяткин А.В.¹, Петрова С.Н.¹

¹ГАО РАН

e-mail: alex.mart13@gmail.com

Астероид 2024 PT5 размером около 10 м был обнаружен 7 августа 2024 г. южноафриканским телескопом системы оповещения о столкновении с астероидами ATLAS в Сазерленде за день до своего приближения к Земле на расстояние около 570 тыс. км. Он является представителем семейства Аполлона, чьи орбиты пересекают земную орбиту с внешней стороны, и несмотря на ряд последовательных тесных сближений с Землей и Луной, он не является потенциально опасным объектом ввиду своего малого размера.

29 сентября 2024 г. этот астероид был захвачен земной гравитацией и до 25 ноября 2024 г. находился на геоцентрической орбите, став так называемым «спутником» на 57 дней. Таким образом, астероид 2024 PT5 совершил подковообразный разворот вокруг Земли, так и не сделав ни одного полного оборота в связи с выходом из сферы гравитационного влияния Земли. Когда астероид 2024 PT5 9 января 2025 г. на расстоянии 1.8 млн км вышел из резонанса с Землей, то он вновь перешел на гелиоцентрическую орбиту до своего очередного возвращения 8 ноября 2055 г. В этот раз сближение произойдет на расстояние около 5.4 млн км.

Данное явление нельзя назвать уникальным, однако, оно представляет интерес для исследований в силу своей редкости. Кроме того, гравитационный захват подобных объектов для изучения на околоземной орбите может быть интересен с точки зрения добычи полезных ископаемых. Согласно выдвинутым гипотезам [1, 2], астероид 2024 PT5 может являться фрагментом лунной породы и не имеет искусственного происхождения.

На телескопе Пулковской обсерватории МТМ-500М [3], расположенном на Кисловодской горной астрономической станции, были проведены наблюдения в рамках программы изучения объектов, сближающихся с Землей, и получено 28 наблюдений астероида 2024 PT5. Из совокупности наших наблюдений и наблюдений, взятых из базы данных Центра малых планет, были уточнены элементы орбиты астероида 2024 PT5. Также была выполнена оценка воздействия негравитационных эффектов на астероид 2024 PT5 и исследована его орбитальная эволюция.

Список литературы

1. de la Fuente Marcos R., de Leon J., Serra-Ricart M., de la Fuente Marcos C., Alarcon M. R., Licandro J., Geier S., Tejero A., Perez Romero A., Perez-Toledo F., Cabrera-Lavers A., Basaltic quasi-mini-moon: Characterizing 2024 PT5 with the 10.4 m Gran Telescopio Canarias and the Two-meter Twin Telescope, *Astronomy & Astrophysics*, V. 694, 142-150, 2024
2. Kareta T., Fuentes-Muñoz O., Moskovitz N., Farnocchia D., Sharkey B. N. L., On The Lunar Origin of Near-Earth Asteroid 2024 PT5, *The Astrophysical Journal Letters*, V. 979, N. 1, 2025
3. Кулиш А. П., Девяткин А. В., Рафальский В. Б., Ибрагимов Ф. М., Куприянов В. В., Верещагина И. А., Шумахер А. В., Автоматизация комплекса телескопа МТМ-500М, *Изв. ГАО, № 219, вып. 1*, 192-218, 2009

Особенности релятивистского вращения тел Солнечной системы на примере некоторых спутников Юпитера

Пашкевич В. В.¹, Вершков А. Н.¹

¹ГАО РАН

e-mail: apeks@gaoran.ru

В релятивистском вращении небесных тел вокруг своей оси наиболее существенным эффектом является эффект геодезического вращения, который состоит из двух эффектов: систематического (или векового) эффекта - геодезической прецессии [1] и периодического эффекта - геодезической нутации [2]. Оба эти эффекта имеют формальное сходство с известными в классической механике явлениями прецессии и нутации. Основное отличие геодезических эффектов от классических состоит в том, что появление первых не связано с действием на тело каких-либо сил, а обусловлено изменением направления его оси вращения в результате параллельного переноса вектора углового момента тела вдоль его орбиты в искривленном пространстве-времени.

Другие эффекты ОТО и СТО – изменение шкалы координатного времени [3, 4] (переход к шкале собственного времени исследуемых небесных тел, эффект зависящий от величины периода обращения исследуемого тела вокруг своей оси), прецессия Ленса-Тирринга [5] (эффект зависящий от вращения центрального тела изменяющего геометрию пространства-времени) и прецессия Томаса [6, 7] (эффект прецессии координатных осей при ускоренном движении) значительно (на несколько порядков) меньше влияют на релятивистское вращении небесных тел вокруг своей оси.

В данной работе, исследуя релятивистские эффекты геодезического вращения вокруг своих осей 10 спутников Юпитера (J4, J6, J8, J11, J12, J16, J18, J46, J49, J62), для которых известны эфемериды, изучаются особенности релятивистского вращения тел Солнечной системы. Показано различие векторов угловой скорости геодезического вращения в зависимости от выбора координатной системы отсчета. Так абсолютная величина вектора угловой скорости геодезического вращения исследуемого спутника относительно

барицентра Солнечной системы не будет совпадать с абсолютной величиной аналогичного вектора исследуемого спутника относительно барицентра спутниковой системы планеты.

В результате впервые определены наиболее существенные периодические члены геодезического вращения (геодезической нутации) этих небесных тел (спутники перечислены в порядке возрастания расстояния от Юпитера): для 2-х регулярных (внутреннего - Метиды (Metis J16), галилеевого - Каллисто (Callisto J4)) и 8-ми иррегулярных (из других групп по их названиям за исключением Коры, самой далёкой в известной эфемериде Horizons On-Line Ephemeris System [8] из группы Пасифе: 4-х с прямым движением по отбите - Фемисто (Themisto J18), Гималии (Himalia J6), Карпо (Carpo J46), Валетудо (Valetudo J62) и 4-х с обратным движением по отбите - Ананке (Ananke J12), Карме (Carme J11), Пасифе (Pasiphae J8), Кору (Kore J49)) спутников Юпитера относительно: а) барицентра Солнечной системы; б) барицентра системы спутников Юпитера.

На примере тел Солнечной системы показано, что величина геодезического вращения может быть существенной не только у объектов, которые вращаются вокруг сверхмассивных релятивистских центральных тел, но и у тел с малым расстоянием до менее массивного центрального тела. В Солнечной системе одними из таких объектов являются внутренние и галилеевы спутники Юпитера (для которых Юпитер является менее массивным возмущающим центральным телом, чем Солнце). В частности, величина геодезической прецессии самого близкого из внутренних спутников Юпитера - Метиды составляет -26536 секунд дуги за тысячу лет, что в 90000 раз больше, чем у Юпитера (-0.3 секунд дуги за тысячу лет), вращающегося вокруг своего более массивного центрального тела (Солнца), и в 100 раз больше, чем у Меркурия (-214 секунд дуги за тысячу лет) ближайшей от Солнца планеты. Величина геодезической прецессии самого дальнего из галилеевых спутников Юпитера - Каллисто составляет -32.2 секунд дуги за тысячу лет, что в 100 раз больше, чем у Юпитера.

Полученные аналитические величины геодезической нутации изучаемых небесных тел могут быть использованы для численного исследования вращения этих тел в релятивистском приближении.

Отметим, что дальнейшее изучение эффектов геодезического вращения и других релятивистских эффектов может быть полезным при изучении влияния внутренних физических процессов изучаемых тел на их вращения, которые могут быть сравнимыми с ними по величине. А именно, чтобы отделить их друг от друга.

Список литературы

1. *De Sitter W.* On Einstein's Theory of Gravitation and its Astronomical Consequences // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1916. No. 77. P. 155–184. (<https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155>).
2. *Fukushima T.* Geodesic Nutation // *Astronomy and Astrophysics.* 1991. V. 244. No. 1. P. L11–L12.
3. *Soffel, M., Klioner, S. A., Petit, G., Wolf P., Kopeikin S. M., Bretagnon P., Brumberg V. A., Capitaine N., Damour T., Fukushima T., Guinot B., Huang T.-Y., Lindegren L., Ma*

- C., Nordtvedt K., Ries J. C., Seidelmann P. K., Vokrouhlicky' D., Will C. M., and Xu C. The IAU 2000 resolutions for astrometry, celestial mechanics, and metrology in the relativistic framework: explanatory supplement // The Astronomical Journal, 126, 2003, P. 2687–2706.
4. Petit, G., Luzum, B., et al. 2010, IERS Tech. Note, 36, 1
 5. Lense J. and Thirring H. Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie // Physikalische Zeitschrift. V. 19, 1918. P. 156-163 (Bibcode 1918PhyZ ... 19..156L (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1918PhyZ...19..156L>)).
 6. Thomas L.H. Motion of the spinning electron // Nature. 1926. Vol. 117. P. 514.
 7. Thomas L.H. B.A. I. The kinematics of an electron with an axis // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1927, 3:13, 1-22, (<https://doi.org/10.1080/14786440108564170>)
 8. Giorgini J.D., Chodas P.W., Yeomans D.K. Orbit Uncertainty and Close-Approach Analysis Capabilities of the Horizons On-Line Ephemeris System // 33rd AAS/DPS meeting in New Orleans. LA. Nov 26. 2001 – Dec 01. 2001.

Новые системы для оценки распространенности первичного дейтерия в SQUAD и KODIAQ

Кислицын П. А.¹, Балашев С.А., Иванчик А.В.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: pavel.kislitsyn@gmail.com

Оценка распространенности первичного дейтерия (D/H)_{pr} играет ключевую роль в современной космологии, поскольку дейтерий является лучшим бариометром. Он образуется в первые минуты после Большого взрыва в процессе первичного нуклеосинтеза, и его количество чрезвычайно чувствительно к физическим условиям ранней Вселенной, как например барион-фотонное отношение (η), которое линейным образом связано с барионной плотностью Вселенной (Ω_b).

Точные измерения (D/H)_{pr} позволяют не только уточнить значение барионной плотности, но и проверять фундаментальные физические теории. Например, отклонения от предсказаний стандартной модели BBN могут указывать на существование новых физических явлений, таких как вариации фундаментальных постоянных, наличие дополнительных релятивистских степеней свободы в ранней Вселенной, лептонная асимметрия, испарение черных дыр и др. Именно поэтому, оценка распространенности первичного дейтерия представляет собой крайне важную и актуальную задачу для исследования и формирования Новой физики за рамками Стандартной модели.

Одним из наиболее надежных методов измерения распространенности первичного дейтерия является анализ абсорбционных систем в спектрах квазаров на больших красных смещениях ($z \sim 2-4$) [1]. Эти системы, возникающие на линии наблюдения между квазаром и наблюдателем, содержат облака межгалактического газа, которые оставляют линии поглощения дейтерия и водорода в фоновых спектрах квазаров. На сегодняшний день в

литературе представлено лишь **17 оценок D/H** [2], полученных на основе анализа абсорбционных систем в спектрах квазаров. Это ограниченное количество измерений подчеркивает необходимость расширения выборки для повышения точности космологических выводов.

В данной работе мы используем данные из открытых баз данных, содержащих спектры квазаров высокого разрешения, наблюдавшиеся на лучших оптических телескопах SQUAD (Spectral QUasar Absorption Database)[3] и KODIAQ (Keck Observatory Database of Ionized Absorbers toward Quasars)[4], чтобы провести индивидуальный анализ спектров и идентифицировать системы, пригодные для оценки D/H. В результате проведенного анализа было обнаружено 53 новых источника, которые в настоящее время обрабатываются для получения точных и надежных оценок содержания дейтерия.

Систематический поиск систем для оценки D/H с использованием данных SQUAD и KODIAQ позволил значительно увеличить статистику оценок, расширив диапазон физических условий в абсорбционных системах, что позволит оценить влияние систематических эффектов, влияющих на оценку распространенности первичного дейтерия.

Список литературы

1. Cooke, R. J., et al. (2014). «Precision measures of the primordial abundance of deuterium.» *The Astrophysical Journal*, 781, 31.
2. Kislitsyn, P.A. et al. (2024). «A new precise determination of the primordial abundance of deuterium: measurement in the metal-poor sub-DLA system at $z = 3.42$ towards quasar J 1332 + 0052» *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 528, 3
3. Murphy, M.T. et al. (2019). «The UVES Spectral Quasar Absorption Database (SQUAD) data release 1: the first 10 million seconds» *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482, 3
4. O'Meara, J.M. et al. (2017). «The Second Data Release of the KODIAQ Survey» *The Astrophysical Journal*, 154, 114.

Проявление магнитного цикла Хейла на Солнце в вариациях характеристик солнечного ветра

Веретененко С. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: s.veretenenko@mail.ioffe.ru

В работе исследуется проявление ~22-летнего цикла Хейла, наблюдаемого в колебаниях полярности магнитных полей на Солнце, в вариациях характеристик солнечного ветра по данным базы OMNI. Цикл Хейла состоит из 2-х последовательных 11-летних циклов (циклов Швабе-Вольфа). При переходе к новому 11-летнему циклу распределение полярности в группах солнечных пятен меняется на противоположное. Вблизи максимума цикла происходит изменение знака магнитных полей в полярных областях, или обращение общего магнитного поля (ОМП) Солнца. В четных (согласно Цюрихской нумерации) солнечных циклах полярность ОМП становится положительной $A > 0$ (магнитные силовые линии

выходят из северного полюса и входят в южный), в нечетных - отрицательной ($A < 0$). Как показало проведенное исследование, временной ход среднегодовых значений компонент межпланетного магнитного поля (ММП) B_z и B_y , играющих важную роль в формировании геомагнитных возмущений, характеризуется доминирующими бидекадными периодами, связанными с циклом Хейла. Обнаружено, что изменения среднегодовых значений B_z и B_y компонент ММП противоположны в четных и нечетных солнечных циклах. Для B_z компоненты наибольшие различия наблюдаются в минимуме цикла, для B_y компоненты – на фазе роста и в максимуме цикла. В скорости солнечного ветра бидекадных вариаций не выявлено. Предположено, что обусловленные солнечным циклом Хейла вариации геоэффективных компонент ММП могут способствовать формированию бидекадных колебаний в земном климате. Возможный физический механизм включает изменения скорости ионизации, обусловленные высыпаниями авроральных электронов в ходе геомагнитных возмущений, и связанные с ними изменения химического состава и температурного режима высокоширотной атмосферы.

Возможность детектирования излучения надтепловых частиц, ускоренных обратными ударными волнами в остатках сверхновых

Зибинская Д. А.^{1,2}, Кропотина Ю. А.², Быков А. М.²

¹СПБАУ РАН, ²ФТИ им. А. Ф. Иоффе

e-mail: daryashishkina@list.ru

Вспышки сверхновых — одни из наиболее энергичных процессов во Вселенной. Вспышка характеризуется резким повышением светимости в результате мощного выброса вещества звезды-предшественника. По мере расширения объема выброшенного вещества светимость плавно ослабевает. Выброшенное вещество называется эжектой и распространяется со скоростью около 10^4 км/с. В результате выброса формируется головная ударная волна, движущаяся наружу от центра вспышки в околозвездную среду. Постепенно поглощенное вещество тормозит эжекту, и формируется обратная ударная волна. Считается, что головная ударная волна достаточно эффективно ускоряет протоны и альфа-частицы межзвездной среды (до 15% кинетической энергии потока может переходить в надтепловые частицы). Теоретически, аналогичным образом обратная ударная волна могла бы ускорять тяжелые частицы эжекты. Однако прямых подтверждений наличия тяжелых ионов, ускоренных обратной ударной волной, пока не обнаружено. В данной работе мы исследуем возможность обнаружения линий гамма-излучения от тяжелых ускоренных ядер, которые могут сталкиваться с протонами околозвездной среды с возбуждением ядерных уровней энергии. Время жизни ядра в возбужденном состоянии составляет примерно 10^{-12} с, по прошествии которого ядро возвращается в основное состояние с испусканием гамма фотона (1-10 МэВ).

Данная работа посвящена моделированию гамма-излучения от обратных ударных волн в остатках сверхновых. В последнее время анонсировано несколько проектов по созданию гамма-телескопов с максимальными чувствительностями от $\sim 10^{-6}$ (AMEGO [2], e-ASTROGAM [3]) до 10^{-5} (COSI [4]) фотонов/(см² с) в диапазоне 1-10 МэВ. Наша модель потока гамма-излучения позволяет оценить возможность обнаружения линий от ускоренных частиц эжекты и вследствие оценить эффективность ускорения обратной ударной волной.

Процесс генерации гамма-излучения в прямых реакциях неупругого рассеяния рассматривается в соответствии с работой Bozhokin & Bykov (1997) [1], где подробно показан расчет формы одиночной линии (от одной реакции). Для оценки величины потока можно не учитывать анизотропию испускания фотона ядром. Дифференциальный поток гамма-фотонов на расстоянии d от остатка имеет вид:

$$dF_{\gamma} = \frac{V_{rem}}{4\pi d^2} \int_{E_{min}}^{E_{max}} n_H dP_{\gamma} Q(E) dE, \text{ где } V_{rem}$$

— объем остатка, E_{min}, E_{max} -- пороговые значения кинетической энергии столкновения для протекания реакций с возбуждением ядра, n_H -- концентрация протонов околозвездной среды, поглощенных головной ударной волной, $dP_{\gamma} \sim n_s \sigma(E) v(E) >$ -- вероятность испускания гамма-фотона в одной реакции столкновения частиц сорта s с протонами, $Q(E) \sim \chi W V_{rem}^{-1} p^{\alpha}(E)$ -- распределение ускоренных частиц по кинетической энергии (считаем, что ускорение происходит за счет механизма Ферми), W -- полная кинетическая энергия вспышки. В качестве показателя α выбрано среднее значение из имеющихся в литературе оценок: -2,3. Параметр χ определяет эффективность ускорения, т.ч. χW -- полная кинетическая энергия частиц эжекты всех сортов. Так как время жизни обратной ударной волны конечно, в качестве χ можно рассматривать величину $\tau \chi_2 \chi_3$, где τ пропорционально времени жизни обратной ударной волны и возрасту остатка [5]. В работе рассмотрены остатки исторических сверхновых типа Ia: SN1006, SN1572 (Tycho's), SN1604 (Kepler's); а также остаток сверхновой типа II -- Cas A. Все параметры остатков и состав эжекты взяты из работ по обработке наблюдений ([6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]). Сечения взаимодействия в реакции неупругого рассеяния с переходом ядра на первый возбужденный уровень, а также энергии испускаемых гамма-фотонов рассчитаны с помощью TALYS ([13]).

В результате получены следующие значения полных гамма-потоков:

- для Cas A: $F = 10^{-8}$ фотонов/(см² с)
- для SN1006: $F = 4 \cdot 10^{-10}$ фотонов/(см² с)
- для SN1572(Tycho): $F = 10^{-10}$ фотонов/(см² с)
- для SN1604(Kepler): $F = 5 \cdot 10^{-12}$ фотонов/(см² с)

Таким образом, в данных предположениях рассчитанные значения потоков оказываются на 2-4 порядка ниже максимальной чувствительности будущих гамма-телескопов. Следовательно, обнаружение линий гамма-излучения от частиц эжекты маловероятно. Однако,

в случае более высокой эффективности ускорения, чем предполагалось в нашей модели, потоки могут достигать пороговых значений.

Список литературы

1. S. V. Bozhokin и А. М. Bykov. "Modeling of the spectra of broad gamma-ray lines in astrophysical objects". *Astronomy Letters*
2. Julie McEnery и др. "All-sky Medium Energy Gamma-ray Observatory: Exploring the Extreme Multimessenger Universe". *Bulletin of the American Astronomical Society*. Т.
3. А. De Angelis и др. "Science with e-ASTROGAM: A space mission for MeV–GeV gamma-ray astrophysics". *Journal of High Energy Astrophysics*
4. J. Tomsick и COSI Collaboration. "The Compton Spectrometer and Imager Project for MeV Astronomy". *th International Cosmic Ray Conference*.
5. J. Kelly Truelove и Christopher F. McKee. "Evolution of Nonradiative Supernova Remnants". *ApJS*, . doi: ./.
6. Hiroya Yamaguchi и др. "X-Ray Spectroscopy of SN with Suzaku". *Publications of the Astronomical Society of Japan*
7. A. Summa, D. Elsasser и K. Mannheim. "Nuclear de-excitation line spectrum of Cassiopeia A". *A&A*, .
8. Satoru Katsuda и др. "Kepler's Supernova: An Overluminous Type Ia Event Interacting with a Massive Circumstellar Medium at a Very Late Phase". *The Astrophysical Journal*
9. Jiang-Tao Li и др. "XMM-Newton large program on SN - I. Methods and initial results of spatially resolved spectroscopy". *MNRAS*
10. Jiang-Tao Li и др. "XMM-Newton large programme on SN - II. Thermal emission". *MNRAS*
11. Gilles Ferrand и др. "From Supernova to Supernova Remnant: The Three-dimensional Imprint of a Thermonuclear Explosion". *The Astrophysical Journal*
12. Denis Leahy и др. "Emission Measures and Emission-measure-weighted Temperatures of Shocked Interstellar Medium and Ejecta in Supernova Remnants". *The Astronomical Journal*
13. A. J. Koning, S. Hilaire и M. C. Duijvestijn. "TALYS: Comprehensive Nuclear Reaction Modeling". doi: ./..

Спектральные задачи в теории галактического динамо: асимптотические и вычислительные подходы

Михайлов Е. А.^{1,2}, Желиговский В. А.³, Таранюк А. А.^{2,3}, Фролова М. В.²

¹Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

³Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

e-mail: e.mikhajlov@lebedev.ru

В настоящий момент практически не вызывает сомнений наличие магнитных полей у ряда спиральных галактик [1]. Будучи впервые выявлены по результатам изучения пространственного распределения космических лучей для Млечного Пути, в настоящее время они как правило изучаются при помощи измерения поворота плоскости поляризации электромагнитных волн (так называемое фарадеевское вращение). В текущий момент твердо

известно о существовании полей величиной несколько микрогаусс для порядка 10^2 различных галактик.

С теоретической точки зрения их возникновение объясняется с помощью теории динамо, которая описывает эволюцию магнитного поля за счет переноса магнитных полей как мелкомасштабными турбулентными, так и крупномасштабными течениями. Галактика вращается нетвердотельно, поэтому радиальная компонента поля переходит в азимутальную с одновременным увеличением индукции (дифференциальное вращение). Одновременно закрученные турбулентные течения приводят к превращению азимутальной компоненты поля в радиальную [1].

Хотя в настоящий момент существуют усредненные модели для описания эволюции магнитного поля, изучение уравнений магнитной гидродинамики в среде, где существуют вихри разных (в том числе – взаимно несоизмеримых) масштабов представляет самостоятельный интерес. Задача о кинематической генерации магнитного поля сводится к поиску неотрицательных собственных значений для соответствующего дифференциального оператора, что говорит о возможности возбуждения магнитного поля. В настоящей работе проработаны алгоритмы численного решения данной спектральной задачи на более простом примере двумерной задачи о гидродинамической адвекции скалярной примеси, алгебраические и вычислительные свойства которой аналогичны.

Если переходить к масштабам, сопоставимым с размерами всей галактики, то вновь возникает задача на собственные значения для дифференциальных операторов, которые уже характеризуют эволюцию крупномасштабных полей. В случае модели динамо в тонком диске [2] задача оказывается точно разрешимой (по крайней мере, для некоторых частных случаев). В то же время, если мы рассмотрим диски большой толщины [3] – в операторе возникают слагаемые, вклад которых может быть определен лишь с помощью методов теории возмущений [4]. Также с целью верификации аналитических результатов были найдены численные величины собственных значений. С этой целью потребовалось решение системы линейных уравнений с помощью метода немонотонной прогонки. Точно так же, как и в мелкомасштабной задаче, положительные собственные значения характеризуют возможность роста магнитного поля.

В данной работе даны оценки, при каких параметрах галактического диска может наблюдаться рост магнитного поля с учетом эффектов, связанных с большой толщиной диска. Приводятся результаты численного моделирования поля.

Список литературы

1. Arshakian T.G., Beck R., Krause M., Sokoloff D. Evolution of magnetic fields in galaxies and future observational tests with the Square Kilometre Array. *Astron. Astrophys.* - 2009. – 434. – P.21 – 32.
2. Moss D. On the generation of bisymmetric magnetic field structures in spiral galaxies by tidal interactions. *Mon. Not. R. Astr. Soc.* - 1995. – 275. – P.191 – 194.
3. Moss D., Mikhailov E., Silchenko O., Sokoloff D., Horellou C., Beck R. Magnetic fields in ring galaxies. *Astron. Astrophys.* - 2016. – 592. – A44.

4. Mikhailov E., Pashentseva (Frolova) M. Eigenvalue Problem for a Reduced Dynamo Model in Thick Astrophysical Discs. Mathematics. – 2023. – 11. – 3106.

Модельная оценка качества методики восстановления данных установки Tunka-Grande

Иванова А. Л.^{1,2}, коллаборация TAIGA

¹НГУ

²НИИПФ ИГУ

e-mail: annaiv.86@mail.ru

Сцинтилляционная установка Tunka-Grande [1] расположена в Тункинской долине, в 50 км от оз. Байкал. Она представляет собой сеть из 19 станций наблюдения, развернутых на площади около 0.5 км². Установка Tunka-Grande входит в состав астрофизического комплекса TAIGA-1 [2] и нацелена на исследование космических лучей (КЛ) и поиск диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий от 10 ПэВ до 1 ЭэВ методом регистрации электрон-фотонной и мюонной компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ).

Оценка качества восстановления экспериментальных данных является важным этапом обработки и анализа, поскольку позволяет сравнить различные методики и выбрать наиболее эффективные алгоритмы реконструкции характеристик первичного космического излучения.

До настоящего времени точность восстановления параметров ШАЛ по данным установки Tunka-Grande оценивалась экспериментально с помощью сравнительного анализа совместных событий с черенковскими установками TAIGA-HiSCORE [3] и Тунка-133 [4]. Черенковские детекторы демонстрируют хорошую производительность и высокую надежность, но, строго говоря, их результаты не являются истинными, поскольку имеют свои погрешности. Поэтому такой подход позволил получить лишь верхние ограничения на ошибки восстановления параметров ШАЛ и КЛ по данным установки Tunka-Grande.

Альтернативный подход к оценке качества восстановления данных основан на использовании результатов компьютерного моделирования методом Монте-Карло. Модельная оценка качества восстановления данных установки Tunka-Grande была выполнена путем сравнительного анализа результатов реконструкции и исходных параметров искусственных ШАЛ, сгенерированных с помощью инструментариев CORSIKA (модель электромагнитных взаимодействий - EGS4, модели адронных взаимодействий - QGSJET-II-04, Geisha)[5] и Geant4[6]. Параметры моделирования: первичная частица – протон, энергетический диапазон $\lg(E/1\text{ЭВ})$ от 15 до 16.75 с шагом 0.25, зенитные углы 0°, 15°, 30°, 45°, диапазон азимутальных углов 0°÷ 360°, положение оси — в круге радиусом 800 м с центром координат, совпадающим с координатами центральной станции Tunka-Grande. Общее число смоделированных ШАЛ – 1600000 ливней.

В докладе приводятся результаты модельной оценки качества восстановления параметров ШАЛ и КЛ по данным установки Tunka-Grande.

Список литературы

1. A.L. Ivanova et al. Scintillation Experiment on the Study of Cosmic Rays and Gamma Fluxes in the Tunka Valley. //Phys.Atom.Nucl. 86 (2023) 4, 478-482.
2. I. Astapov et al. The TAIGA — a Hybrid Detector Complex in Tunka Valley for Astroparticle Physics, Cosmic Ray Physics and Gamma-Ray Astronomy. //Phys.Atom.Nucl. 86 (2023) 4, 471-477.
3. V.V. Prosin et al. Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays According to the Data of the TAIGA Astrophysical Complex. //Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. 87 (2023) 7, 1043-1045.
4. Budnev N. M. et al. The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array // Astroparticle Physics. 2020. V. 117. 102406.
5. R. Engel et al. Towards a Next Generation of CORSIKA: A Framework for the Simulation of Particle Cascades in Astroparticle Physics. // Comput. Softw. Big Sci. — 2019. — Vol. 3, no. 1. — P. 2.
6. S. Agostinelli et al. GEANT4-asimulation toolkit.// Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Vol. 506. — P. 250.

Моделирование расширенного основания эмиссионных линий в спектрах НII областей

Ананьев Я. О.^{1,2}, Куричин О. А.¹, Иванчик А. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПБАУ им. Ж.И. Алфёрова

e-mail: yarik.ananьев@mail.ru

Зоны ионизованного водорода, называемые НII областями, могут существовать как внегалактические объекты, так и как части более масштабных галактик, которые наблюдаются на значительных расстояниях во Вселенной. Исследование таких объектов важно для улучшения определения расстояний и химического состава галактик. В работе [1] описан анализ выборки компактных голубых карликовых галактик с целью определения расстояния до них и оценки космологических параметров, что требует высокой точности определения потоков эмиссионных линий. В процессе анализа большой выборки таких объектов был обнаружен новый систематический эффект, ранее не учитывавшийся при обработке спектров НII областей. Этот эффект состоит в явном видимом отличии профилей мощных эмиссионных линий в районе континуума от гауссовского. Во многих объектах линии как бы накладываются на некоторую широкую "подставку" с низкой собственной интенсивностью. Игнорирование этого эффекта при моделировании профилей эмиссионных линий приводил к явно видимому рассогласованию модели и наблюдаемых потоков.

Данная работа посвящена объяснению физической природы широкой добавочной компоненты в основании эмиссионных линий НII областей и моделированию ее профилей. Для

теоретического описания этого явления была рассмотрена классическая сфера Стрёмгрена (см. в [2]), расширяющаяся в облаке атомарного водорода HI. Расширение происходит в силу неравенства давлений в областях НII и HI - гидростатическое давление в ионизированной области выше на 2-3 порядка. Добавочная компонента возникает в расширяющейся оболочке НII областей, низкая собственная интенсивность таких линий связана с малым объемом этой оболочки по сравнению с объемом основной НII области, а бо'льшая дисперсия связана с тем, что скорость расширения оболочки выше характерной величины дисперсии скоростей в основной области.

При однородном и изотропном расширении НII областей одна часть объёма оболочки движется по направлению к наблюдателю, а другая часть от наблюдателя, что даёт два добавочных вклада в интегральный поток эмиссионных линий, I_{at} и I_{from} . В этой работе представлены аналитические зависимости I_{at} и I_{from} , описывающие профиль широкой компоненты, как функции от скорости расширения оболочки, внутренней дисперсии скоростей в оболочке и углового размера объекта. Для оценки того, как будет выглядеть профиль широкой компоненты в реальных спектрах, было проведено моделирование возможных скоростей расширения НII областей, а также выполнена свертка теоретического профиля с аппаратной функцией спектрографов, используемых для оптических наблюдений НII областей. В работе показано, что для физически осмысленных значений температур, концентрации и возрастов типичных НII областей профили добавочной широкой компоненты при наблюдениях на современных телескопах могут быть описаны одной гауссовой функцией без уменьшения общности. Также было показано, что ожидаемое отличие итогового профиля линии от чистой гауссовой функции можно ожидать на спектрографах с разрешающей способностью выше 5 км/с.

В дополнение, в работе проведен сравнительный анализ выборки спектров реальных объектов с учетом и без учета нового систематического эффекта. Показано, что пренебрежение этим эффектом при моделировании профилей линий может приводить к ошибке измерения потоков на величину до 8-10%, что, в силу сильной нелинейности фотоионизационных моделей НII областей и взаимного наложения исследуемого и других систематических эффектов, может давать заметный систематический сдвиг в определении оценок на физические параметры, химический состав и расстояния до таких объектов.

Список литературы

1. Я.О. Ананьев, О.А. Куричин, А.В. Иванчик // Журнал технической физики, 2024, том 94, вып. 12, С. 2068—2070.
2. Osterbrock, Donald E., and Gary J. Ferland. *Astrophysics Of Gas Nebulae and Active Galactic Nuclei*. University science books, 2006.

Накопление позитронов, образовавшихся при взаимодействии фоновых гамма- и оптических квантов

Попов А. Н.¹, Барсуков Д.П.¹, Иванчик А.В.¹, Бобашев С.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alexander.popov@mail.ioffe.ru

Пространство между галактиками заполнено крайне разреженным межгалактическим газом. Только в районе скопления галактик, где газ проваливается в гравитационную яму и его плотность возрастает, его концентрация может достигать величин 10^{-3} см^{-3} . В гораздо в большей степени данное пространство заполнено электромагнитным фоновым излучением. Основной его компонентой является реликтовое излучение (СМВ), которое образовалось в эпоху рекомбинации $z \sim 10^3$ и несет информацию о происходящих в то время процессах [1]. Гораздо позже образовались другие компоненты фонового излучения. Внегалактическое фоновое излучение (EBL - extragalactic background light) состоит из оптических и инфракрасных фоновых фотонов и создано, в первую очередь, излучением звезд [1]. Рентгеновское фоновое излучение создавалось в первую очередь при аккреции вещества на галактические ядра [1]. Возможно также имеется фоновое ультрафиолетовое излучение (CUB), созданное излучением межзвездных туманностей и горячих молодых звезд [1]. Фоновая компонента (СГВ), состоящая из фотонов гамма-диапазона, рождалась во время вспышек сверхновых и, возможно, несет с собой информацию об этих событиях [1]. Это излучение взаимодействует в первую очередь с межгалактической и между- и внутри-кластерной средой [2]. Однако возможно и взаимодействие фоновых фотонов между собой с образованием электрон-позитронных пар. Оптическая толщина по данному процессу намного порядков ниже, чем толщина из-за рассеяния фоновых фотонов на электронах и ионах среды [2]. Однако данный процесс приводит к появлению постоянно действующего источника позитронов в межгалактическом и междукластерном пространстве. В данной работе мы ограничили свое рассмотрение только процессом рождения позитронов при взаимодействии СГВ-фотонов с EBL-фотонами. Процесс с данными фотонами дает наибольший темп рождения позитронов. Ему конкуренцию мог бы составить только процесс рождения позитронов при взаимодействии СГВ-фотонов с гипотетическими CUB-фотонами и то, только в случае если интенсивность потока CUB-фотонов близка к своему верхнему пределу. Родившиеся позитроны имеют энергию порядка 10^5 МэВ и поэтому практически не аннигилируют при распространении в крайне разреженной межгалактической и междукластерной среде [3]. Среднее время их жизни до аннигиляции составляет 2-3 млрд. лет [3]. Поэтому в данной работе мы рассматриваем как меняется темп рождения позитронов с течением времени и как они постепенно накапливаются в межгалактическом пространстве. В данной работе мы ограничили свое рассмотрение только интервалом красных смещений $z \sim 2-3$. При этом учитывается влияние на спектр накопленных позитронов их комптоновского рассеяния на СМВ-фотонах. Поскольку данное рассеяние происходит в нерелятивистском (томпсоновском) режиме и,

следовательно, энергия позитрона при каждом таком рассеянии меняется незначительно, то в данной работе мы предполагаем, что данное эффект от данного рассеяния может быть описан как действие некой эффективной силы трения, тормозящей позитроны.

Список литературы

1. R. Hill, K.W. Masui, D. Scott, *Applied Spectroscopy*, v.72, p.663-688 (2018)
2. С.А. Гребенев, Р.А. Сюняев, ПАЖ т.45 с.835-865 (2019)
3. Б.А. Низамов, М.С. Пширков, ПАЖ т.49 с.322-323 (2023)

Об устойчивости орбитальной динамики кандидатов в спутники экзопланет

Мельников А. В.^{1 2}

¹ГАО РАН, ²ИПА РАН

e-mail: sunny_melnikov@mail.ru

Все планеты Солнечной системы, за исключением Меркурия и Венеры, обладают спутниками, их число у планет-гигантов составляет несколько десятков [1]. В настоящее время открыто более 6000 планет (экзопланет) у других звезд. Несомненно, что в большинстве экзопланетных систем имеются спутниковые подсистемы [2, 3]. Значительная часть экзопланет представляют собой газовые гиганты, находящиеся в области потенциальной обитаемости у родительской звезды, поэтому на спутниках экзопланет (экзолунах) могут быть условия, подходящие для существования жизни [3, 4]. Поэтому поиск и исследование динамики экзолун представляет собой хотя и трудоемкую, но важную и актуальную задачу. Активное развитие в последнее десятилетие методов наблюдений уже позволяет выявлять кандидатов в экзолуны: в работе [5] был представлен первый кандидат в экзолуны у планеты Kepler-1625b, позднее в [6] было указано на восемь планетных систем, в которых имеются признаки наличия спутников, недавно в [7] была отмечена возможность существования спутника у планеты Kepler-1708b. Использование численных методов исследования устойчивости движения (вычисление характеристических показателей Ляпунова (ХПЛ), параметра MEGNO и пр.) позволяет оценить возможность обнаружения экзолун из анализа наблюдений и получить/уточнить информацию об орбитальных и физических параметрах выявленных кандидатов в экзолуны [8]. Вековая орбитальная динамика для спутника, реально существующего в планетной системе, должна быть устойчивой. Определив для конкретной планетной системы на множествах значений орбитальных параметров предполагаемой спутниковой подсистемы границы областей ее устойчивой динамики (построив диаграммы устойчивости) можно установить возможность обнаружения экзолун при помощи современных наблюдательных средств. Отметив на диаграммах устойчивости положение обнаруженных кандидатов в экзолуны можно установить достоверность и оценить погрешность значений орбитальных параметров, полученных из анализа наблюдений. В настоящей работе развит предложенный в работе [8] метод для построения диаграмм устойчивости спутниковых подсистем экзопланет путем вычисления ХПЛ и параметра MEGNO. Для ряда планетных систем, в которых спутники

потенциально существуют или уже выявлены, построены диаграммы устойчивости и проведен их детальный анализ. Изучена вековая орбитальная динамика спутников у планет Kepler-1625b и Kepler-1708b и экзолун, потенциально существующих в восьми планетных системах, указанных в работе [6]. Для всех рассмотренных систем построены диаграммы устойчивости с существенно (в несколько раз) более высоким разрешением чем в [8], получены оценки величин ляпуновского времени (времени предсказуемой динамики) и возможных значений орбитальных параметров кандидатов в экзолуны.

Список литературы

1. Мельников А. В., Шевченко И. И., Вращательная динамика и эволюция спутников планет Солнечной и экзопланетных систем, *Астрономический вестник*, том 56, №1, 3-26, 2022.
2. Kipping D. M., Transit timing effects due to an exomoon, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 392, №1, 181-189, 2009.
3. Heller R. et al., Formation, habitability, and detection of extrasolar moons, *Astrobiology*, vol. 14, No.9, 798-835, 2014.
4. Williams D. M. et al., Habitable moons around extrasolar giant planets, *Nature*, 1997, vol. 385, №6613, 234-236, 1997.
5. Teachey A., Kipping D. M. Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b, *Science Advances*, vol. 4, Eaav1784, 2018.
6. Fox C., Wiegert P. Exomoon candidates from transit timing variations: eight Kepler systems with TTVs explainable by photometrically unseen exomoons, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 501, 2378-2393, 2021.
7. Kipping D. et al., An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b-i, *Nature Astronomy*, vol. 6, 367-380, 2022.
8. Мельников А. В., Вековая орбитальная динамика кандидатов в спутники экзопланет, *Астрономический вестник*, том 57, №4, 365-372, 2023.

Создание физической модели спутника Сатурна Энцелада с использованием данных миссии «Кассини»

Мубаракишина Р. Р.¹, Нефедьев Л.А.¹, Андреев А.О.², Нефедьев Ю.А.¹

¹КФУ

²КГЭУ

e-mail: mubarakshinaregina3@gmail.com

На сегодняшний день известно о существовании по крайней мере 146 естественных спутников Сатурна, среди них особый научный интерес представляет Энцелад, поскольку существуют свидетельства того, что данный спутник имеет на своей поверхности гейзеры [1], выбрасывающие в космическое пространство на высоту до нескольких сотен км воду в различных формах, молекулярный водород, органические соединения и другие вещества. Другой важной особенностью этого спутника Сатурна является то, что под его поверхностью, согласно современным гравиметрическим данным, находится слой жидкой воды толщиной порядка нескольких км [2]. Специфический состав выбросов и наличие слоя жидкой воды позволяют предположить, что на нижней границе последнего

сформированы условия, пригодные для существования примитивных форм жизни [3]. С морфологической точки зрения поверхность Энцелада крайне сложна, на основании фотоматериалов можно идентифицировать три наиболее характерных типа рельефа: в южной приполярной области выделяются глубокие трещины протяженностью более ста км, есть также древние области со следами многочисленных ударных событий, а третий тип поверхности – участки, характеризующиеся малой степенью кратерированности, выровненные, вероятно, вследствие высокой интенсивности внутренних геологических процессов. Традиционно такое разделение связывают с приливными воздействиями центрального тела на спутник. В нашей работе были проанализированы данные дистанционного зондирования Энцелада (ДЗЭ), полученные космической миссией Кассини-Гюйгенс [4], что позволило создать структурную модель Энцелада. Полученные результаты подтверждают комплексность структуры поверхности спутника: значительные перепады высот и разломы могут свидетельствовать о сравнительно недавнем формировании некоторых форм рельефа и эволюционном обновлении поверхности.

Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому научному фонду, грант 24-22-00260.

Ключевые слова: спутник Сатурна Энцелад, гармоническое моделирование, структурный анализ

Список литературы

1. Porco C. C., et al. Cassini Observes the Active South Pole of Enceladus // Science. – 2006. – Т. 311, № 5766. – С. 1393–1401.
2. Iess L., et al. The Gravity Field and Interior Structure of Enceladus // Science. – 2014. – Т. 344, № 6179. – С. 78–80.
3. Waite J. H., et al. Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: Evidence for hydrothermal processes // Science. – 2017. – Т. 356, № 6334. – С. 155–159.
4. Matson D. L., Spilker L. J., Lebreton J. P. The Cassini/Huygens Mission to the Saturnian System // Space Science Reviews. – 2002. – Т. 104. – С. 1–58.

Условия и механизмы роста крупномасштабного магнитного поля во внешних областях галактических дисков

Хасаева Т. Т.^{1 2}, Михайлов Е. А.^{1 3}

¹МГУ имени М. В. Ломоносова

²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

³Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН

e-mail: justanyan@yandex.ru

Существование магнитных полей в ряде спиральных галактик на данный момент не подвергается сомнению. Это подтверждает ряд наблюдаемых явлений, таких как фарадеевское вращение плоскости поляризации волн, приходящих к нам от пульсаров и других

источников. С теоретической точки зрения эволюцию таких полей часто объясняют действием механизма динамо, который связан с совместной работой альфа-эффекта и дифференциального вращения. В свою очередь, рост поля ограничен влиянием диссипативных процессов, таких как турбулентная диффузия. В том случае, если турбулентная диффузия более интенсивна, чем первые два механизма – рост поля не допускается. Возможность роста поля характеризуется с помощью динамо-числа $D = 3h^2\Omega^2 / v^2$, где h – полутолщина галактического диска, Ω – угловая скорость его вращения, v – дисперсия турбулентных скоростей [1]. Принято считать, что магнитное поле может расти при $D > 7$, что без особого труда достигается на расстояниях в пределах 10 кпк от центра таких галактик, как Млечный Путь. Возможность генерации магнитного поля на расстояниях более 10 кпк от центра является спорной, потому что действие динамо в этой области существенно ослаблено.

Более аккуратно процесс генерации крупномасштабного магнитного поля можно описать с помощью уравнения Штеенбека – Краузе – Рэдлера, являющегося результатом усреднения уравнений магнитной гидродинамики по масштабам межзвездной турбулентности. В таком случае вопрос о росте магнитного поля можно свести к задаче на собственные значения для дифференциального оператора, стоящего в правой части эволюционного уравнения для магнитного поля. В случае основной части галактики [2] данный оператор имеет собственные значения, которые имеют положительную действительную часть γ , что соответствует росту поля по закону $e^{\gamma t}$.

Нами была рассмотрена задача на собственные значения для эволюционного оператора во внешних областях галактики. Ее точное решение невозможно, поэтому мы использовали методы теории возмущений, которая хорошо известна в квантовой теории. В таком случае собственные функции и собственные значения, которые были получены раньше для основной части диска, можно рассматривать в качестве основы для построения невозмущенного решения. В настоящей работе нами получены приближенные собственные значения, соответствующие разной величине возмущений, описывающих изменение действия альфа-эффекта на большом расстоянии до центра.

В целом можно сказать, что магнитные поля вдали от центра вполне могут существовать. Решения, соответствующие растущим со временем полям, простираются на значительные расстояния от центра. Тем не менее, они достаточно быстро убывают по пространству, и имеют существенно меньшую (на порядок) величину по сравнению с внутренними областями.

Таким образом, магнитное поле на больших расстояниях от центра вполне может существовать. Тем не менее, действие крупномасштабного динамо вряд ли может быть единственным объяснением его эволюции [3]. Так, достаточно интересным представляется оценка действия мелкомасштабного динамо в этих областях, что также представляет интерес для данной работы.

Список литературы

1. Beck, R.; Brandenburg, A.; Moss, D.; Shukurov, A.; Sokoloff, D. Galactic Magnetism: Recent Developments and Perspectives // Annual Review of Astronomy and Astrophysics 1996, 34, 155-31.
2. Михайлов, Е.А.; Задачи с малым параметром и распространение фронтов в теории галактического динамо // Вестник Московского университета. Сер.3. Физика. Астрономия. 2020. №5. С.39-44.
3. Mikhailov, E.; Khasaeva, T. Eigenvalue Problem Describing Magnetorotational Instability in Outer Regions of Galaxies // Mathematics 2024, 12, 760.

Создание синтетического метода распознавания планетарных объектов на основе нейронных сетей

Андреев А. О.¹, Нефедьев Ю.А.², Колосов Ю.А.²

¹КГЭУ

²КФУ

e-mail: alexey-andreev93@mail.ru

В настоящее время все чаще при решении задач, связанных с анализом сложных природных систем, используются нейронные сети (НС) [1]. В настоящей работе проведено создание синтетического метода для обнаружения и исследования объектов на поверхности планет и их спутников. Суть синтетического метода состоит в объединении двух архитектур Mask R-CNN и (CNN) UNET. Синтетический метод позволяет как расширить существующий список исследуемых объектов, так и произвести их категорирование согласно заданным морфологическим и планетофизическим параметрам. В работах [2, 3] машинное обучение строится с использованием сверточной нейронной сети (CNN) UNET. Данный подход продемонстрировал высокую эффективность при идентификации большого количества кратеров. Вместе с тем, архитектура (Mask R-CNN) позволяет осуществлять интеллектуальную индикацию объектов с выборкой морфологических признаков. Отличие подходов состоит в следующем. 1) UNET основан на обучении системы на больших объемах данных, где признаки определяются и оптимизируются самостоятельно. В Mask R-CNN производится ввод морфологических параметров экспертами, но при этом объем обучающего материала может быть оптимизирован под конкретную задачу. 2) UNET автоматически адаптируется к разноплановым категориям данных. Например, UNET может быть применен для других планет, позволяет обнаруживать кратеры разного масштаба, включая объекты со сложной формой, которые не соответствуют классическим морфологическим критериям (например, деградировавшие вследствие эрозии кратеры или кратеры с нарушенной структурой). Mask R-CNN оперирует заранее обозначенными критериями и не выходит за их рамки. 3) Архитектура UNET способна масштабироваться для анализа больших объемов данных, способна обрабатывать изображения больших размеров и находить новые объекты в течение одной итерации. Архитектура Mask R-CNN обрабатывает каждый объект по отдельности, поэтому осуществляет выборку медленнее. 4) Система UNET автоматически определяет морфологию кратера, учитывая при этом

мелкие детали. Mask R-CNN более ориентирована на соответствие заранее заданным морфологическим признакам. Учитывая все вышесказанное, можно сделать вывод, что архитектура UNET позволяет увеличить анализируемую систему за счет включения новых объектов, в то время как Mask R-CNN может производить выборку тех объектов из всего множества, которые удовлетворяют определенным характеристикам. При этом система UNET формирует идентификационные признаки самостоятельно без надлежащего контроля, так как ориентирована именно на поиск новых кратеров, а не на выборку по определенным параметрам из уже существующего набора объектов. Таким образом, синтетический метод позволяет идентифицировать искомые объекты в два этапа. В первом случае используется архитектура UNET, на основе которой идентифицируются и находятся новые объекты, например, кратеры [4]. При выполнении второго этапа происходит выборка из полученного множества тех объектов, конкретно удовлетворяющих заранее введенным экспертом характеристикам. Данный метод был верифицирован на оптических изображениях лунной поверхности, полученных при выполнении миссии «Kaguya», и показал хорошие результаты.

Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому научному фонду, грант 24-22-00260.

Ключевые слова: нейронные сети, ударные кратеры, планетофизические параметры

Список литературы

1. Esteva A., Kuprel B., Novoa R. A. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks // *Nature*. 2017. V. 542. No. 7639. P. 115-118.
2. Silburt A., Ali-Dib M., Zhu C. Lunar crater identification via deep learning // *Icarus*. 2019. V. 317. P. 27-38.
3. Fassett C.I., Head J.W., Kadish S.J. Lunar impact basins: Stratigraphy, sequence and ages from superposed impact crater populations measured from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2012. V. 117. No. E12.
4. Head J. W. et al. Global distribution of large lunar craters: implications for resurfacing and impactor populations// *Science* 2010 329(5998):1504-7

Поиск дополнительных спектральных компонент и изломов спектра гамма-всплеска GRB 990123

Белова С. И.¹, Цветкова А.Е.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: belova.si.ioffe@mail.ru

Гамма-всплески – это яркие кратковременные вспышки мягкого гамма-излучения, сопровождающиеся огромным энерговыделением. Основные процессы, ответственные за собственное излучение гамма-всплесков, до сих пор точно не определены. В качестве одного из возможных механизмов часто рассматривают синхротронное излучение, испускаемое электронами, ускоренными на фронте релятивистской ударной волны [1].

Одним из ключевых экспериментов, предназначенных для регистрации излучения гамма-всплесков, является эксперимент Конус-Винд, успешно проводимый ФТИ им. А.Ф. Иоффе на протяжении тридцати лет. Детекторы Конуса покрывают широкий энергетический диапазон от ~ 20 кэВ до ~ 20 МэВ. Космический аппарат (КА) расположен в точке Лагранжа L1, что обеспечивает непрерывный обзор всего неба без затенений Землей в условиях стационарной фоновой обстановки [2].

ВерроSAX – итало-голландская космическая обсерватория, предназначенная для регистрации рентгеновских вспышек, а также рентгеновской составляющей излучения гамма-всплесков. На борту КА находилось несколько инструментов, среди которых были две широкоугольные камеры с кодирующей апертурой WFC (Wide Field Camera), регистрирующие излучение в диапазоне энергий от 2 кэВ до 28 кэВ. Использование детекторов такого типа позволяет довольно точно локализовать всплески, что является одним из ключевых преимуществ данного эксперимента [3].

Дополнение данных эксперимента Конус-Винд, детектирующего излучение в мягком гамма-диапазоне, данными рентгеновского телескопа WFC расширяет спектральный диапазон до 2 кэВ. Совместный анализ данных позволяет более эффективно произвести поиск дополнительных спектральных компонент и дополнительных изломов в спектре гамма-всплесков. Наблюдаемый спектр собственного излучения гамма-всплесков при наличии достаточной статистики отсчетов, как правило, может быть аппроксимирован стандартной эмпирической моделью: двумя степенными функциями с одним плавным изломом – функцией Банда [4]. В работе [5] была введена еще одна эмпирическая модель SBPL (Smoothly Broken Power Law) с изломом, соединяющим две степенные функции, которая отлична от модели Банда тем, что она позволяет изменять плавность излома. В работе [6] была представлена новая модель 2SBPL, которая включает в себя второй излом в области более низких энергий и третью степенную функцию, тем самым расширяя модель SBPL. Дополнительный излом в области более низких энергий характеризуется энергией брейка E_{break} и может быть рассмотрен как свидетельство в пользу синхротронной природы излучения гамма-всплесков, так как его можно идентифицировать с синхротронной частотой остывания ν_{cool} . Популяция высокоэнергетических электронов, охлаждающихся за счет синхротронного излучения, имеет распределение $N(\gamma) \propto \gamma^{-2}$ и фотонный индекс синхротронного спектра α_2^{syn} , равный $-3/2$. В случае, когда электроны охлаждаются не полностью, спектр обрезается на некоторой энергии, соответствующей частоте ν_{cool} , и в области ниже этой энергии фотонный индекс α_1^{syn} будет равен $-2/3$.

В настоящей работе представлены результаты совместного спектрального анализа гамма-всплеска GRB 990123 ($z = 1.60$ [7]), известного своим экстремальным энерговыделением ($\sim 10^{54}$ эрг [7]), по данным экспериментов Конус-Винд и ВерроSAX/WFC. GRB 990123 примечателен тем, что является первым гамма-всплеском, собственное излучение которого было зарегистрировано сразу в нескольких диапазонах: гамма-, рентгеновском и оптическом. Спектральный анализ проводился с применением моделей Банда, SBPL и

2SBPL. Помимо этого была протестирована модель SBPL с добавлением чернотельной компоненты в целях выявления наличия тепловой части в спектрах гамма-всплесков. По результатам аппроксимации пиковых спектров моделью 2SBPL можно сказать, что полученные значения фотонных индексов α_1 ($\langle \alpha_1 \rangle = -0.66^{+0.04}_{-0.04}$) и α_2 ($\langle \alpha_2 \rangle = -1.53^{+0.15}_{-0.14}$) хорошо согласуются со значениями индексов спектра, ожидаемого от синхротронного излучения популяции релятивистских электронов в режиме быстрого остывания. Средние значения энергии брейка и пиковой энергии равны $\langle E_{\text{break}} \rangle = 300^{+52}_{-56}$ кэВ и $\langle E_{\text{peak}} \rangle = 1189^{+389}_{-247}$ кэВ.

Список литературы

1. Zhang B. The physics of gamma-ray bursts. – Cambridge University Press, 2019.
2. Aptekar R. L. et al. Konus-W gamma-ray burst experiment for the GGS Wind Spacecraft //Space Science Reviews. – 1995. – Т. 71. – С. 265-272.
3. Jager R. et al. The wide field cameras onboard the BeppoSAX X-ray astronomy satellite //Astronomy and Astrophysics Supplement Series. – 1997. – Т. 125. – №. 3. – С. 557-572.
4. Band D. et al. BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I-Spectral diversity //Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 413, no. 1, p. 281-292. – 1993. – Т. 413. – С. 281-292.
5. Kaneko Y. et al. The complete spectral catalog of bright BATSE gamma-ray bursts //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2006. – Т. 166. – №. 1. – С. 298.
6. Ravasio M. E. et al. Consistency with synchrotron emission in the bright GRB 160625B observed by Fermi //Astronomy & Astrophysics. – 2018. – Т. 613. – С. A16.
7. Tsvetkova A. et al. The Konus-wind catalog of gamma-ray bursts with known redshifts. I. Bursts detected in the triggered mode //The Astrophysical Journal. – 2017. – Т. 850. – №. 2. – С. 161.

Орбитальная эволюция околоземных астероидов, связанных с метеороидным потоком April chi-Librids

Сергиенко М. В.¹, Нефедьев Ю.А.¹, Андреев А.О.²

¹КФУ

e-mail: star1955@mail.ru

Исследование малых тел Солнечной системы, а именно астероидов, комет, метеороидов и метеороидных потоков, является крайне актуальным направлением в современной астрономии и планетологии. Поскольку эти объекты представляют собой остатки материала, из которого формировалась Солнечная система, их изучение позволяет ответить на фундаментальные вопросы о происхождении и эволюции нашей планетной системы [1].

Наш поход к идентификации связей между малыми небесными телами основывается на следующей концепции: некоторые объекты, наблюдающиеся в настоящее время, например, околоземные астероиды, являются угасшими кометными ядрами или их осколками [2]. Угасшие кометы могут быть источниками метеороидных потоков, даже если они в данный момент не проявляют кометную активность. Данное явление возможно, так как

ранее они имели кометную активность и выбросили значительное количество материала, который остался сосредоточенным вдоль орбиты.

Нами с помощью модернизированного авторского синтетического метода [3], который был уточнен за счет включения метрик Холшевникова [4], был исследован малый метеороидный поток April chi-Librids (XLI). На основании идентификации метеороидного потока April chi-Librids с околоземными астероидами группы Аполлоны было установлено, что данный поток имеет родственные связи с четырьмя околоземными астероидами – 2013 WM, 2015 DU180, 2011 BT59, 2013 YC. Предварительный анализ показал, что отождествленная с метеороидным потоком April chi-Librids группа родительских тел имеет связь внутри отождествленной группы. Предварительный анализ проводился с использованием независимых критериев Саутворта-Хоккинса и Ашера, значения данных критериев лежат в интервале от 0.03 до 0.23, что указывает на связь между объектами внутри группы отождествленных родительских тел. Другим критерием для проверки являлись значения постоянной Тиссерана относительно Юпитера. Эти значения для астероидов, отождествленных с потоком April chi-Librids, лежат в интервале от 2.5 до 3, что указывает на движение данных астероидов по орбитам кометной и переходной природы. Диаметры и альбедо для отождествленных астероидов неизвестны, поэтому было проведено дополнительное вычисление эквивалентного диаметра по трем значениям альбедо для темного, светлого и яркого объекта. Анализ вычисленных данных показал, что значения эквивалентного диаметра при указанных параметрах альбедо лежат в интервале от 0.14 км до 0.37 км, что может свидетельствовать о том, что эти астероиды являются фрагментами распавшегося ранее кометного тела.

Для более детального исследования астероидов, входящих в группу родительских тел для метеороидного потока April chi-Librids, было произведено исследование их орбитальной эволюции на длительные интервалы времени. Интегрирование орбит астероидов было произведено вперед и назад на 100000 лет с учетом возмущений от планет, Солнца и влияния эффекта Ярковского. Использовалась авторская программа, написанная на языке Python с привлечением библиотеки REBOUND, так как последняя позволяет моделировать гравитационные взаимодействия в Солнечной системе и учитывать влияние дополнительных сил, таких как эффект Ярковского. Изначально поводилась инициализация симуляции – была создана симуляция с Солнцем и астероидом, а также добавлены планеты Солнечной системы. Был учтен эффект Ярковского, он был реализован в модели упрощенного вида. Данный эффект добавляет небольшое ускорение астероиду. Для каждого исследуемого астероида были построены и проанализированы графики всех орбитальных элементов в зависимости от времени.

Список литературы

1. Vaubaillon J., Ye Q.-Z., Egal A., Sato M. and Moser D. E. A new meteor shower from comet 46P/Wirtanen expected in December 2023// *Astronomy & Astrophysics*. 2023. Vol. 680. L10.
2. Kokhirova G.I., Babadzhanov P.B. Current Knowledge of Objects Approaching the Earth // *Solar System Research*. 2023. V. 57. Issue 5. P. 467-485.

3. Sergienko M.V., Andreev A.O., Nefedyev Y.A. The Andromedid meteor shower and its genetic relationships with asteroids // *Meteoritics & Planetary Science*. 2023. Vol. 58/1. P. 6200.
4. Sergienko M.V., Andreev A.O., Nefedyev Y.A. The modernized synthetic method for searching connections between Near-Earth objects // *LPI Contributions*. 2024. No. 3036. P. 6137.

Анализ субсекундной структуры рентгеновских и радиовсплесков в солнечных вспышках

Шабалин А. Н.¹, Чариков Ю.Е.¹, Складорова Е.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: lisi@ya.ru

Солнечные вспышки являются одними из наиболее мощных и сложных проявлений активности Солнца, однако физические механизмы высвобождения энергии и процессы ускорения частиц в них остаются недостаточно изученными. Особый интерес представляет мелкомасштабная структура вспышечного излучения в форме субсекундных импульсов (спайков), наблюдаемых в рентгеновском и радио-диапазонах. Совместные исследования тонкой временной структуры излучения позволяют получить важную информацию о фундаментальных процессах в плазме вспышек и открывают перспективы для разработки новых методов ее диагностики.

Настоящая работа посвящена комплексному анализу субсекундных всплесков рентгеновского и радиоизлучения, зарегистрированных на различных стадиях солнечных вспышек. В исследовании использовались результаты совместных наблюдений космических обсерваторий (RHESSI, FERMI, BATSE, Yohkoh) и наземных радиоастрономических комплексов (NoRH, NoRP). Полученные результаты сопоставлялись с теоретическими расчетами на основе численного моделирования процессов генерации спайков. Цель исследования – разработать и апробировать методики диагностики параметров вспышечной плазмы и характеристик ускоренных частиц на ранних этапах вспышечного процесса.

В ходе исследования были детально изучены временные, спектральные и пространственные характеристики субсекундных рентгеновских и радио всплесков на примере серии солнечных вспышек. Были выявлены корреляции между рентгеновскими и радиовсплесками, а также их связи с другими проявлениями вспышечной активности. На основе выполненного анализа предложены новые диагностические подходы к определению физических параметров вспышечной плазмы и характеристик популяции ускоренных электронов, основанные на наблюдаемых свойствах субсекундных всплесков.

Нагрев и разрушение пористого поверхностного слоя кометного ядра

Быков Н. Ю.¹, Андреева Т.А.¹, Захаров В.В.^{2,1}, Лукин А.Я.¹, Шмыр Д.С.¹

¹СПбПУ Петра Великого

²LIRA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon, France

e-mail: nbykov2006@yandex.ru

Исследования комет представляют значительный научный интерес, расширяя наши представления о процессах формирования Солнечной системы. Несмотря на успехи в данной области [1], остаются слабоизученными вопросы, связанные со структурой приповерхностного слоя кометного ядра и механизмами образования газопылевых течений в окрестности ядра (коме). Такая ситуация связана с отсутствием непосредственных измерений с достаточным разрешением и, соответственно, с необходимостью проводить исследования опосредовано. Последнее предполагает разработку сложной самосогласованной физико-математической модели, включающей большое число физических процессов и настройку управляющих параметров по данным имеющихся разнородных наблюдений. Модель включает описание процессов нагрева, сублимации и разрушения поверхностного слоя, а также газодинамики многофазного течения. Следует отметить, что решение такой задачи представляет и прикладной интерес, так как элементы модели и результаты анализа могут использоваться в инженерных приложениях для оценки параметров пористых сред, подвергающихся тепловому воздействию, и параметров пылевых потоков в задачах внутренней и внешней аэродинамики.

Целью настоящей работы является (1) формулировка математической модели прогрева пористого приповерхностного слоя кометного ядра под действием солнечного излучения с учетом процессов объемной сублимации летучих компонентов и их диффузии; (2) исследование распределения давления газовой фазы внутри слоя и возможности его разрушения. Модель основывается на применении законов сохранения в форме дифференциальных уравнений в частных производных. К особенностям модели относится включение в рассмотрение внутри поверхностного слоя микрополостей (пор) изначально изолированных и открывающихся в процессе эволюции поверхностного слоя по мере сублимации льдов. Таким образом, модель описывает как приповерхностный слой с открытыми порами и сублимирующими льдами, так и внутреннее пространство ядра кометы с закрытыми порами, а также область перехода между ними. Структура пористой среды описывается в общем виде с помощью объемных долей компонентов (имеются данные наблюдений) и удельной поверхности (может быть определена сравнением результатов расчетов по модели с данными наблюдений).

С использованием разработанной модели выполнены численные исследования процессов нагрева и разрушения поверхностного слоя сферического вращающегося ядра. В результате расчетов получены данные о динамике прогрева кометного ядра, в том числе движения границы “сухого” слоя, а также о распределении давлений летучих компонентов

внутри слоя. Показана возможность достижения давлений газа внутри пористого слоя, превосходящих пороговые значения, необходимые для разрушения слоя.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 24-12-00299, <https://rscf.ru/project/24-12-00299/> при использовании вычислительного ресурса СКЦ СПбПУ Петра Великого.

Список литературы

1. Thomas N., 2020, An Introduction to Comets; Post-Rosetta Perspectives, doi:10.1007/978-3-030-50574-5.

Моделирование транспорта космического излучения с учетом влияния плазменных и гравитационных неоднородностей

Лукьянцев Д. С.¹, Афанасьев Н.Т.¹, Танаев А.Б.¹

¹ИГУ

e-mail: cmeofs1997@mail.ru

В докладе представлены результаты математического моделирования особенностей транспорта электромагнитного излучения космических источников в поле тяготения группы астрофизических объектов с учетом окружающей хаотической плазмы и локализованного гравитационного шума. На основе лучевого приближения и теории возмущений предложен аппарат численно-аналитического моделирования направления распространения, групповой задержки и пространственного ослабления потока излучения различных частотных диапазонов. Хаотические неоднородности космической плазмы заданы моделью пространственной корреляционной функции показателя преломления. Задача распространения излучения в искривленном (римановом) пространстве сведена к задаче в евклидовом пространстве путем введения эффективного показателя преломления вакуума, выраженного через потенциал тяготения [1]. Основу аппарата численно-аналитического моделирования составляет приближенное решение стохастических дифференциальных уравнений Лагранжа-Эйлера, полученных из вариационного принципа Ферма. Для описания рефракционных свойств вакуума в присутствии группы массивных объектов используется фундаментальный принцип суперпозиции гравитационных полей и введена приближенная аддитивная модель показателя преломления, выраженного через гравитационные потенциалы объектов. В качестве модели гравитационного шума использованы представления о пространственной функции корреляции неоднородностей эффективного показателя преломления вакуума.

Для различных конфигураций гравитационного поля группы объектов проведено моделирование рефракционных характеристик электромагнитного излучения. Результаты расчетов представлены в картинной плоскости наблюдателя. Приведены примеры стохастического замыкания эффектов гравитационного линзирования в зависимости от параметров окружающей хаотической плазмы и пространственной локализации области гравитационного шума. Предложенный аппарат моделирования рефракционных характеристик

электромагнитного излучения можно использовать для интерпретации экспериментальных данных, в том числе при изучении объектов невидимых в электромагнитном диапазоне, но проявляющих себя через гравитационное взаимодействие [2]. Задавая различные конфигурации систем астрофизических объектов с соответствующими пространственными масштабами, можно синтезировать различные лучевые структуры в картинной плоскости наблюдателя, которые позволят идентифицировать скрытые массивные объекты в натуральных экспериментах [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации (тема госзаданий FZZE-2023-0004, FZZE-2024-0005).

Список литературы

1. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж., Гравитация. Т.1, М.: Мир, 1997, 480 с.
2. Захаров А. Ф., Гравитационные линзы и микролинзы, М.: Янус-К, 1997, 328 с.
3. Многоканальная астрономия, ред.-сост. Черепашук А. М., Фрязино: Век 2, 2019, 528 с.

Результаты наблюдения туманности Бумеранг с помощью установки TAIGA-HiSCORE

Самолига В. С.¹

¹ИГУ

e-mail: vladimir.samoliga@yandex.ru

Одним из важных направлений астрофизики является поиск ускорителей космических лучей, так называемых ПэВатронов, путём регистрации их гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ. Поиск и исследование таких источников ведется, в том числе, с помощью черенковской установки TAIGA-HiSCORE астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy). Это массив из распределенных на площади 1,1 км² 120 детекторов, регистрирующих черенковское излучение широких атмосферных ливней (ШАЛ). Детекторы представляют собой широкоугольные оптические станции с четырьмя фотоэлектронными умножителями, оснащёнными концентраторами света — конусами Уинстона с характерным углом 30°.

Комплекс TAIGA расположен на широте 51.8°с. ш. Оптические станции установки TAIGA-HiSCORE могут иметь два рабочих положения: в направлении на 25° на юг, либо в зенит (0°). Наклон на юг требуется для наблюдения Крабовидной туманности, имеющей склонение +22° 00' 52.1", и других источников со склонениями $\sim +2^\circ \div +52^\circ$. Вертикальное положение позволяет наблюдать небо в диапазоне склонений $\sim +27^\circ \div +77^\circ$. По данным эксперимента LHAASO [1] в этом диапазоне существует несколько источников гамма-излучения с энергиями выше 100 ТэВ. Особый интерес представляет остаток сверхновой в области туманности Бумеранг, который имеет склонение +61° 10' 00". С учётом площади установки TAIGA-HiSCORE в ~ 1 км² и работы в безлунные ночи источник в туманности

Бумеранг можно наблюдать до 436 часов в год и регистрировать до 50 гамма-квантов в год с энергиями выше 100 ТэВ.

Поток гамма-квантов чрезвычайно мал по сравнению с фоновым адронным космическим излучением. Поэтому для выделения сигнала важно правильно оценивать фон. В работе [2] описаны четыре метода оценки фона при работе с данными установок наземной гамма-астрономии. Чувствительность установок может иметь пространственную и временную зависимость, что затрудняет оценку фона и ограничивает применимость некоторых методов. Так, в работе [3] было показано влияние погодных условий во время измерений на оценку значимости сигнала.

В настоящей работе на основе экспериментальных данных за 2022 — 2024 гг. проводится построение карты значимости сигнала в окрестности туманности Бумеранг с применением метода окружающего окна, который устойчив к вариациям угловой чувствительности установки.

Список литературы

1. Zhen Cao et al. (LHAASO collaboration), *ApJS* **271**, p. 25 (2024). DOI: 10.3847/1538-4365/acfd29
2. Yan-Jin Wang et al. (LHAASO collaboration) *JINST* **17**, p. 12003 (2022). DOI 10.1088/1748-0221/17/12/P12003
3. В.С. Самолига. *ЖТФ* **93** (12), с. 1787 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2023.12.56822.f215-23

Анализ вспышечной активности мазеров H_2O в молекулярном облаке DR21ОН

Лапин Н. И.¹, Лапинов А.В.², Киселев А.К.¹, Толмачёв А.М.³, Трофимова Е.А.²

¹НГПУ им. К. Минина

²Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН

³АКЦ ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН

e-mail: lapin_ni@mininuniver.ru

В ходе программы по измерениям характеристик антенны и точности коррекции антенных температур за поглощение атмосферы на длине волны 1.35 см. на Пушинской радиоастрономической обсерватории Астрокосмического центра ФИАН им. П.Н. Лебедева (РТ-22 ПРАО) в период 2023-2024 годов были обнаружены вспышки мазеров H_2O в области звездообразования DR21ОН.

Методика наблюдений состояла в том, что в качестве калибровочного объекта был выбран источник DR21 в области звездообразования Лебедь X. Выбор этого источника на РТ-22 обусловлен несколькими факторами. Во-первых, этот источник является хорошо изученным, спектральная плотность излучения в континууме которого на частоте 22.231 ГГц составляет 19.2 Ян., во-вторых, источник является точечным для наблюдений на РТ-22 (диаграмма направленности РТ-22 составляет $150''$), в-третьих, этот источник является

незаходящим для наблюдений на РТ-22. К выделенным преимуществам следует отнести, что данный объект наблюдается в Пущине на протяжении долгого времени, например, в 2019 году [1]. Это связано с наблюдениями двух областей звездообразования, расположенных рядом с DR21, W75S и W75N. W75N – молекулярное облако с сильным мазерным излучением в линии H_2O , на основе которого удобно проводить юстировку наведения телескопа.

В июле 2023 года при наблюдениях на РТ-22 была обнаружена вспышка в области звездообразования DR21ОН. Данное событие было странным, потому что во время наблюдений 2019 года и ранее, подобных вспышек не наблюдалось. Обратившись к архивам, мазерную линию воды на фоне DR21 наблюдали в 21.02.1977 в Эффесберге и никогда ранее. Подробнее о вспышке в июле 2023 года изложено в работе [2].

После обнаружения вспышки в июле 2023 года, наблюдения данной области продолжились 2023 и 2024 и продолжаются в 2025 годах. За это время вспышка мазерного излучения воды в области звездообразования DR21ОН наблюдалась в ноябре 2024 года.

Как показали наблюдения DR21ОН является сильно переменным источником в линии H_2O на 22 ГГц с довольно непредсказуемым характером.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00227, <https://rscf.ru/project/23-22-00227>

Список литературы

1. Лапинов А.В., Толмачев А.М., Лапин Н.И., Киселев А.К., Чалова А.В., Исследование параметров рт-22 прао акц фиан на длине волны 1.35 см Труды XXIII научной конференции по радиофизике, Н.Новгород, ННГУ, 151-154, (2019).
2. Лапинов А.В., Толмачёв А.М., Киселёв А.К., Лапин Н.И., Лапинова С.А., Старцева И.А., Логинова А.С. О вспышечной активности мазера H_2O В DR21ОН // Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. - 2024. - Т. 50. - №1. - С. 82-89. doi: 10.31857/S0320010824010069

Влияние распадов тяжелых стерильных нейтрино на наблюдаемый первичный химический состав вселенной

Киреев А. О.¹, Куричин О.А.², Иванчик А.В.²

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: antosha.kireev.1995@mail.ru

Стандартная ΛCDM космологическая модель описывает эволюцию Вселенной на всех ее стадиях, и многие космологические явления, такие как, например, анизотропия реликтового излучения или ускоренное расширение Вселенной в нашу эпоху, могут быть самосогласованно объяснены с помощью этой модели. Первичный Нуклеосинтез — процесс синтеза легчайших химических элементов, происходивший в первые моменты жизни Вселенной — также описывается ΛCDM моделью, и теоретические предсказания

распространённости первичного D и ${}^4\text{He}$ хорошо согласуются с наблюдаемыми оценками этих параметров [1]. Однако, распространённость первичного ${}^7\text{Li}$ не согласуется с теоретическим предсказанием на уровне $\sim 4\sigma$. Так, теоретическое предсказание ΛCDM модели, полученное с помощью кодов первичного нуклеосинтеза, дает значение ${}^7\text{Li}/\text{H} = (4.7 \pm 0.7) \times 10^{-10}$ [2], в то время как наблюдаемая распространённость первичного лития, определяемая по низкометаллическим старым звездам II поколения, дает значение ${}^7\text{Li}/\text{H} = (1.6 \pm 0.3) \times 10^{-10}$ [3, 4]. Это рассогласование называется «литиевой проблемой», и является одной из важнейших проблем современной космологии.

В данной работе рассматривается потенциальная возможность решения литиевой проблемы и предлагается способ, позволяющий согласовать наблюдаемые значения первичных распространённости с теоретическими предсказаниями. Согласования можно достичь путем расширения ΛCDM модели введением в нее тяжелых стерильных нейтрино, и последующим решением задачи о фоторазрушении первичных ядер фотонным фоном, образующимся в результате распадов таких нейтрино. Стерильные нейтрино - это правые фермионы, не заряженные по калибровочной группе стандартной модели, и взаимодействующие только гравитационно. Введение стерильных нейтрино в Стандартную Модель и в стандартную космологическую модель (так называемая минимальная нейтринная стандартная модель νMSM) - это одна из наиболее перспективных возможностей объяснить целый ряд явлений, которые на данный момент не находят объяснения. К ним относятся проблема генерации масс нейтрино, проблема темной материи, лептонная и барионная асимметрии Вселенной и т.д. [5]. Недавние эксперименты с нейтринными осцилляциями [6, 7] указывают на возможность существования легкого стерильного нейтрино с достаточно большим углом смешивания. В случае, если такое легкое стерильное нейтрино существует - это является указанием и на существование и более тяжелых стерильных сортов, которые нужны для реализации механизма качелей и генерации масс всех активных сортов нейтрино [8].

Стерильные нейтрино являются массивными частицами, и поэтому они нестабильны, и могут распадаться на другие частицы Стандартной Модели [9]. Основные каналы распада - это распад на 3 активных нейтрино или распад на 1 активное нейтрино и 1 фотон [10]. При достаточной массе стерильного нейтрино энергии такого фотона может хватить для эффективного фоторазрушения ядер первичных элементов, в первую очередь дейтерия, обладающего энергией связи 2.2 МэВ. Это может приводить к тому, что распространённость D/H, определяемая из анализа абсорбционных систем с $z \sim 2-3$ в спектрах квазаров, и используемая в качестве наблюдаемой оценки распространённости первичного дейтерия, в реальности может быть ниже, чем распространённость, получаемая на «выходе» из Первичного Нуклеосинтеза. Важным требованием при этом является достаточно «быстрый» распад тяжелых стерильных нейтрино - создаваемый в результате распадов фон фотонов должен быть достаточным для разрушения ядер дейтерия после окончания Первичного Нуклеосинтеза, но при этом он должен успеть прийти в равновесие с реликтовым излучением до момента Первичной Рекомбинации, чтобы не возникало противоречия с наблюдаемым спектром CMB.

Эти условия накладывают достаточно жесткие ограничения на диапазоны масс и углов смешивания тяжелых стерильных нейтрино. Данное исследование посвящено определению допустимых диапазонов этих параметров, а также получению теоретических оценок на распространенности первичных химических элементов.

Список литературы

1. Navas, S., et al. (Particle Data Group). Phys. Rev. D, 2024, 110, 030001
2. Fields, B., et al. JCAP, 2020, 3, 10
3. Ryan, S., et al. ApJ, 2000, 530, L57–L60
4. Sbordone, L., et al. A&A, 2010, 522, A26
5. Ivanchik, A., et al. Universe, 2024, 10(4), 169
6. Serebrov, A., et al. Phys. Rev. D, 2021, 104, 032003
7. Barinov, V., et al. Phys. Rev. Lett, 2022, 128, 232501
8. Gorbunov, D. Phys. Uspekhi, 2014, 57, 503–511
9. Shrock, R. Phys. Rev. D, 1982, 25, 3
10. Gorbunov, D., et al. JHEP, 2007, 10, 015

Моделирование ускорения частиц и античастиц пульсарной туманностью в замагниченной среде

Петров А. Е.¹, Быков А.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: a.e.petrov@mail.ioffe.ru

Релятивистские ветры, испускаемые пульсарами, сталкиваясь с внешней средой, формируют сложную структуру истечений, позволяющую ускорять заряженные частицы и античастицы до высоких энергий порядка тераэлектронвольта и выше. Сильное крупномасштабное магнитное поле как самих пульсарных ветров, так и внешней среды, может существенно влиять на структуру течений производимых ветрами пульсарных туманностей (ПТ) и ускорение частиц ими. Релятивистское магнитогидродинамическое (РМГД) моделирование показало, что взаимодействие пульсарного ветра с сильнозамагниченным внешним потоком приводит к необычной форме ПТ, вытягивающейся вдоль локального направления крупномасштабного магнитного поля [1]. Амплитуда магнитного поля ветра массивной звезды в ярких в гамма-лучах двойных системах с пульсарами может достигать нескольких Гаусс, что подтверждается как наблюдениями самих массивных звезд [2], так и анализом многоволновых спектров этих систем. Гауссовая амплитуда магнитного поля при характерных параметрах звездных ветров приводит к указанной анизотропии структуры течений и позволяет ускорить частицы до петаэлектронвольтных энергий [1], что позволяет объяснять наблюдаемые наземными черенковскими телескопами (например, LHAASO) и нейтринными гигатонными обсерваториями (IceCube, Baikal-GVD) галактические фотоны и нейтрино энергий выше 100 ТэВ. Сильное крупномасштабное поле в окрестности ближайших к Земле пульсаров может влиять на ускорение ими заряженных частиц и античастиц, а также на диффузию последних в локальной межзвездной среде, как следствие – и на наблюдаемую обсерваторией AMS-02 амплитуду спектров

античастиц [3]. Для того, чтобы оценить вероятный вклад известных ярких в гамма-лучах двойных систем в наблюдаемые суб-петаэлектронвольтные вспышки и вклад ближайших пульсаров в околоземные потоки античастиц, необходимо провести детальное кинетическое моделирование процессов ускорения частиц этими объектами, с учетом влияния сильного крупномасштабного магнитного поля как на структуру течений, так и на диффузию частиц. В докладе будут приведены результаты РМГД моделирования структуры течений описанных объектов и кинетического моделирования ускорения ими частиц и даны оценки на наблюдаемые потоки производимых ими фотонов, нейтрино и античастиц.

Поддержка: грант Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (No. 24-1-3-28-1)

Список литературы

1. Bykov A. M., Petrov A. E., Ponomaryov G. A. et al., PeV proton acceleration in gamma-ray binaries, *Advances in Space Research*, Vol. 74, Issue 9, P. 4276-4289, 2024
2. Shultz M. E., Wade G. A., Rivinius T. et al., The magnetic early B-type stars- III. A main-sequence magnetic, rotational, and magnetospheric biography, *MNRAS*, Vol. 490, Issue 1, P. 274–295, 2019
3. Bykov A. M., Petrov A. E., Krassilchchikov A. M. et al., GeV-TeV Cosmic-Ray Leptons in the Solar System from the Bow Shock Wind Nebula of the Nearest Millisecond Pulsar J0437-4715, *ApJL*, Vol. 876, Issue 1, article id. L8, 2019

Разработка метода анализа данных лазерной локации Луны

Загидуллин А. А.¹, Нефедьев Ю.А.¹, Петрова Н.К.¹, Jiangau Yan²

¹КФУ

² Уханьский университет

e-mail: star1955@yandex.ru

Работа посвящена разработке метода анализа современных наблюдений лазерной локации Луны (ЛЛЛ). Рассмотрены основные элементы алгоритма редукции ЛЛЛ, поскольку обработка массива таких наблюдений требует учета большого количества факторов, которые можно найти в основном в моделях IERS и в программном комплексе SOFA. Приводится описание особенностей вычислительного процесса с определением собственных остаточных разностей, а также взаимосвязь теоретического построения вращения Луны с ЛЛЛ с целью получения новых планетофизических данных. Первое, что нужно отметить, что при редукции ЛЛЛ [1] основной наблюдаемой величиной является время регистрации и излучения сигнала лазерным дальномером. Таким образом, взаимосвязь наблюдений с теорией вращения Луны осуществляется через решение обратной задачи. При обработке данных ЛЛЛ нужно принимать во внимание тот факт, что за время распространения сигнала от лазера, уголкового отражатель, находящийся на Луне, и лазерный дальномер, находящийся на поверхности Земли, изменяют свое положение в пространстве из-за

движения Земли и Луны [2, 3]. Также нужно исследовать много других факторов влияющих на движение небесных тел: знать точные эфемериды небесных тел (как минимум для твердотельной модели), знать модели расчета приливных сил, учесть, что будет происходить отклонение светового луча за счет искривления пространства-времени между Землей и Луной и по мере прохождения сигнала через атмосферу Земли будет образовываться временная задержка [4]. Все это делает задачу по разработке метода обработки данных лазерной локации Луны достаточно сложной даже до этапов решения обратной задачи и процесса моделирования влияния внешних эффектов.

Список литературы

1. Pavlov D.A., Williams J.G., Suvorkin V.V. Determining parameters of Moon's orbital and rotational motion from LLR observations using GRAIL and IERS – recommended models// *Celest Mech Dyn Astr* 126, 61-88 (2016)
2. Williams J.-P., Bandfield J. L., Paige D. A. et al. Lunar Cold Spots and Crater Production on the Moon// *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123, 2380–2392 (2018)
3. Petrova N. K., Nefedyev Y. A., Andreev A. O. and Zagidullin A. A., Lunar-Based Measurements of the Moon's Physical Libration: Methods and Accuracy Estimates// *Astronomy Reports*. 64 1078–1086 (2020).
4. Zhang M., Müller J. and Biskupek L. Advantages of combining Lunar Laser Ranging and Differential Lunar Laser Ranging// *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 681, Article Number A5 (2024)

Исследование динамики осцилляций световой кривой гамма-всплеска GRB240825A

Дмитриев П. Б.¹, Драневич В.А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Свободный исследователь, г. Санкт-Петербург, ул. Хошимина, 13/1, 361

e-mail: paul.dmitriyev@mail.ru

Согласно циркуляру №37274 GCN (General Coordinate Network), гамма всплеск GRB240825A был зарегистрирован телескопом BAT (Burst Alert Telescope), установленном на космическом аппарате Swift, 25 августа 2024 года в 15^h 52^m59^s UT. Всплеск был очень яркий, поток излучения в максимуме в диапазоне энергии от 15 до 350 кэВ составил ~160000 фотонов/с. Длительность события в этом энергетическом диапазоне, оцененная авторами наблюдения, составила 57.2 секунды, в то время как его «яркая», интенсивная часть, состоящая из серии последовательных пиков, имела продолжительность всего около 10 с. Источник излучения находился на космологическом расстоянии $Z=0.659$. Все эти данные говорят о том, что гамма-всплеск GRB240825A относится к длинным и интенсивным гамма-всплескам. Отличительной особенностью некоторых таких гамма-всплесков является наличие квазипериодических компонентов во временной структуре световой кривой с периодами порядка одной секунды.

Поэтому в данной работе был проведен анализ световой кривой GRB240825A, данные которой по четырем энергетическим каналам: 15-25, 25-50, 50-100 и 100-350 кэВ; были взяты с сервера NASA по адресу [1]. На основе этих данных была вычислена интегральная кривая блеска события в полном диапазоне энергии 15-350 кэВ. Временное разрешение полученного ряда составило 0.064 с. Исследование временной структуры данного ряда проводилось при помощи анализа эволюции выборочной оценки нормированной спектральной плотности сигнала, построенной в «скользящем временном окне» длиной 5.824 с и 7.744 с. Анализировалась запись сигнала гамма телескопа в течение 35 с до всплеска, во время интенсивной части самого всплеска (14 с) и в течение 33 с после его активной фазы. Общая длина обработанной выборки из исходных данных составила 82 с. Было обнаружено, что на световой кривой во время всплеска присутствуют квазипериодические колебания с периодами: 0.384 с, 0.768 с, 1.224 с и 1.536 с. Эти колебания отсутствуют до всплеска и исчезают после его активной фазы. Наиболее примечательной деталью спектра является колебание со средним периодом 1.536 с, которое существует в течение всего события, причем в течение всплеска период данного колебания периодически изменяется от 1.472 с до 1.6 с, а период этого изменения составляет в среднем те же самые 1.536 с. Такое поведение изменения периода обнаруженного колебания можно рассматривать как некую разновидность частотной модуляции.

По современным представлениям некоторые гамма-всплески появляются на конечной стадии эволюции тесной двойной системы, состоящей из двух звезд, сильно различающихся по массе. Масса центрального «компонента» может составлять 20 - 30 солнечных масс, а «орбитального» намного меньше. Исходя из этого предположения, наблюдаемую модуляцию периода 1.536 с, вероятно, можно объяснить релятивистским эффектом Доплера при быстром орбитальном движении более легкого компонента тесной двойной системы вокруг массивного центрального. Основываясь на этом предположении, в классическом приближении была проведена оценка скорости орбитального движения излучающего компонента и массы центрального объекта.

Список литературы

1. NASA's HEASARC: [Электронный ресурс]. URL: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/swift/data/obs/2024_08/01250617000/bat/rate/sw01250617000brtms.lc.gz. (Дата обращения: 04.09.2024)

Оценка изменения функционального состояния человека с помощью методики критической частоты слияния мельканий: особенности светового воздействия и видов нагрузки

Терехин С. Г.¹, Власова О.Л.¹, Черняков А.Е.², Забродская Я.А.^{1,3}, Аладов А.В.².

¹СПбПУ, ²НТЦ Микроэлектроники РАН, ³ФГБУ «НИИ гриппа им. А.А. Смородинцева» Минздрава России

e-mail: Stasok32@yandex.ru

Практическое применение методов экспресс-диагностики функционального состояния (ФС) человека предъявляет особенно серьезные требования к чувствительности и длительности используемой методики. Среди них выделяется дигаммакопическая методика измерения критической частоты слияния мельканий (КЧСМ), сочетающая в себе высокую информативность с быстротой выполнения. Этот подход оценивает ФС, анализируя динамику КЧСМ в ответ на цветное импульсное воздействие ступенчато нарастающей интенсивности, которая позволяет определить степень утомляемости центральной нервной системы, и соответственно, работоспособности человека [1]. Регуляция ФС происходит во время вовлечения в конкретный вид деятельности для наибольшей эффективности её выполнения и таким образом, на практике оценка ФС не может осуществляться в отрыве от учета характера активности, таких как: выполнение монотонной однотипной работы, высокая интеллектуальная нагрузка, напряженный зрительный контроль и другие виды.

В настоящей работе проведено исследование ФС группы добровольцев с помощью методики КЧСМ при монотонной интеллектуальной нагрузке в формате специально сформированного блока тестовых заданий на основе IQ-тестов, и игровой в формате игры-головоломки, в сравнении с контрольными значениями без нагрузок [2]. В работе приняли участие 11 испытуемых в возрасте от 18 до 26 лет. Тестирование проводилось с помощью опытного образца прибора экспресс-диагностики функциональных состояний человека (ПЭДФС) [3]. Исследовалась реакция на предъявление цветного воздействия в традиционных для КЧСМ двух спектральных областях: зеленый ($I_{peak} = 520$ нм), красный ($I_{peak} = 625$ нм), относительная чувствительность которых составляет 0.65 и 0.3 соответственно, согласно кривой светочувствительности глаза. Для повышения достоверности и чувствительности методики в нашем эксперименте также был добавлен и синий свет ($I_{peak} = 460$ нм), имеющий существенно меньшую относительную чувствительность для глаз (0.1).

Измерение КЧСМ проводилось на четырех последовательных ступенях интенсивности световых импульсов, площадь светового пятна составила 10 пикселей, яркость - 400-800 cd/m² для каждой ступени соответственно.

Статистическая обработка осуществлялась в программном пакете GraphPad Prism 8. Использовался критерий Колмогорова-Смирнова для проверки нормальности распределения. Для проверки статистической значимости при $p < 0.05$ различий результатов использовался однофакторный ANOVA с апостериорным критерием Тьюки для множественных сравнений.

В качестве маркера снижения ФС принималась инверсия знака разности значений КЧСМ в парных сравнениях красный-зеленый [2] и зеленый-синий. Анализ выраженности реакции на световые импульсы при различных видах нагрузки проводился как с учетом абсолютных значений, так и тенденций, демонстрируемых характером кривых индивидуально для каждого испытуемого.

Результаты показали наличие выраженной реакции всех испытуемых для значений экспериментов с использованием синего света, в то время как реакция на красный свет практически отсутствовала для 20 % испытуемых. Характер частотных кривых всех испытуемых демонстрировал различие реакций на световые импульсы разного спектрального диапазона как при тестовых, так и при игровых нагрузках, что позволило дополнительно выполнить разделение данных на подгруппы. Изменение реакции на синий свет проявлялось при более низких частотах повторения импульсов (30-40 Гц), и имело существенное различие с красным светом (50-60 Гц).

Таким образом, добавление в эксперимент дополнительно световых импульсов синей области спектра позволило повысить чувствительность и информативность методики. Длины волн используемых световых импульсов следует выбирать, опираясь на их относительную чувствительность кривой видности глаза. КЧСМ является инструментом экспресс-диагностики ФС, учитывающим индивидуальные особенности зрительной системы в частности, и центральной нервной системы человека в целом. Изменения значений этого показателя могут быть связаны как с простой утомляемостью, так и с возможным проявлением заболевания [4], что говорит об актуальности использования данной методики в исследовательских работах.

Список литературы

1. Павлова Л. П., Ноздрачев А. Д. Физиологическая лабильность и принцип доминанты в проблеме функционального состояния. // Вестник СПбГУ. — 2005. №. 2. с. 68-88.
2. Исследование влияния тестовых и игровых интеллектуальных нагрузок на функциональное состояние человека / С. Г. Терехин, Л. Т. Наурзбаева, А. Е. Черняков, А. В. Аладов // Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50, № 23. – С. 62-64. – DOI 10.61011/PJTF.2024.23.59403.6521k. – EDN MCFHAA.
3. A. V. Aladov, D. N. Berlov, A. E. Chernyakov, Y. A. Chiligina and A. L. Zakgeim, «LED Device of Psychophysiological Express Diagnostics of Human Functional States,» 2021 Joint Conference - 11th International Conference on Energy Efficiency in

Domestic Appliances and Lighting & 17th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (EEDAL/LS:17), Toulouse, France, 2022, pp. 1-4.

4. Abiyev A, Yakaryılmaz FD, Öztürk ZA. A new diagnostic approach in Alzheimer's disease: The critical flicker fusion threshold. *Dement Neuropsychol.* 2022 Jan-Mar;16(1):89-96. doi: 10.1590/1980-5764-DN-2021-0054. PMID: 35719254; PMCID: PMC9170257.

Конформационный анализ флавиномононуклеотида в растворах, влияние дисперсионного взаимодействия

Смолин А. Г.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: smol.pms@mail.ioffe.ru

Флавиномононуклеотид (FMN) является важной для биологии молекулой, которая образуется из рибофлавина (витамин B2). Молекулы флавинов (рибофлавин, FMN, FAD) играют важную роль в обмене веществ в живых клетках и фотопроцессах. Изоаллоксазин является частью молекул флавинов и имеет сложную структуру, что приводит к сложному взаимодействию между изоаллоксазином и другими структурными частями молекулы флавинов. В частности, ранее было показано [1], что в молекуле рибофлавина образуются различные варианты внутримолекулярных водородных связей. При этом учет дисперсионного взаимодействия имеет определяющее значение для определения геометрий конформеров, которые существуют в растворах в высокой концентрации при нормальных условиях. Для молекулы флавиномононуклеотида до настоящего времени конформационный анализ не осуществлялся с высокой точностью. Так в работе [2] посредством методов молекулярной динамики был найден всего один конформер FMN, который может существовать в растворе. Это очень необычный результат для столь больших молекул, который был опровергнут в рамках данной работы с более точными *ab initio* расчетами. Кроме этого, показаны причины, которые могут приводить к “потере” других геометрий депротонированных конформеров при использовании методов молекулярной динамики.

В работе был осуществлен конформационный анализ молекул FMN в водном растворе с рассмотрением всех возможных геометрических конфигураций на высоком уровне точности *ab initio* расчетов с учетом дисперсионного взаимодействия и параметров раствора. Было найдено несколько конформеров FMN с уровнем энергии в пределах кТ. При этом два конформера с внутримолекулярной водородной связью оказались с уровнем энергии существенно ниже, чем у конформера представленного в работе [2]. Было показано, что дисперсионное взаимодействие вносит определяющую роль в распределение энергий конформеров около глобального минимума, что плохо моделируется методами молекулярной динамики с менее точными расчетами электронной структуры и взаимодействия. Было показано, что депротонирование фосфатной группы в растворах может происходить при разных геометриях конформеров, что требует выбора не одного, а нескольких различных конформеров для поиска геометрий депротонированных конформеров с наибольшей

концентрацией в растворе некоторыми алгоритмами молекулярной динамики. Наличие смеси из нескольких конформеров в водном растворе объясняет наличие некоторых несовпадений эксперимента и результатов моделирования в работе [2]. Кроме этого, найденные геометрии конформеров лучше объясняют процессы образования катионной формы изоаллоксазина в FMN. Эти данные важны для лучшего понимания процессов в живых клетках и фармакологии.

Список литературы

1. Smolin A. G., Conformational analysis of riboflavin in aqueous solution: The influence of hydrogen bonding in riboflavin and FAD(2-) molecules on fluorescence parameters, Chem. Phys., 2025, v. 591, 112538
2. Andrikopoulos P. C. et al., Femtosecond-to-nanosecond dynamics of flavin mononucleotide monitored by stimulated Raman spectroscopy and simulations, Phys. Chem. Chem. Phys., 2020, 22, 6538-6552

Экспериментальное изучение особенностей течения крови в микроканалах со стенозом и бифуркациями с помощью разработанных микрожидкостных устройств

Рахимов А. А.¹, Валиев А.А.¹

¹Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН

e-mail: ragar83@mail.ru

В сосудистой системе человеческого организма по мере удаления от сердца происходит ветвление и сужение сосудов, сопровождаемое значительным ростом суммарного поперечного сечения и уменьшением скорости крови [1]. При наличии стеноза (сужения) сосудов скорость деформации сдвига крови в сужении многократно превышает ее значение в здоровой части сосуда [2]. Для изучения особенностей движения крови при образовании стеноза разработаны микрожидкостные устройства (МЖУ) формой параллелепипеда со ступенчатым сужением посередине, составляющим 1/20, 1/10 и 1/5 часть сечения основного микроканала. Изготовление проводилось методом мягкой фотолитографии, аналогично работе [3], стекло и реплика МЖУ с микроканалами прозрачные для использования микроскопии высокого разрешения. МЖУ имеют глубину 50 мкм, длину около 10 мм (два канала длиной 5 мм, между которыми сужение), ширину 1 мм, с сужением длиной 100 мкм и ширинами 50, 100 и 200 мкм. Для калибровки глубины и размеров изготовленных микроканалов использовали видеосъемку и расход по течению дистиллированной воды. Рассчитано, что для крови с показателем неньютоновского поведения $n = 0.80$ отношение перепада давления в широкой части к узкой для сужений шириной 50, 100 и 200 мкм составляет соответственно 4.55, 7.92 и 13.8, что для цилиндрического сосуда при тех же длинах соответствует перекрытию каналов 75, 66 и 53%. Для изготовления МЖУ использовались маски, напечатанные по разработанному векторному рисунку. Сужения имеют размеры (Oy x Ox): 50x100, 100x100 и 200x100 мкм. Для каждого из них сделан одиночный и тандемный стеноз (два сужения) с теми же размерами сужений и с разными

расстояниями между сужениями (200, 300, 400, 500, 1000, 1500 мкм). Разработаны бифуркационные каналы: канал шириной в 1 мм делился под углом в 20 градусов на 2 канала ширинами 0.6 мм. В одном из сдвоенных каналов было одиночное или двойное сужение: одиночное бифуркационное или tandemное бифуркационное МЖУ с такими же размерами сужения и разными расстояниями между сужениями (200, 300, 400, 500, 1000 мкм). Провели эксперименты по течению цельной крови здорового пациента с антикоагулянтом ЭДТА-КЗ в изготовленных МЖУ при постоянном перепаде давления 500 Па. Микро-съемка процесса производилась высокоскоростной камерой Chronos 1.4 с частотой съемки 1500 кадров/с через инвертный биологический микроскоп BDS500. Для визуального сравнения ориентации и изучения особенностей движения эритроцитов воспользовались встроенным в программе Matlab модулем PIVlab_App. В случае одиночного стеноза для МЖУ с сужением шириной 50 мкм происходит значительное ускорение эритроцитов перед сужением, в нем и на некотором расстоянии на выходе из него. С увеличением ширины сужения до 200 мкм наблюдается более равномерное течение в сужении, поскольку скорости в сужении ниже и ускорение не столь сильное. Анализ скоростей движения эритроцитов при tandemном стенозе показал, что при расстояниях между сужениями равном 200 мкм эритроциты «вылетая» из сужения вновь ускоряются перед вторым сужением, они не распределяются по всему фронту между сужениями, а занимают небольшую обтекаемой формы область, которая увеличивается с увеличением ширины сужения и расстояния между сужениями. Дальнейшее увеличение расстояние между сужениями приводит к росту «обтекаемой» зоны и при большом расстоянии между сужениями (1500 мкм) течение становится схоже с течением в одиночном сужении с полным заполнением эритроцитами области между сужениями. Для каналов с бифуркациями картина аналогичная, при этом скорость в канале без сужения значительно выше скорости в канале с сужением. Полученные результаты позволят улучшить программное моделирование течения эритроцитов, могут быть полезными при разработке новых методов диагностики и лечения сосудистых заболеваний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00403, <https://rscf.ru/project/24-21-00403/>.

Список литературы

1. Ахметов А.Т., Валиев А.А., Рахимов А.А., Саметов С.П., Хабибуллина Р.Р. Микрогидродинамика крови при стенозе сосудов // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11, №2. С. 210–217.
2. Ахметов А.Т., Валиев А.А., Рахимов А.А., Саметов С.П. Анизотропные свойства крови в сосуде со стенозом // Доклады академии наук. 2018. Т. 483, №2. С. 145–149.
3. Рахимов А.А., Валиев А.А., Ахметов А.Т. Гидродинамика цельной и разбавленной крови в микроканале со стенозом // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50. Вып. 23. С.65-67.

Динамика температурного поля в биологических тканях при локальном лазерном нагреве

Седова Ю. К.¹, Свиридов А.П.¹, Коновалов А.Н.¹, Захаркина О.Л.¹, Игнатьева Н.Ю.²

¹ КККиФ НИЦ «Курчатовский институт»

² МГУ им. М. В. Ломоносова

e-mail: yulia.sedova94@gmail.com

Способность лазерного излучения проникать вглубь биологических тканей и прецизионно осуществлять их модификацию широко используется в регенеративной и эстетической медицине, косметологии. Объемы производства специализированной лазерной аппаратуры и оказания медицинских услуг, направленных на эпиляцию, омоложение кожи, удаление рубцов, татуировок до сих пор растут в геометрической прогрессии. Несмотря на значительный прогресс, вопросы повышения эффективности, надежности и безопасности воздействия интенсивного лазерного излучения на биологические ткани остаются актуальными. Основная проблема состоит в том, что лазерное излучение распространяется в сугубо неоднородной среде, оптические и теплофизические параметры которой могут существенно варьироваться в зависимости от типа ткани, возраста, расы пациента и тому подобное. Поэтому при выборе оптимальных режимов лазерного воздействия на передний план выходит задача дооперационного определения и контроля индивидуальных оптических и теплофизических параметров тканей пациента, на которые планируется лазерное воздействие. Прежде всего это коэффициент поглощения, коэффициент рассеяния, фактор анизотропии рассеяния, теплоемкость и температуропроводность. Не менее важным является создание адекватных физико-математических моделей, которые способны оперативно рассчитывать динамику трехмерного температурного поля, индуцируемого лазерным импульсом в неоднородных средах, оценивать степень модификации тканей, сопоставлять результаты расчетов с экспериментальными наблюдениями и предоставлять рекомендации врачу.

Ранее в этом направлении уже проводились некоторые исследования. Так, в работе [1] была представлена модель расчета температурного поля, индуцируемого в коже при лазерном фракционном термолизе. Сначала методом Монте Карло определяли световое поле, а затем, решая задачу теплопроводности, и температурное. Кроме того, были выполнены вычисления контуров и объемов денатурированной ткани. В работе [2] предложена методика одновременного измерения эффективного коэффициента поглощения, теплоемкости и температуропроводности, основанная на измерениях температурного поля, индуцируемого на поверхности исследуемого образца как на стадии нагрева в течение лазерного импульса, так и после его окончания, и сопоставлении с моделированием.

В представленной работе проведен цикл экспериментов по модификации коллагенсодержащих тканей (кожа и хрящ ушной раковины кролика) импульсным лазерным излучением с длиной волны 1560 нм при варьировании длительности импульса (30, 50, 70 мс) и диаметра лазерного пучка на поверхности образца (200, 400 и 600 мкм). Получены пороговые значения мощности лазерного излучения, при которых происходит денатурация

коллагена. С помощью тепловизора FLIR 650sc проведены измерения динамики распределения температуры на поверхности исследуемых образцов на стадиях нагрева и остывания. Эти измерения позволили определить эффективный коэффициент поглощения на длине волны 1560 нм, теплоемкость и температуропроводность образцов. С помощью интегрирующей сферы были определены коэффициенты поглощения, рассеяния и фактора анизотропии рассеяния кожи и хряща на длине волны 1560 нм. Полученные оптические параметры использовались для вычисления светового поля и, соответственно, пространственного распределения источников тепла. Теплофизические параметры были необходимы для последующего этапа - решения тепловой задачи. Расчеты выполнялись с помощью пакета оригинальных программ для MathLab и Comsol. Сопоставление модельных расчетов динамики температурного поля с измерениями пороговых мощностей денатурации дало хорошее согласие. Полученные результаты востребованы для развития методики выбора оптимальных режимов лазерного воздействия на биологические ткани при проведении лечебных, восстановительных или эстетических процедур с учетом индивидуальных особенностей пациента и ожидаемого результата.

Список литературы

1. Khan M. H., Sink R. K., Manstein D., Eimerl D., Anderson R.R. Intradermally focused infrared laser pulses: thermal effects at defined tissue depths. *Lasers Surg Med.* 2005. Vol. 36, P. 270.
2. Kondyurin A. V, Sviridov A.P. Equivalent of a cartilage tissue for simulations of laser-induced temperature fields // *Quantum Electron.* 2008. Vol. 38, № 7. P. 641–646.

Использование метода главных компонент для анализа ИК спектров сыворотки крови пациентов с множественной миеломой

Бутяев Р. В.¹, Чернышев, Д. А.¹, Михайлец, Э. С.¹, Плотнокова Л.В.¹, Поляничко А.М.¹.

¹Санкт-Петербургский государственный университет

e-mail: st069812@student.spbu.ru

Введение. Множественная миелома (ММ) представляет собой онкогематологическое заболевание, характеризующееся избыточной продукцией моноклональных иммуноглобулинов. Существующие на сегодняшний день подходы к диагностике заболевания не подходят для проведения широкого скрининга, с целью выявления патологии на ранней стадии. В настоящей работе исследована возможность применения комбинации метода главных компонент (МГК) и ИК-спектроскопии в качестве основы для создания системы массового скрининга множественной миеломы (ММ).

Материалы и методы. Исследование проведено на образцах сыворотки крови 12 пациентов с ММ на разных стадиях заболевания и 12 здоровых доноров. Измерения проводили в растворах D₂O. ИК спектры регистрировали с помощью Фурье-спектрометра Tensor 27 (Bruker) в диапазоне 4000–800 см⁻¹ с разрешением 2 см⁻¹. Анализ данных проводился с

использованием метода главных компонент в вычислительной среде Jupyter Notebook (Python 3.10, библиотеки Pandas, NumPy, SciPy, Matplotlib).

Результаты и обсуждение. Анализ усреднённых ИК спектров образцов разных групп показал, что визуальные различия между группами минимальны. Применение МГК позволило снизить размерность спектральных данных и выделить главные компоненты (ГК), ответственные за различия между группами. Наиболее чёткое разделение наблюдалось по первой и третьей главным компонентам, что указывает на значимые различия в их спектральных характеристиках.

Детальный анализ первой ГК не показал наличие каких-либо характерных спектральных отличий, и наблюдающееся разделение образцов было связано с различными внешними условиями при проведении эксперимента.

Вместе с тем, зависимость нагрузок третьей ГК от длины волны выявила три характерных экстремума (1685, 1654 и 1632 см^{-1}), коррелирующих с различными типами вторичной структуры белка (β -повороты, α -спирали, β -слои). Это показывает, что третья ГК связана с изменением белкового состава сыворотки крови при ММ и является важным параметром при выявлении признаков ММ. Анализ третьей ГК показал, что образцы сыворотки крови пациентов на разных стадиях заболевания имели разные значения нагрузок. Это позволяет нам предполагать, что МГК имеет хороший потенциал для выявления наиболее вероятной стадии заболевания уже на этапе скрининга.

Заключение. Применение метода главных компонент в сочетании с ИК спектроскопией показало высокую эффективность в разделении образцов больных ММ и здоровых доноров. Возможность соотнесения главных компонент с определенными спектральными характеристиками образцов позволяет анализировать физико-химические изменения в составе сыворотки крови, связанные с заболеванием. Таким образом, развитие предложенного метода перспективно в качестве скринингового подхода и для проведения ранней диагностики онкогематологических заболеваний.

Список литературы

1. Beattie J. R., Esmonde-White F. W. L. Exploration of principal component analysis: deriving principal component analysis visually using spectra //Applied Spectroscopy. – 2021. – Т. 75. – №. 4. – С. 361-375.
2. Yang H. et al. Obtaining information about protein secondary structures in aqueous solution using Fourier transform IR spectroscopy //Nature protocols. – 2015. – Т. 10. – №. 3. – С. 382-396.
3. Тельная Е. А. и др. Инфракрасная спектроскопия сыворотки крови больных онкогематологическими заболеваниями //Биофизика. – 2020. – Т. 65. – №. 6. – С. 1154-1160.

Равновесная модель связывания интеркалирующего красителя SYBR Green I в ходе амплификации ДНК

Ибрагимов Д. Р.¹, Федоров А.А.¹

¹Институт аналитического приборостроения РАН

e-mail: danil_ib@mail.ru

Традиционно для оценки концентрации ДНК в образце методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) используется пороговый алгоритм, заключающийся в определении порогового цикла образцов с известной начальной концентрацией [1]. Этот подход, хотя и обладает хорошей точностью, является эмпирическим и может давать погрешности из-за различий в эффективности реакций для разных образцов [2]. Хорошей альтернативой эмпирическому алгоритму может стать подход, использующий модели ПЦР. Однако в настоящее время моделей, способных описать поведение регистрируемого в ходе ПЦР сигнала, не существует. На наш взгляд причиной этого является, в том числе, недостаточное внимание к взаимодействию ДНК с флуоресцентными метками в предыдущих моделях [3-5], которое существенным образом определяет форму кривой ПЦР [6].

Целью данной работы является создание математической модели ПЦР, в которой в качестве флуоресцентной метки используется интеркалирующий краситель. Для моделирования амплификации ДНК в ходе ПЦР был использован кинетический подход, заключающийся в применении закона действующих масс к химическим реакциям, происходящим в реакционной пробирке ПЦР. Полученная система дифференциальных уравнений учитывает взаимодействие одноцепочечной ДНК с праймерами (отжиг) и образование двуцепочечной ДНК (элонгация), описываемое уравнением Михаэлиса-Ментен. Для учета нелинейной зависимости интенсивности флуоресцентного сигнала от концентрации целевого продукта, накопленного в ходе амплификации, рассматривается состояние равновесия реакции связывания интеркалирующего красителя с двуцепочечной ДНК. Концентрация связанного красителя оценивается с помощью выражения для константы диссоциации. Модель была реализована в среде MATLAB, для решения полученной системы дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка.

Оценка адекватности модели проводилась на основе экспериментальных данных, предоставленных компанией «Синтол». Использовались образцы с различными концентрациями ДНК сои. Количество ДНК в тестовых образцах было измерено высокоточным методом цифровой ПЦР с помощью прибора Sniper DQ24. В качестве флуоресцентных меток использовался широко распространенный в молекулярной биологии краситель SYBR Green I. В качестве меры точности аппроксимации использовалась сумма квадратов разности нормированных теоретических и экспериментальных графиков ПЦР. Подбором значений констант гибридизации, которые, согласно литературным данным, могут находиться в достаточно широком диапазоне [3-5], удалось добиться высокой степени соответствия – менее 0.08% по выбранной метрике. Отклонение предсказанного моделью начального количества ДНК в пробе от количественной оценки цифровой ПЦР не превышало 15%.

Таким образом, в рамках данной работы разработан инструмент для анализа кривой ПЦР-РВ, полученной с использованием красителя SYBR Green I, который способен не только аппроксимировать с высокой точностью экспериментальные данные, но и предсказывать параметры реакции. Это делает предложенную модель многообещающей как для применения разработчиками приборов и реагентов ПЦР, так и исследователям биомедицинских лабораторий.

Список литературы

1. Ребриков Д.В., Саматов Г.А., Трофимов Д.Ю. и др. ПЦР в реальном времени: 11-е изд. / под ред. Д.В. Ребрикова. — М.: Лаборатория знаний, 2023
2. Ruijter JM et al. Efficiency Correction Is Required for Accurate Quantitative PCR Analysis and Reporting. *Clinical Chemistry*. 2021. Vol 67, Issue 6. P. 829–842
3. Mehra S et al. A kinetic model of quantitative real-time polymerase chain reaction. *Biotechnology and Bioengineering*. 2005. Vol. 91, issue 7. P. 848–860
4. Rutledge RG et al. A kinetic-based sigmoidal model for the polymerase chain reaction and its application to high-capacity absolute quantitative real-time PCR. *BMC biotechnology*. 2008. Vol. 8
5. Boggy GJ et al. A mechanistic model of PCR for accurate quantification of quantitative PCR data. *PLoS One*. 2010. Vol. 5. № 8
6. Федоров А.А., Сочивко Д.Г., Варламов Д.А. Модель генерации флуоресцентного сигнала интеркаляционного красителя в ходе полимеразной цепной реакции. *Журнал технической физики*. 2020. Т. 90. С. 1581–1585

ABDS — прижизненный флуоресцентный DIY-краситель для оптической диагностики биоэлектронных интерфейсов

Абелит А. А.¹, Бойцова Н. А., Ступин Д. Д.

¹СПБАУ РАН

e-mail: anna.abelit@gmail.com

В настоящее время биосенсорные технологии широко используются для решения многих актуальных задач биологии и медицины. Одним из перспективных направлений в данной области является создание импедансных цитосенсоров [1,2] – биоэлектронных приборов, представляющих собой модифицированные чашки Петри с массивом микроэлектродов на дне. Большим преимуществом таких приборов является возможность преобразования биологического сигнала от исследуемых клеток напрямую в электрический сигнал [3,4] с помощью измерения их импеданса. Это позволяет создавать так называемые проблемно-ориентированные цитосенсоры и исследовать с их помощью широкий спектр явлений, происходящих с клетками, в том числе их пролиферацию, адгезионные свойства клеток и механизмы их гибели под действием различных поражающих факторов [1].

Поскольку импеданс электрода, на котором находятся живые клетки, существенно зависит от их состояния, при разработке и оптимизации импедансных цитосенсоров возникает проблема стороннего визуального контроля получаемых с их помощью результатов. Так как большинство материалов, используемых для изготовления микроэлектродов,

являются непрозрачными, для визуализации клеток необходимо использовать методы флуоресцентной микроскопии и различные красители. Краситель, необходимый для такого исследования, должен удовлетворять как биологическим, так и физическим критериям: во-первых, он должен быть прижизненным и клетки не должны после окраски изменять свою форму, скорость пролиферации и т. п., а, во-вторых, такой краситель не должен окрашивать поверхность цитосенсора. Большинство коммерчески доступных красителей, удовлетворяющих таким требованиям (например, DiBAC и Deep Red Cell Mask, Thermo Fisher Scientific, США), обладают высокой стоимостью и требуют специфических условий для своего хранения.

В нашей работе мы представляем альтернативный DIY-краситель для визуализации клеток ABDS – A Beauty Dye Staining, созданный на основе чернил красного перманентного маркера Edding E-140S (edding International GmbH, Япония), окрашивающий цитоплазматическую мембрану клеток. ABDS удовлетворяет всем перечисленным выше требованиям, прост в изготовлении и обладает низкой стоимостью. Кроме того, ABDS обеспечивает высокую детализацию клеточной мембраны, в том числе окрашивает фокальные контакты клеток, которыми они прикрепляются к поверхности электродов. Данное свойство ABDS позволяет исследовать клеточную адгезию, в том числе наблюдать процесс разрушения фокальных контактов под действием дезадгезирующих веществ. Нами были разработаны протоколы изготовления ABDS и прижизненного окрашивания с его помощью клеток карциномы шейки матки HeLa. Предложенная технология окрашивания была успешно апробирована на примере исследования дезадгезии популяции клеток HeLa от поверхности электродов под действием раствора трипсина-Версена в биоимпедансных экспериментах.

Мы надеемся, что разработанный нами краситель значительно упростит сторонний мониторинг состояния клеток при их исследовании с помощью биоэлектронных приборов, и, тем самым, существенно ускорит развитие биосенсорных технологий.

Работа выполнена при поддержке проекта FSRM-2024-0001.

Список литературы

1. Stupin DD, Kuzina EA, Abelit AA, Emelyanov AK, Nikolaev DM, Ryazantsev MN, Koniakhin SV, Dubina MV. Bioimpedance spectroscopy: Basics and application. ACS Biomaterials Science & Engineering. 2021 Mar 22; 7(6):1962-86
2. Barsoukov, Evgenij. Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications. — John Wiley & Sons, 2018.
3. Wegener J, Keese CR, Giaever I. Electric cell—substrate sensing (ECIS) as a noninvasive means to monitor the kinetics of cell spreading to artificial surfaces. Experimental cell research. 2000 Aug 25;259(1):158-66
4. Jiang WG. Electric cell-substrate impedance sensing and cancer metastasis. — Springer Science & Business Media, 2012. — Т. 17.

Исследование динамики одиночных белковых молекул с помощью твердотельного нанопорового SiN биосенсора

Ваулин Н. В.¹, Дряян Л. М.², Афоничева П. К.³, Лебедев Д. В.^{1,3}, Мухин И.С.¹

¹СПБАУ РАН им. Ж. И. Алферова

²ИТМО

³ИАП РАН

e-mail: nikitavaylin@mail.ru

Развитие высокотехнологичной медицины, методов генетической диагностики, молекулярной биологии и биоинженерии требует совершенствования методов высокоточного анализа биологических соединений. Технологии point-of-care диагностики, SERS и микроэлектродные тест системы являются методами селективного детектирования малых концентраций биологических молекул. К негативным особенностям данных технологий относится невозможность работы с одиночными наноразмерными объектами. Лабораторные методы диагностики (крио-ЭМ, smFRET, ACM) позволяют детектировать одиночные биологические молекулы, проводить анализ их физико-химических и структурных свойств с высокой точностью. К недостаткам данных методов относится дороговизна, необходимость в существенных физических воздействиях на исследуемый образец (крио-ЭМ, ACM) или необходимость его модификации (smFRET). Трудности также возникают при исследованиях динамики функционирования биомолекул в реальном времени. Устройствами, объединяющими преимущества перечисленных методов анализа, являются структуры на основе наноразмерных одиночных отверстий (нанопор) в непроницаемых мембранах. Нанопоровые технологии включают в себя платформы для обнаружения сверхмалых концентраций наноразмерных объектов вплоть до отдельных молекул [1], качественного и количественного анализа молекулярных соединений [2], исследования структурных и поверхностных свойств одиночных молекул [3]. Принцип нанопорового детектирования заключается в модуляции измеряемого электрического сигнала проходящей через внутренний объем поры молекулой. Амплитуда и продолжительность изменения электрического сигнала напрямую зависит от размеров, физико-химических и конформационных свойств молекулы.

Представленная работа предлагает новый метод нанопорового исследования одиночных наноразмерных объектов, заключающийся в иммобилизации белковых молекул под действием приложенного электрического поля. В отличие от нанопорового детектирования, процесс иммобилизации заключается в удержании одиночной молекулы в области поры в течении продолжительного времени (до сотен секунд). В таком случае, изменение конформационных свойств иммобилизованного белка будет модулировать величину измеряемого ионного тока, позволяя исследовать конформационную динамику белка в реальном времени. В качестве объектов исследования были выбраны молекулы 20S протеасомы, характеризующиеся значительными конформационными изменениями структуры в процессе протеолиза. Молекулы протеасомы играют важную роль в жизнедеятельности клеток, уничтожая лишние и дефектные белки. В качестве субстрата в процессе протеолиза молекул был выбран основной белок миелина (MBP) с изоэлектрической точкой ~ 10 , что

обеспечивает эффективный транспорт данных белков под действием приложенного внешнего электрического поля.

В ходе проведения экспериментов, была использована сенсорная система представляющая собой одиночную нанопору диаметром ~ 10 нм, разделяющую cis- и trans- объемы электрохимической ячейки. В процессе экспериментов была отработана методика иммобилизации 20S-частиц протеасомы, в результате чего было продемонстрировано уменьшение величины ионного тока на $\sim 75\%$. Значительное изменение транспортных свойств системы свидетельствует о эффективном удержании белка в области поры под действием электрического поля. Добавление в область поры молекул основного белка миелина приводит к изменению уровня ионного тока, что сигнализирует о иницировании процесса протеолиза иммобилизованного белка.

Список литературы

1. Электрохимическое детектирование одиночных молекул ДНК с помощью твердотельной нанопоры / П. К. Афоничева, Н. В. Ваулин, Д. В. Лебедев [и др.] // Научное приборостроение. – 2024. – Т. 34, № 4. – С. 34-42.
2. Xue, Liang, et al. «Solid-state nanopore sensors.» *Nature Reviews Materials* 5.12 (2020): 931-951.
3. Xi, Guohao, et al. «Discriminating Single Nucleotide Variations in Solid-State Nanopores by Evaluating the Combination Efficiency between DNA Polymerase and Its Substrate.» *The Journal of Physical Chemistry B* 127.21 (2023): 4790-4799.

Проточная ячейка для выделения нуклеиновых кислот

Петров Д. Г.¹, Антифеев И.Е., М.В. Зайцева М.В., Гермаш Н.А.

¹ИАП РАН

e-mail: dimoon88@mail.ru

Анализ проб объемом более 2 мл чаще всего используется при анализе образцов окружающей среды, где количество целевого продукта находится вблизи или за пределами порога чувствительности методов последующего анализа. При необходимости проанализировать весь объем поступившей пробы лаборант неизбежно приходит к необходимости дублировать пробоподготовку, что существенно влияет на достоверность дальнейшего анализа, поскольку человеческий фактор является одним из самых значимых при проведении потоковых исследований образцов [1]. Как следствие возникают потери целевого продукта, в случае с анализом нуклеиновых кислот (ДНК/РНК) [2].

Решением данной проблемы, может являться создание проточного метода выделения, очистки и концентрирования нуклеиновых кислот, который позволяет работать с пробами от 1 до 100 мл, при этом обеспечивая степень концентрирования, как минимум в 10 раз превосходящую значение достигаемое при анализе проб при ручном выделении, обычно это значение находится в пределах 3-5 раз [3].

Ключевым элементом такой проточной системы становится модифицированная ячейка, в которой из пробы выделяются молекулы ДНК/РНК, при пропускании через модифицированный участок ячейки. Таким образом обеспечивается концентрирование целевого продукта.

В работе представлены несколько видов модифицированной ячейки для проточного концентрирования НК. Полученные экспериментальные данные показывают существенные отличия в эффективности работы на одинаковых режимах различных модификаций ячейки. При этом показана ячейка, на которой удаётся концентрировать более 80% ДНК при циклическом пропускании пробы объёмом 10 мл, при этом общее время концентрирования сопоставимо со временем на обработку пробы объёмом 1 мл. Ячейка изготовлена из полидиметилсилоксана (далее – ПДМС), возможно изготовление ячейки из таких материалов как полипропилен, поликарбонат и другие, обладающие стойкостью к реагентам для выделения нуклеиновых кислот (изопропиловый спирт, гуанидин тиоционат). ПДМС удобен для быстрого макетирования и тиражирования изделий методом термоформования [4,5].

Список литературы

1. М. В. Зайцева, И. Е. Антифеев, Д. Г. Петров, Е. Д. Макарова. Оптимизация процесса лизиса для проточного выделения нуклеиновых кислот. Письма в Журнал технической физики. – 2023. – Т. 49, № 23. – С. 32-34. – DOI 10.61011/PJTF.2023.23.56847.176A.
2. Д. Г. Петров, Р. Х. Дженлода, И. Е. Антифеев, Е. Д. Макарова, В. Е. Курочкин. Высокоэффективное проточное концентрирование нуклеиновых кислот. Современные технологии научного приборостроения и информационно-измерительных систем : Труды Международной научно-технической конференции, Москва, 23 июня 2023 года. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. – С. 160-162.
3. З. М. В. Зайцева, И. Е. Антифеев, Д. Г. Петров. Оптимизация условий процесса проточного выделения нуклеиновых кислот. Тезисы докладов Второй ежегодной всероссийской молодежной конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов «АналитБиоПрибор-2023», Санкт-Петербург, 23–24 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. – С. 181-183.
4. Д. Г. Петров, Е. Д. Макарова, Н. Н. Гермаш, И. Е. Антифеев. Методы выделения и очистки ДНК из лизатов клеток (обзор). Научное приборостроение. – 2019. – Т. 29, № 4. – С. 28-50. – DOI 10.18358/np-29-4-i2850.
5. D. G. Petrov, I. E. Antifeev, N. N. Germash, E. D. Makarova Analysis of the effectiveness of the stages of the concentration of genetic material// Journal of Physics: Conference Series : International Conference PhysicA.SPb/2019, Saint Petersburg, 22–24 октября 2019 года. Vol. 1400, 3. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033023. – DOI 10.1088/1742-6596/1400/3/033023.

Влияние электронного излучения на эритроциты крови в патологии

Гоголева Т. Е.¹, С.Н. Мамаева¹, М.М. Рычков², Г.В. Максимов³

¹СВФУ имени М. К. Аммосова,

²ТПУ, г. Томск

³МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

e-mail: gogoltakuo98@mail.ru

Несмотря на интенсивное развитие методик диагностики и терапии продолжается рост количества раковых заболеваний во всем мире, в том числе рак молочной железы (РМЖ), являющегося наиболее распространённым злокачественным новообразованием (ЗНО). Кроме того, в настоящее время отсутствуют достоверные данные о механизмах развития рецидивов и явления метастазирования раковых опухолей. Для разработки более эффективных методик терапии и ее мониторинга необходимо проводить исследования, которые могут способствовать появлению новых представлений о развитии патологии и реакции организма на проведение терапии. Одним из методов лечения РМЖ является интраоперационная лучевая терапия (ИОЛТ). ИОЛТ РМЖ осуществляется пучком высокоэнергетических электронов на бетатронах [1]. Известно, что в области локализации опухоли образуется большое количество микрососудов [2], что может обуславливать воздействие ионизирующего излучения (ИИ) на большое количество эритроцитов. Детальное исследование изменений морфологии эритроцитов под влиянием ИИ позволяет наиболее полно установить возможные последствия и определить наиболее эффективные пути их коррекции.

Целью данной работы является исследование эритроцитов крови пациентов с диагнозом РМЖ под воздействием электронного излучения (ЭИ) в модельных условиях методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Объектами исследования являются образцы венозной крови пациентов с диагнозом РМЖ, которые были облучены в пробирках электронным излучением на основе малогабаритного бетатрона КМБ-8 Томского политехнического университета, Россия. В образцы крови были доставлены различного значения дозы ИИ (50, 100, 150 Гр). Из облученных образцов крови были подготовлены мазки крови на предметном стекле, которые сушились при комнатной температуре. Данные образцы были исследованы методом СЭМ высокого разрешения JSM-7800F JEOL, Япония при низкиловольтных ускоряющих напряжениях.

В результате проведенных экспериментов были получены СЭМ изображения эритроцитов, на основе которых выявлено, что после облучения в крови содержится большое количество дисморфных клеток. При увеличении дозы облучения до 100 Гр количество видов измененных форм эритроцитов и их процентное соотношение увеличиваются, а средние линейные размеры эритроцитов уменьшаются вследствие увеличения количества эхиноцитов и стомацитов. После облучения дозой ЭИ в 150 Гр линейные размеры эритроцитов увеличиваются, что может быть обусловлено увеличением количества сфероцитов с

линейными размерами, превосходящими линейные размеры эритроцитов в норме, а также эхиноцитов. Эритроциты приобретают такие необратимые формы (сфероциты) перед их гемолизом. Увеличение средних размеров эритроцитов в ходе данного эксперимента согласуется с результатами работы исследования влияния ИИ на кровь млекопитающих, показывающих увеличение гематокрита [3].

Кроме того, по результатам СЭМ исследования на поверхности эритроцитов крови пациентов с диагнозом РМЖ обнаруживаются наноразмерные структуры (НРС), которые могут быть вирусными частицами (вирус и экзосомы). СЭМ изображения эритроцитов показывают, что эти частицы не исчезают после воздействия ИИ, что может свидетельствовать о том, что облучение с дозой 150 Гр недостаточно для того, чтобы уничтожить их. Таким образом, это явление может свидетельствовать, что наблюдаемые НРС могут являться вирусными частицами, характеризующиеся как микроорганизмы с высокой радиорезистентностью.

Изучение воздействия ИИ – ЭИ на эритроциты имеет важное значение для разработки новых методов защиты от ИИ и для улучшения метода радиотерапии – эффективности ИОЛТ.

Список литературы

1. Calvo FA, Meirino RM, Orecchia R. Интраоперационная лучевая терапия: обоснование метода технические аспекты, результаты клинического применения. Онкохирургия. – 2010. – Т. 2, № 3. – С. 73-84.
2. Ремизов АН, Медицинская и биологическая физика. М., Высш. шк., 1999.
3. Мамаева СН, Иванова СМ, Шутова ВВ, Максимов ГВ. Исследование изменений состояния эритроцитов и плазмы крови обезьян при воздействии ионизирующего излучения. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. – 2022. – № 5(104). – С. 86-104.

Перспективы применения микрочип-лазера с длиной волны 1.55 мкм в лазерной биопечати

Ашихмин Д. И.^{1,2}, Седова Ю.К.², Шаленов А.С.^{1,2}, Минаев Н.В.², Юсупов В.И.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

²Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники (НИЦ «Курчатовский институт»)

e-mail: dima-ashihmin@bk.ru

Лазерная биопечать представляет собой передовую технологию, применяемую в медицинских исследованиях для создания сложных биоматериалов [1]. Одним из перспективных направлений её развития является лазерная инженерия микробных систем (ЛИМС) [2], которая демонстрирует высокую эффективность в выделении микроорганизмов, трудных для культивирования традиционными методами [3–5]. Это открывает новые горизонты в синтезе инновационных антибиотиков и биологически активных соединений. В

традиционной конфигурации биопечати наносекундный лазерный импульс в инфракрасном диапазоне фокусируется на прозрачную донорную подложку, покрытую поглощающей металлической пленкой, на которую наносится микрометровый слой среды для переноса [6]. Поглощение энергии импульса инициирует образование кавитационного пузыря, что приводит к формированию струи и отделению капли, содержащей микроорганизмы [7,8].

Существующие системы лазерной биопечати достаточно эффективны, но остаются громоздкими и не адаптированы для работы в условиях стерильных шкафов. Тем не менее, в научном сообществе существует значительная потребность в разработке компактных систем, которые могли бы эффективно выполнять задачи лазерной биопечати и ЛИМС в рамках профильных микробиологических лабораторий. Такие компактные системы могли бы стать новым незаменимым и эффективным инструментом в руках микробиологов [9]. Одним из перспективных подходов к решению этой задачи является использование микрочип-лазеров в качестве основы для такой системы.

Целью настоящего исследования является анализ возможностей использования импульсного микрочип-лазера с длиной волны 1.5 мкм для разработки компактной и эффективной установки лазерной биопечати. Использование такого лазера позволяет снизить вес и стоимость установки, а также повысить её компактность и безопасность.

В работе использовали микрочип-лазер (Crylink) со следующими параметрами: энергия импульса ~300 мкДж, длительность импульса ~4.2 нс и длина волны 1.5 мкм. На основании проведенных измерений расходимости лазерного излучения и распределения интенсивности в дальнем поле предложен подход к созданию систем биопечати. Он заключается в фокусировке излучения микрочип-лазера на поглощающем покрытии донорной подложки с помощью асферической линзы с числовой апертурой $NA = 0.4$ и фокусным расстоянием $f = 4.6$ мм. Данный способ обеспечивает необходимую плотность энергии (<10 Дж/см²) для эффективного процесса биопечати.

В экспериментах лазерный луч направлялся на поверхность 50 нм Ti пленки с нанесённым слоем гидрогеля толщиной ~200 мкм. Динамика формирования микроструй регистрировалась с помощью скоростной камеры Photron Fastcam SA3 с частотой до 120 000 к/с. Были определены оптимальные режимы, обеспечивающие стабильный перенос микрокапель геля на акцепторную подложку.

Результаты исследований продемонстрировали возможность использования микрочип-лазера в системах биопечати. Продемонстрированный подход существенно увеличивает надежность системы и снижает её стоимость. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований, направленных на оптимизацию параметров для различных типов биоматериалов, а также на расширение области применения технологий биопечати и ЛИМС в биомедицинских и инженерных задачах.

Список литературы

1. Matai I. et al. Progress in 3D bioprinting technology for tissue/organ regenerative engineering // Biomaterials. Elsevier, 2020. Vol. 226, № October 2019. P. 119536.

2. Yusupov V.I. et al. Laser engineering of microbial systems // Laser Phys. Lett. IOP Publishing, 2018. Vol. 15, № 6. P. 65604.
3. Минаев Н.В., Юсупов В.И., Чичков Б.Н. Устройство Для Лазерной Биопечати. 2020. № 19.
4. Cheptsov V.S. et al. New microorganism isolation techniques with emphasis on laser printing // Int. J. Bioprinting. 2019. Vol. 5, № 1. P. 1–12.
5. Kochetkova T. V. et al. Tepidiforma bonchosmolovskayae gen. Nov., sp. nov., a moderately thermophilic chloroflexi bacterium from a chukotka hot spring (arctic, russia), representing a novel class, tepidiformia, which includes the previously uncultivated lineage olb14 // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2020. Vol. 70, № 2. P. 1192–1202.
6. Yusupov V. et al. Laser-induced forward transfer hydrogel printing: A defined route for highly controlled process // Int. J. Bioprinting. 2020. Vol. 6, № 3. P. 1–16.
7. Duocastella M. et al. Jet formation in the laser forward transfer of liquids // Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. 2008. Vol. 93, № 2. P. 453–456.
8. Unger C. et al. Time-resolved imaging of hydrogel printing via laser-induced forward transfer // Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. 2011. Vol. 103, № 2. P. 271–277.
9. Минаев Н.В. et al. Лазерная инженерия микробных систем : новый инструмент для микробиологии. // Оптика и спектроскопия. 2024. Т. 132. В. 1. С. 97-104

Подходы к детектированию наличия патологии крови: синергия аппаратной реализации методов БИК- спектрометрии и интеллектуального анализа данных

Мазинг М. С.¹, Зайцева А.Ю¹

¹Институт аналитического приборостроения РАН

e-mail: mmazing@yandex.ru

В настоящее время одним из приоритетных направлений в области неинвазивной медицинской диагностики является использование оптических технологий, основанных на анализе спектральных характеристик и оптических свойств биологических сред [1]. Данные методы обеспечивают возможность получения диагностически значимой информации о структурных, функциональных и биохимических изменениях в органах и тканях, что позволяет использовать их в качестве инструмента для исследования и идентификации как физиологических, так и патологических процессов на различных уровнях организации функциональных систем организма человека [2]. При этом благодаря последним достижениям в разработке оптических сенсорных технологий, усовершенствованию методов статистического многомерного анализа и внедрению интеллектуальных информационных систем, данное направление приобретает всё большую актуальность для исследований и практического применения в медицинской диагностике и клинической практике [3].

Разработан и исследован методологический подход, основанный на интеграции метода абсорбционной ближней инфракрасной спектроскопии для исследования светорассеивающих и поглощающих биологических сред с применением алгоритмов

интеллектуального анализа информации. Данный подход обеспечивает возможность проведения многомерного анализа оптических данных с целью выявления статистических взаимосвязей между спектральными характеристиками оптического отклика биологических тканей и патологическими изменениями, протекающими в функциональных системах организма. Для зондирования биологических тканей применяется разработанная оптическая система, основанная на методе многоканальной спектроскопии с интегрированными источниками оптического излучения. Кроме того, в рамках исследования была разработана математическая модель детектирования наличия патологии системы крови в зависимости от величины интенсивности обратно рассеянного излучения на определённых длинах волн.

Экспериментальные исследования, проведенные с участием пациентов с диагностированными патологиями системы крови, подтвердили возможность идентификации особенностей спектральных характеристик обратно рассеянного в биологических тканях оптического излучения, ассоциированных с наличием патологических состояний системы кровообращения.

Полученные результаты свидетельствуют о диагностической значимости разработанного подхода и подтверждают его потенциал для применения в неинвазивной диагностике патологических процессов в клинической практике.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00404).

Список литературы

1. Vitorino R. et al. Diagnostic and monitoring applications using near infrared (NIR) spectroscopy in cancer and other diseases //Photodiagnosis and Photodynamic Therapy. – 2023. – Т. 42. – С. 103633.
2. Martins I. S. et al. Measurement of tissue optical properties in a wide spectral range: a review //Biomedical Optics Express. – 2022. – Т. 14. – №. 1. – С. 249-298
3. Heise H. M. Medical applications of NIR spectroscopy //Near-Infrared Spectroscopy: Theory, Spectral Analysis, Instrumentation, and Applications. – 2021. – С. 437-473.

Методика адаптации процесса сорбции в микрофлюидной системе

Михайлова О. А.¹, Зайцева М. В.¹, Антифеев И. Е.¹, Петров Д. Г.¹

¹ИАП РАН

e-mail: lesya101201@gmail.com

Молекулярные методы диагностики играют важную роль в современной медицине, они позволяют выявлять различные заболевания на ранних стадиях, делая возможным более точное и быстрое обнаружение возбудителей. Важной частью диагностики является пробоподготовка [1][2], в частности – выделение нуклеиновых кислот (НК), от качества которого во многом зависит результат всего анализа [3][4].

Актуальной задачей является реализация пробоподготовки в автоматическом режиме выделения в микрофлюидной системе, что повышает быстродействие – сокращение времени без потери качества выделения [5][6]. Достижение данной задачи обеспечивается эффективной сорбцией НК на твердую фазу [7].

В данной работе были рассмотрены подходы к подбору различных условий сорбции в микрофлюидной системе. В качестве формы канала использовали микрофлюидную систему в виде змеевика [8]. Для реализации процесса сорбции на магнитных частицах подбирали силу и количество магнитов, анализируя влияние этих параметров и скорости движения магнита на эффективность всего процесса выделения.

Была проведена оценка размещения магнитных частиц в камере для сорбции. Рассматривались магниты разной силы на отрыв: магнит А – 1.93 кг (10х10х3 мм), В – 4.84 кг (25х3 мм), С – 5.12 кг (8х2мм) и варианты их расположения под камерами для сорбции.

Также в работе представлены результаты зависимости эффективности выделения от скорости вращения. Магниты размещали для вращения в пределах окружности, описывающей камеру. Были рассмотрены следующие варианты: магнит С, размещенный максимально близко к краю окружности; аналогично расположенный магнит А; совместное размещение магнита А близко к краю окружности и магнита С – в центре окружности; магнит В расположенный в центре окружности.

Эффективность выделения оценивали методом полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ). В качестве исследуемого лабораторного объекта были взяты бактерии *E. Coli*. В результате полученных экспериментальных данных, показано, наиболее эффективной является скорость движения магнита 100 об/мин, для которой разница с C_t ПК составила 1,87 цикла.

Список литературы

1. Karlikow M, Pardee K. The Many Roads to an Ideal Paper-based Device. Paper-based Diagnostics. 2018 Dec 11 : 171–201. DOI: 10.1007/978-3-319-96870-4_6
2. Зайцева М.В., Антифеев И.Е., Петров Д.Г., Есикова Н.А., Макарова Е.Д. Оптимизация процесса лизиса для проточного выделения нуклеиновых кислот. Письма в Журнал технической физики. 2023. Т. 49. № 23. С. 32-34. DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56847.176A
3. Rahman MM, Elaissari A. Nucleic acid sample preparation for in vitro molecular diagnosis: from conventional techniques to biotechnology. Drug Discov Today. 2012 Nov;17(21-22):1199-207. doi: 10.1016/j.drudis.2012.07.001. Epub 2012 Jul 20. PMID: 22819926
4. Петров Д.Г., Макарова Е.Д., Корнева Н.А., Альдекеева А.С., Князьков Н.Н. Воздействие полей разной природы на выход ДНК при выделении из модельных растворов на двуокиси кремния. 1. Влияние температуры. ISSN 0868-5886 НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 2015, том 25, № 2, с. 91-101
5. Shehadul Islam M, Aryasomayajula A, Selvaganapathy PR. A Review on Macroscale and Microscale Cell Lysis Methods. Micromachines (Basel). 2017 Mar 8;8(3):83. doi: 10.3390/mi8030083. PMID: PMC6190294

6. Harrison S.T.L. Bacterial cell disruption: A key unit operation in the recovery of intracellular products. *Biotechnol. Adv.* 1991;9:217–240. doi: 10.1016/0734-9750(91)90005-G
7. P K Afonicheva, N A Esikova, A N Tupik and A A Evstrapov, Magnetic beads-based nucleic acids extraction in microfluidic chip, 2019 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1400 033012, doi 10.1088/1742
8. Konovalova L.V., Esikova N.A., Microfluidic device for n device for nucleic acids from environmental samples isolation

Исследование процесса абсорбции воды алифатическими полиэфирами

Дунаев А. Г.¹, Минаев Н.В.¹, Минаева С.А.¹, Попов В.К.¹, Трифанова Е.М.¹, Свиридов А.П.¹

¹НИИ «Курчатовский институт»

e-mail: dunaewan@gmail.com

Алифатические полиэфиры являются на сегодняшний день одними из основных материалов для создания биосовместимых и биodeградируемых изделий для широкого круга задач в медицине. Помимо носителей лекарственных средств, полиэфиры служат основой для создания матриц для тканеинженерных конструкций. Необходимость поддержания заданного профиля высвобождения лекарственных средств, или резорбции матрикса полностью соответствующей образованию живой ткани *de novo* делает требования к скорости резорбции материала-носителя критически важными.

Основным механизмом деградации биорезорбируемых полиэфиров является гидролиз, в результате которого из крупных макромолекул образуются более мелкие, в том числе водорастворимые олигомеры. Алгоритм деградации большинства полиэфиров в водных средах зависит, в частности, от соотношения скоростей переноса молекул воды и олигомеров в объеме полимера. Традиционно, для измерения коэффициента диффузии воды в полимере можно использовать начальный участок зависимости изменения веса образца от времени до того момента, пока процессы его гидролиза являются несущественными [1, 2]. Однако при этом, как правило, возникают трудности измерения малых изменений веса образца, связанные с нарушением его целостности и необходимостью его тщательной сушки. Кроме того, к недостаткам такого метода также следует отнести и то, что он не позволяет анализировать пространственное распределение концентрации воды в объеме исследуемого образца.

Альтернативный подход для исследования пространственно-временного распределения концентрации воды в полимерах может быть основан на измерении поглощения излучения инфракрасного (ИК) диапазона в области $1 \div 3$ мкм, то есть в области спектра, где вода имеет интенсивные полосы поглощения. Этот метод по нашим оценкам позволяет производить измерения концентрации воды в исследуемом полимере с относительной погрешностью 2-5%.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование процесса сорбции воды алифатическим полиэфиром и начальной стадии гидролиза последнего в течение пяти суток с применением предложенной и разработанной нами оригинальной методики, основанной на оптическом детектировании пространственного распределения концентрации воды в объеме полимера в реальном масштабе времени.

Методом литьевого прессования изготовили образцы размером $0,7 \times 2 \times 5$ мм³ на основе D,L-полилактида. Образцы помещали в проточную кювету, нагретую до 36 °С, таким образом, что вода контактировала со всеми гранями образца известной площади, образующими заданную поверхность диффузии. Распределение содержания воды по нормали между диффузионными границами измеряли по поглощению излучения тулиевого волоконного лазера. Излучение длиной волны 1960 нм и мощностью 100 мВт фокусировалось сканирующим устройством вдоль нормали со скоростью 0.1 мм/с и его интенсивность измерялась измерителем мощности излучения. Эксперимент был завершен на 15 сутки, когда значение интенсивности лазерного излучения, прошедшего через образец, стало практически равно нулю. Параллельно исследовали изменения морфологии образцов в процессе их деградации с помощью сканирующей электронной микроскопии. Было показано, что процесс гидролитической деградации закономерно приводит к увеличению микропористости образца.

Таким образом получены зависимости изменения концентрации воды в образце и морфологии его внутренней структуры с течением времени. Полученные данные будут использованы для построения математической модели диффузии воды в полимерный образец. Вопросы о механизмах и скоростях диффузии воды в полимерных системах являются принципиально важными для корректного описания процессов гидролитической деградации биodeградируемых материалов.

Исследование было выполнено при поддержке государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. Ishak Z.M., Berry J. Hygrothermal aging studies of short carbon fiber reinforced nylon 6.6 // Journal of Applied Polymer Science. - 1994. - 51. - 2145-2155.
2. S Ndazi B., Karlsson S. Study Of Water Transport Behaviour In Polylactide Plates Filled With Rice Hulls // Advanced Materials Letters. - 2016. - 7. - 872-877.

Желатиновая подложка для сбора ДНК

Гермаш Н. Н.¹, Зайцева М.В.¹, Петров Д.Г.¹, Антифеев И.Е.¹, Макарова Е.Д.¹

¹ИАП РАН

e-mail: yilatan_nata@mail.ru

Сбор и пробоподготовка нуклеиновых кислот являются ключевыми этапами анализа проб на содержание генетического материала [1]. Качество и количество собранного биологического материала напрямую влияют на результаты последующих молекулярно-

генетических исследований. Традиционные методы сбора ДНК с поверхности, такие как тампоны, липкие ленты и гель-лифтеры, имеют свои преимущества и недостатки, что требует поиска новых решений для повышения эффективности сбора [2]. Основной целью работы послужило сравнение эффективности сбора ДНК путём смыва с поверхности с использованием разработанного метода с применением разработанного гель-лифтера на основе желатина, глицерина, лимонной кислоты и воды.

В работе показана методика создания гель-лифтера с использованием: желатина, глицерина, лимонной кислоты и воды. В зависимости от пропорций компонентов полученная подложка меняет свои свойства упругости и липкости (адгезии к поверхности).

Проведены тесты влияния на гель-лифтер лизирующего раствора и воды при различных температурах. Экспериментальная оценка эффективности сбора нуклеиновых кислот с поверхности производилась с использованием пробы содержащей генетический материал *E.coli*. известной концентрации. Сбор ДНК из пятна пробы осуществляли путём прикладывания подложки к поверхности на которой находится проба, в течении 30 секунд, для сравнения на аналогичную подложку наносили аликвоту той же пробы. После чего подложки подвергали лизированию опуская в лизирующий раствор и нагревали. Дальнейшая пробоподготовка осуществлялась одинаково. Показано, что разработанный гель-лифтер хорошо растворяется в лизирующем растворе и не растворяется в воде при комнатной температуре, что потенциально может служить для использования данного гель-лифтера как инструмента для переноса пробы. Желатиновый гель лифтер растворяется без остатка при температуре выше 55 градусах за 3 минуты без остатка, при перемешивании.

В работе представлены результаты показывающие перспективность такого метода сбора ДНК, так как позволяют идентифицировать генетический материал с поверхности желатиновой подложки. Представлены результаты сбора генетического материала путём смыва с поверхности, что в основном используется в настоящее время.

Смыв с поверхности является классическим методом сбора ДНК. Он прост в применении и не требует высоких затрат. Однако, часто у этого метода низкая эффективность сбора ДНК с гладких и пористых поверхностей, а также потеря материала при транспортировке без специализированных носителей, а на поверхности ватной палочки.

Список литературы

1. Петров, Д. Г. Разработка экспериментальной установки для создания методик автоматизированного выделения нуклеиновых кислот на твердой фазе: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петров Дмитрий Григорьевич, 2023. 148 с.
2. Д. Г. Петров, Е. Д. Макарова, И. Е. Антифеев, М. В. Зайцева Сбор генетических биоматериалов (ДНК) с поверхностей: методы и устройства (обзор). Научное приборостроение. 2024. Т. 34, № 1. С. 81-106.

Взаимодействие комплексов SMC бактерий с ДНК в одномолекулярных экспериментах

Запрыгаева Е. Ю.¹, Морозова Н.Е.¹, Румянцева Н.А.¹, Кудрявцева М.А.¹, Сапожникова А.П.¹, Хасанова А.А.¹, Ведяйкин А.Д.¹

¹СПбПУ, ЛМБНСБ, НИК «Нанобиотехнологии»

e-mail: zapryagaeva.eyu@edu.spbstu.ru

Белки SMC (Structural Maintenance of Chromosomes) являются ключевыми компонентами одноименных комплексов SMC, которые играют важную роль в пространственной организации ДНК у всех живых организмов — от бактерий до эукариот. Эти комплексы являются важными регуляторами структуры хромосом, и их функциональная роль охватывает широкий спектр процессов, таких как поддержание структуры хромосом, репликация ДНК, репарация, сегрегация хромосом и защита от чужеродной ДНК [1]. У прокариот комплексы SMC представлены различными комплексами, например, SMC/ScpAB, MukBEF и MksBEF, которые включают гомодимеры SMC или SMC-подобных белков [2]. У эукариот комплексы SMC формируют похожие структуры, образуя гетеродимеры, такие как когезины, конденсины и комплекс SMC5-SMC6 [3].

Одним из ключевых механизмов, реализуемых комплексами SMC, является экструзия петель (англ. loop extrusion) – процесс, посредством которого из молекул ДНК формируются петлеобразные структуры. Экструзия петель играет значимую роль как у прокариот, так и у эукариот. Она обеспечивает компактизацию хромосом, необходимую для правильного распределения реплицированных геномов между дочерними клетками при клеточном делении, а также участвует в формировании топологически ассоциированных доменов, которые влияют на регуляцию транскрипции и поддержание генетической стабильности. Благодаря этому механизму клетки способны не только упаковывать ДНК в компактные структуры, но и регулировать процессы репликации, репарации и сегрегации хромосом [4, 5, 6]. Интересно, что до сих пор экструзия петель была показана в основном для комплексов SMC эукариот, тогда как для бактериальных комплексов SMC имеются лишь ограниченные данные, не позволяющие сделать однозначный вывод о их способности к экструзии петель.

Основная задача данной работы заключалась в реализации экструзии петель в микрофлюидных устройствах для изучения свойств комплексов SMC *Ureaplasma parvum* и *Bacillus subtilis* на одномолекулярном уровне. В рамках экспериментов были созданы и оптимизированы протоколы подготовки образцов для визуализации отдельных молекул ДНК. Молекулы ДНК (линеаризованная ДНК бактериофага λ) фиксировались на поверхности стекла, покрытых стрептавидином. Для этого концы молекул ДНК были модифицированы с помощью биотина, что обеспечивало их специфическое прикрепление к поверхности. Визуализация осуществлялась при помощи флуоресцентной микроскопии с использованием микрофлюидного устройства, содержащего покровное стекло с закрепленными молекулами ДНК.

Разработанные протоколы позволили наблюдать взаимодействие ДНК с различными ДНК-связывающими агентами, включая интеркалирующие красители, а также с белками комплексов SMC.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-74-10022

Список литературы

1. Yatskevich S, Rhodes J, Nasmyth K. Organization of Chromosomal DNA by SMC Complexes. *Annu Rev Genet.* 2019 Dec 3;53:445-482. doi: 10.1146/annurev-genet-112618-043633. Epub 2019 Oct 2. PMID: 31577909.
2. Nolivos S, Sherratt D. The bacterial chromosome: architecture and action of bacterial SMC and SMC-like complexes. *FEMS Microbiol Rev.* 2014 May;38(3):380-92. doi: 10.1111/1574-6976.12045. Epub 2013 Nov 18. PMID: 24118085; PMCID: PMC4255302.
3. Mäkelä J, Sherratt D. SMC complexes organize the bacterial chromosome by length-wise compaction. *Curr Genet.* 2020 Oct;66(5):895-899. doi: 10.1007/s00294-020-01076-w. Epub 2020 Apr 16. PMID: 32300862; PMCID: PMC7497336.
4. Kim E, Barth R, Dekker C. Looping the Genome with SMC Complexes. *Annu Rev Biochem.* 2023 Jun 20;92:15-41. doi: 10.1146/annurev-biochem-032620-110506. Epub 2023 May 3. PMID: 37137166.
5. Davidson IF, Bauer B, Goetz D, Tang W, Wutz G, Peters JM. DNA loop extrusion by human cohesin. *Science.* 2019 Dec 13;366(6471):1338-1345. doi: 10.1126/science.aaz3418. Epub 2019 Nov 21. PMID: 31753851.
6. Ganji M, Shaltiel IA, Bisht S, Kim E, Kalichava A, Haering CH, Dekker C. Real-time imaging of DNA loop extrusion by condensin. *Science.* 2018 Apr 6;360(6384):102-105. doi: 10.1126/science.aar7831. Epub 2018 Feb 22. PMID: 29472443; PMCID: PMC6329450.
7. Pradhan B, Deep A, König J, Baaske MD, Corbett KD, Kim E. Loop-extrusion-mediated plasmid DNA cleavage by the bacterial SMC Wadjet complex. *Mol Cell.* 2025 Jan 2;85(1):107-116.e5. doi: 10.1016/j.molcel.2024.11.002. Epub 2024 Dec 2. PMID: 39626662.

Влияние редкоземельных примесей на структурные свойства материалов на основе фосфата кальция методом ЭПР-спектроскопии

Садовникова М. А.¹, Шуртакова Д.В.¹, Мамин Г.В.¹, Мурзаханов Ф.Ф.¹, Гольдберг М.А.², Комлев В.С.², Гафуров М.Р.¹

¹КФУ

²ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова

e-mail: margaritaasadov@gmail.com

Исследуемые системы фосфата кальция (ФК) широко используются в биомедицинских приложениях, в частности в ортопедии и челюстно-лицевой хирургии, в качестве заполнителей дефектов костей, образовавшихся в результате травм или различных заболеваний [1]. ФК играют важную роль в тканевой инженерии, доставке лекарственных препаратов

и генов и многих других биомедицинских приложениях [1]. Введение в кристаллическую структуру ФК ряда редкоземельных (РЗЭ) элементов, а именно церия (Ce^{3+}), неодима (Nd^{3+}), европия (Eu^{2+}), гадолиния (Gd^{3+}) и эрбия (Er^{3+}), позволяет получать системы для биовизуализации, повышающие контрастность при изучении динамики восстановления костной ткани [2].

Таким образом, настоящее исследование сосредоточено на характеристике синтетического ФК, легированного редкоземельными ионами, с использованием методов непрерывного и импульсного электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Синтез ФК, содержащего ионы РЗЭ, осуществлялся методом осаждения из водных растворов солей [3].

Образцы порошков фосфата магния-кальция с примесными центрами гадолиния исследовались методом ЭПР при температуре $T = 297 \text{ K}$, поскольку ион Gd^{3+} является единственным трехвалентным РЗЭ, который можно наблюдать при комнатных условиях. Кристаллическая решетка ФК без парамагнитных примесей не содержит ионов с ненулевым электронным спином, что приводит к отсутствию сигнала ЭПР. Наличие резонансного сигнала малой интенсивности ($g \approx 2$) для номинально чистого образца свидетельствует о наличии в структуре неконтролируемой примеси, обусловленной используемыми реагентами. Так как образец находится в виде порошка, а параметры тонкой структуры имеют сильную зависимость ориентации нанокристалла от внешнего магнитного поля, соответственно, в спектре ЭПР присутствуют резонансные вклады от всех равновероятных положений нанокристаллов, что приводит к неоднородному уширению линий спектра ЭПР. Стоит также отметить, что уширение линии резонансного поглощения обусловлено тем, что ион Gd^{3+} характеризуется сильным спин-решеточным взаимодействием и чрезвычайно короткими временами продольной релаксации. На основании зарегистрированных сигналов ЭПР с g -факторами ($g_{\text{eff}} = 5,8$, $g_{\text{eff}} = 2,8$ и $g = 1,9$) можно однозначно сделать вывод о внедрении Gd^{3+} в кристаллическую решетку исследуемого образца. Анализ интенсивностей спектров ЭПР для двух различных концентраций гадолиния (0,5% Gd и 1% Gd) свидетельствует о том, что предложенный метод синтеза позволяет ввести в структуру ФК заявленное при химическом синтезе количество примесных центров (интегральная интенсивность отличается в 2 раза). Типичный диапазон обнаружения сигнала Er^{3+} составляет до 20 K, при температурах выше 30 K сигнал ЭПР обычно не наблюдается, поэтому эксперимент проводился при температуре образца 10 K. В поликристаллических системах все ориентации кристаллов статистически равновероятны. В результате спектр ЭПР порошка представляет собой суперпозицию всех ориентаций нанокристаллов. Согласно литературным данным [4] сигнал при g -факторе 11,8 относится к РЗЭ-элементу Er^{3+} . Обнаруженные в спектре ЭПР слабые структурные перегибы, возможно, связаны с возникновением сверхтонкой структуры в результате взаимодействия с изотопом ^{167}Er с ядерным спином $I = 7/2$ (распространенность 23%). Также наличие резонансных кривых малой интенсивности может быть обусловлено наличием различных неконтролируемых примесей на поверхности образца или в междоузлиях кристаллической решетки. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о внедрении ионов Er^{3+} в кристаллическую решетку гидроксиапатита в предлагаемом методе синтеза.

Таким образом, показано, что метод ЭПР является эффективным экспериментальным инструментом для изучения катионного легирования. На основании полученных результатов с использованием возможностей современных методов импульсной ЭПР-спектроскопии могут быть использованы для исследования функциональных биоматериалов, легированных редкоземельными элементами.

Список литературы

1. Abdul Halim N. A., Nanomaterials-upconverted hydroxyapatite for bone tissue engineering and a platform for drug delivery, *International Journal of Nanomedicine*, 6477-6496, 2021
2. Mondal S., Rare earth element doped hydroxyapatite luminescent bioceramics contrast agent for enhanced biomedical imaging and therapeutic applications, *Ceramics International*, 46 (18), 29249-29260, 2020
3. Petrakova N. V., Synthesis and characterization of luminescent cerium-doped hydroxyapatite, *Ceramics International*, 50 (12), 20905-20916, 2024
4. Gorni G., Effect of dopant precursors on the optical properties of rare-earths doped oxyfluoride glass-ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 103 (7) 3930-3941, 2020

Флуоресцентная микроскопия для визуализации взаимной локализации белков RecA и RecN внутри клеток E.coli

Нестеренко В. А.¹, Рошкетаява В.Д., Морозова Н.Е

¹СПбПУ

e-mail: leklerka718@gmail.com

SOS-ответ – важный процесс, возникающий в бактериальной клетке в ответ на повреждение ДНК, вызванное теми или иными факторами окружающей среды (УФ излучение, радиация и др.). Результатом протекания SOS-ответа может являться точное восстановление поврежденных участков ДНК, а также адаптация бактерии к повреждающему воздействию за счет повышенного мутагенеза в клетках бактерий. В том числе, в результате мутаций может возникать устойчивость к антибиотикам, которая является одной из самых важных проблем современной медицины [1].

Одним из ключевых белков SOS-ответа является рекомбиназа RecA, участвующая в точном восстановлении двунитевых разрывов ДНК. Однако кроме RecA, в SOS-ответе участвуют и другие белки, в том числе, SMC-подобный белок RecN, экспрессирующийся на самых ранних этапах процесса восстановления. Функциональная активности белка RecN малоизучена, однако показано, что данный белок крайне важен для восстановления целостности ДНК [2-3].

Флуоресцентная микроскопия – мощный метод, позволяющий получать уникальные данные о локализации и уровнях экспрессии тех или иных белков внутри одиночных клеток бактерий. Методы флуоресцентной микроскопии позволяют изучать как фиксированные, так и живые бактериальные клетки. Данная работа посвящена визуализации отдельных

бактериальных белков в живых клетках *E. coli*, находящихся в состоянии SOS-ответа, с помощью флуоресцентной микроскопии и использования флуоресцентных белков.

Для визуализации белков SOS-ответа внутри клеток, было выполнено редактирование геномов бактерий с целью создания штаммов с флуоресцентно-мечеными белками RecA и RecN в их геноме. При этом последовательность гена белка RecA была слита с последовательностью флуоресцентного белка mNeonGreen, а последовательность гена белка RecN была слита с последовательностью флуоресцентного белка mScarlet. Редактирование геномов бактерий было выполнено с помощью технологий CRISPR-Cas.

Установление новых деталей реализации и регуляции бактериального SOS-ответа чрезвычайно актуально для разработки новых эффективных способов подавления данного процесса с целью борьбы с адаптацией патогенных бактерий к антибиотикам.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-74-00085, <https://rscf.ru/project/24-74-00085/>.

Список литературы

1. Podlesek Z. et al., The DNA Damage Inducible SOS Response Is a Key Player in the Generation of Bacterial Persister Cells and Population Wide Tolerance. / Podlesek Z., Žgur Bertok D. // Front. Microbiol, 2020. — Vol. 11. — P. 1785.
2. Odsbu I. et al., DNA compaction in the early part of the SOS response is dependent on RecN and RecA. / Odsbu I., Skarstad K. // Microbiology, 2014. — Vol.160 N 5. — P. 872-882.

Матфизика и численные методы

Аналитическое решение начально-краевых задач на конечном интервале в рамках гиперболического уравнения теплопроводности

Руколайне С. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: rukol@ammp.ioffe.ru

Уравнение теплопроводности $\partial_t T - \alpha \Delta T = 0$, где T - температура, α - коэффициент температуропроводности, обычно используется для описания теплопроводности в однородных изотропных средах. Уравнение теплопроводности получается из уравнения баланса тепловой энергии $CT_t + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0$ и закона Фурье $\mathbf{q} = -\kappa \nabla T$, где C - объемная теплоемкость, $\mathbf{q}$ - вектор теплового потока, κ - коэффициент теплопроводности.

Уравнение баланса тепловой энергии это точное выражение закона сохранения тепловой энергии. Закон Фурье, в свою очередь, это соотношение, приближенно выражающее связь между тепловым потоком и температурой. Закон Фурье можно рассматривать как феноменологическое соотношение. В классической неравновесной (слабо неравновесной) термодинамике закон Фурье выводится в предположении справедливости локального термодинамического равновесия. Однако это предположение нарушается на микро- и наноуровне, в сверхбыстрых процессах и при низких температурах [1,2]. Кроме того, уравнение теплопроводности нарушает принцип причинности из-за бесконечной скорости распространения тепловой энергии в этой модели.

Простейшая и, по-видимому, самая "знаменитая" модификация закона Фурье выражается определяющим уравнением $\tau \mathbf{q}_t + \mathbf{q} = -\kappa \nabla T$, где τ - время релаксации. Модифицированный закон Фурье это первое и простейшее определяющее уравнение, которое выводится в рамках различных расширенных термодинамик: рациональной расширенной термодинамики [3], расширенной необратимой термодинамики [4] и неравновесной термодинамики с внутренними переменными [5].

Из уравнения баланса тепловой энергии и модифицированного закона Фурье следует, что температура удовлетворяет так называемому гиперболическому уравнению теплопроводности. Это уравнение гиперболическое, поэтому в рамках такой модели

теплопроводности скорость распространения тепловой энергии конечна, и эта модель не противоречит принципу причинности.

Решение задачи Коши (во всем пространстве) для этого и других уравнений, возникающих в рамках расширенных термодинамик, и анализ решений этой задачи не представляет большой сложности [6-8]. Однако решение начально-краевых задач (в ограниченной области) может наталкиваться на существенные трудности. Ниже для простоты мы ограничимся одномерным пространством.

В одномерном пространстве гиперболическое уравнение теплопроводности имеет вид $\tau T_{tt} + T_t - \alpha T_{xx} = 0$.

Если оба граничных условия (на концах интервала) задают температуру, то аналитическое решение такой начально-краевой задачи может быть легко найдено методом Фурье или операционным методом (преобразованием Лапласа). Если оба граничных условия задают тепловой поток, то аналитическое решение такой задачи также может быть легко найдено. Действительно, тепловой поток удовлетворяет тому же уравнению, что и температура: $\tau q_{tt} + q_t - \alpha q_{xx} = 0$. В этом случае сначала находится решение начально-краевой задачи для этого уравнения, а затем температура находится из уравнения баланса тепловой энергии (в одномерном пространстве).

Однако могут задаваться и другие граничные условия, например, на одной или обеих границах может задаваться граничное условие, выражающее закон Ньютона, согласно которому тепловой поток на границе прямо пропорционален разности температур тела и окружающей среды. В этом случае начально-краевая задача не может быть сформулирована ни для гиперболического уравнения теплопроводности, ни для гиперболического уравнения для теплового потока. Задача должна ставиться для системы, состоящей из уравнения баланса тепловой энергии и модифицированного закона Фурье. В этом случае метод Фурье неприменим. Операционный метод также не позволяет получить решение. Однако такие задачи можно решить методом единого преобразования Фокаса [9-11]. В этом докладе мы применяем метод Фокаса для решения этих задач.

Список литературы

1. Z. M. Zhang. *Nano/Microscale Heat Transfer*. Springer, Cham, 2020.
2. G. Chen. Non-Fourier phonon heat conduction at the microscale and nanoscale. *Nat. Rev. Phys.*, **3**:555-569, 2021.
3. Muller and T. Ruggeri. *Rational Extended Thermodynamics*. Springer, New York, 1998.
4. D. Jou, J. Casas-Vazquez, and G. Lebon. *Extended Irreversible Thermodynamics*. Springer, New York, 2010.
5. P. Van and T. Fulop. Universality in heat conduction theory: weakly nonlocal thermodynamics. *Ann. Phys. (Berlin)*, **524**:470-478, 2012.
6. S. A. Rukolaine and A. M. Samsonov. Local immobilization of particles in mass transfer described by a Jeffreys-type equation. *Phys. Rev. E*, **88**:062116, 2013.
7. S. A. Rukolaine. Hyperbolicity of the ballistic-conductive model of heat conduction: the reverse side of the coin. *Z. Angew. Math. Phys.*, **75**:50, 2024.

8. S. A. Rukolaine. Behavior of the linearized ballistic-conductive model of heat conduction in three-dimensional space. *Tech. Phys.*, **69**:1765-1768, 2024.
9. S. Fokas. *A Unified Approach to Boundary Value Problems*. SIAM, Philadelphia, 2008.
10. Deconinck, T. Trogdon, and V. Vasan. The method of Fokas for solving linear partial differential equations. *SIAM Rev.*, **56**:159-186, 2014.
11. Deconinck, Q. Guo, E. Shlizerman, and V. Vasan. Fokas's unified transform method for linear systems. *Quart. Appl. Math.*, **76**:463-488, 2018.

О решении гомотопии задач Эйлера продольного изгиба в области нелинейных деформаций для однородной колонны с полужёстко закреплёнными концами

Чистяков В. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: chistiakov_v_v@rambler.ru

Ранее для однородной консоли АВ длиной l_0 , площади S и минимального радиуса инерции i_x был развит новый способ решения задачи Эйлера, оперирующий безразмерным тангенсом угла наклона оси $p=dy/dz=\operatorname{tg}\theta$ и опирающийся на ключевое условие на восстановленную её длину $\Lambda(F,pf)=l_0$ [1], где F - продольная сила, pf - наклон у свободного конца В. Это позволяло строго учесть а) нелинейность инженерной диаграммы сжатия $\epsilon(\sigma)$, б) предъизгибающее укорочение оси ϵ_{cr} и, в) рассматривая это условие как уравнение для неявной функции $pf(F)$, построить её график и г) найти самую критическую силу F_{cr} .

Предельный переход при $pf \rightarrow +0$, даёт уравнение связи между критическим напряжением $\sigma_{cr}=F_{cr}/S$ и гибкостью $\lambda=l_0/i_x$ колонны. В [2] так получена система уравнений для решения гомотопии задач Эйлера нахождения σ_{cr} для колонны с произвольной $\sigma(\epsilon)$ и с $\lambda > \lambda_{\min}$ при снабжении как неподвижного А, так и скользящего В концов поворотными пружинами 1 и 2 жёсткостей $\gamma_{1,2}, H \cdot m$ от 0 (шарнир) до ∞ (жёсткая заделка). Решение системы попутно даёт по шкале отношений профиль инфинитизимального изгиба [3]. В качестве $\sigma(\epsilon)$ служили: многочлены степени $n=3$ и 4, кривые Рамберга - Остуда, интегралы от $E\epsilon(\sigma)=(d\epsilon/d\sigma)^{-1}$ - касательного модуля упругости в виде рациональных дробей 3:2, 3:1, 2:2.

Ведением т.н. приведённых жёсткостей $\mu_{1,2}=\gamma_{1,2}/S i_x$ Па и предельных (при $F \rightarrow F_{cr}+0$) отношений $\chi_1=q_1/p_1$, $\chi_2=q_2/p_2 \geq 1$ наклонов оси в точках перегиба q_1, q_2 к наклонам p_1, p_2 в опорах, а также - $\chi_3=p_2/p_1 < 0$ система уравнений [2] приобретала вид:

$$\frac{\mu_1 + \mu_2 \chi_3}{\sigma \lambda (1 - \varepsilon(\sigma))} + \frac{\chi_1 + \chi_2 \chi_3}{2} = 0, (\chi_1 - 1)(1 - \chi_2 \chi_3) = \frac{\mu_1^2}{\sigma E_t(\sigma)}, (\chi_2 - 1) \left(1 - \frac{\chi_1}{\chi_3}\right) = \frac{\mu_2^2}{\sigma E_t(\sigma)}$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{E_t(\sigma)}}{\sqrt{\sigma(1 - \varepsilon(\sigma))}} \left(2\pi - \arcsin\left(\frac{\chi_3 - 0.5(\chi_1 + \chi_2 \chi_3)}{0.5(\chi_2 \chi_3 - \chi_1)}\right) - \arcsin\left(\frac{1 - 0.5(\chi_1 + \chi_2 \chi_3)}{0.5(\chi_1 - \chi_2 \chi_3)}\right) \right). \quad (1)$$

Формально через решение уравнения 4-й степени можно найти величины $\chi_i(\lambda, \sigma)$ из первых 3-х уравнений (1) и, подставив их в 4-е, получить мега-громоздкое уравнение для неявной функции $\sigma(\lambda)$. Однако компактное решение получается в случаях: $\gamma_1 = \gamma_2$ ($\Rightarrow p_1 = -p_2$, $q_1 = -q_2$), а также "пружина+шарнир" и "пружина+жёсткая заделка", дающих верные результаты в своих пределах ("заделка+шарнир" и "2 заделки/2 шарнира") для закона Гука $\varepsilon = \sigma/E_0$.

Уменьшающие поправки на касательные напряжения $\tau, \text{Па}$ получаются заменами, предложенными ещё в 19 веке Ф.Энгессером, например, $\sigma_{cr} \rightarrow \sigma_{cr}(1 + \xi \sigma_{cr}/G)$, $G, \text{Па}$ - модуль сдвига, $\xi \leq 3/2$ - отношение касательных напряжений на оси $\tau(0)$ к среднему по сечению $\tau_{cp} = Q/S$, $Q = F \sin \theta$.

Для определения параметров профиля изгиба колонны $y(z)$ при конечных углах $\theta \sim 1$ была сформулирована [2,3] система алгебро-интегральных уравнений, непростая даже без учёта напряжений $\tau, \text{Па}$. Однако симметричные предельные случаи "2-заделки/2 шарнира" сводятся к хорошо исследованной в литературе (но без учёта нелинейности $\sigma(\varepsilon)!$) консоли и допускают пертурбативный их $(\tau, \text{Па})$ учёт. Латеральное перемещение оси представляется суммой $y(p) = y_1(p) + y_2(p)$, где $y_1(p)$ - вклад от изгиба, $y_2(p)$ - малая добавка от сдвига, $p = \tan \theta$ - наклон оси без учёта $\tau, \text{Па}$. Суммарный угол поворота оси корректируется как $\phi = \theta + (\xi F/SG) \sin \theta$, и нетрудно в 1-м приближении по $\beta = \xi F/SG \ll 1$ получить

$$y_2(p) \approx \beta \int_0^z y_{1z'}' \sqrt{y_{1z'}'^2 + 1} dz'(p') = \beta \left(y_1(p) \sqrt{1 + p^2} - \int_0^p \frac{p' y_1(p')}{\sqrt{1 + p'^2}} dp' \right) \quad (2).$$

Подстановка (2) в уравнение равновесия даёт интегро-дифференциальное уравнение относительно перемещения $y_1(p)$ (под знаком интеграла заменяется невозмущённым $y_1^{(0)}(p)$ [1]), и с пересчётом момента жёсткой заделки (А) M_A в ключевом условии на равенство восстановленной длины даёт добавку, пропорциональную малому параметру δ , приводящую к увеличению наклона p_f при той же нагрузке F на величину порядка 0.5..2 % при $\xi_{\max} = 1.5$.

Установлено численным моделированием в Maple 2023, что в закритической области для максимальных углов наклона оси $\theta_f < 25^\circ$ справедлив с точностью $\sim 1\%$ закон секанса: $\sec \theta_f \approx 1 + k(F - F_{cr})$ (3).

При этом нелинейность вышеозначенных диаграмм $\sigma(\epsilon)$ уменьшает на десятки %% величину F_{cr} при одновременном увеличении множителя k по сравнению с законом Гука, что на порядок больше учитываемого далее эффекта от касательных напряжений.

Список литературы

1. Chistyakov V.V., Soloviev S.M., Buckling in inelastic regime of a uniform console with symmetrical cross section: computer modeling using Maple 18, Discrete&Continuous Models&Applied Computational Science, vol. 31(2), 174-188, 2023
2. Чистяков В.В., Условие на восстановленную длину - новый подход к определению критической нагрузки продольного изгиба колонны в упруго-пластической области деформаций, Материалы международной научной конференции по механике Х Поляховские чтения, 583-588, 23-27.09, 2024, СПб
3. Чистяков В.В., Соловьев С.М., Новый метод определения критической нагрузки у колонны, опираемой на поворотные пружины, в нелинейной области деформаций, Известия РАН. Механика твердого тела, №. 2, ...-., 2025 г. (Принята к печати, выход март- апрель с.г.)

NELM – открытое программное обеспечения для анализа импедансных спектров. Применение для исследования полупроводников и биоэлектродов

Бойцова Н. А.¹, Абелит А. А.¹, Ступин Д. Д.¹

¹Академический университет им. Ж.И. Алфёрова

e-mail: natab2002@yandex.ru

На сегодняшний день методы электрической импедансной спектроскопии (ЭИС) прочно вошли в научный обиход как инструмент изучения различных материалов, в том числе полупроводниковых [1] и биологических [2]. В тоже время, несмотря на хорошо развитые теоретические и экспериментальные основы ЭИС, проблема создания программного обеспечения, предназначенного для всестороннего анализа импедансных спектров, сегодня по-прежнему актуальна, т.к. имеющиеся программные пакеты либо имеют закрытый исходный код, либо обладают ограниченным функционалом. Для того чтобы преодолеть этот разрыв, нами было разработано MatLab/GnuOctave программное обеспечение NELM (доступно по запросу), основанное на нелинейном комплексном методе наименьших квадратов [3] и методе эквивалентных схем.

В данной работе мы продемонстрировали потенциал использования нашей программы для изучения интерфейсных явлений в полупроводниках и биоэлектродах. В качестве примера полупроводниковых устройств мы выбрали кремниевые фотоэлектрические элементы, а именно фотодиод BPW 20 RF (Vishay, США) и солнечный элемент от Dobraya Energia (Dobraya Energia, Россия). Для изучения свойств биоэлектродов (контакта металл-электролит) были использованы коммерческая мультиэлектродная матрица 60StimMEA200/30-Ti (MultiChannels Systems, Германия), обладающая TiN электродами, а

также изготовленная в нашей лаборатории самодельная биосовместимая мультиэлектродная матрица с оловянными электродами SuperLitho.

В ходе исследования полупроводников мы обнаружили, что значение CPE экспоненты для обоих приборов близко к единице и не зависит от напряжения смещения, то есть рп-переходы в них работают как идеальные конденсаторы, что согласуется с классической теорией полупроводников [4]. Далее мы показали, что импедансный спектр фотодиода может быть описан последовательной RC-цепью, в то время как спектр солнечного элемента хорошо описывается параллельной RC-цепью. Это означает, что в отличие от идеального рп-перехода в фотодиоде в рп-переходе солнечного элемента присутствуют шунтирующие дефекты. Такое различие может быть связано с экономическими причинами, так как производство бездефектных солнечных батарей не всегда является экономически выгодной технологией. Также мы обнаружили, что CV кривые обоих приборов соответствуют случаю резких рп-переходов, а полученное из них значение диффузионного потенциала оказалось близким к 0,7 В. Для фотодиода Vishay это напряжение близко к значению диффузионного потенциала, которое мы аналогичным образом получили из оцифрованного CV-графика для паспорта к BPW 20 RF [5].

В процессе исследования биоэлектродов мы обнаружили, что они в отличие от полупроводниковых приборов лучше всего описываются с помощью эквивалентных схем, состоящих из R-CPE цепей, то есть из неидеальных конденсаторов: в случае TiN электрода спектр хорошо описывается одной R-CPE цепью, а в случае Sn-электродов понадобились две параллельных R-CPE-цепи для полноценного описания их электрических свойств. Также было замечено, что значение CPE-экспонент для обоих электродов наблюдаются в диапазоне 0.6–0.95.

Таким образом, в данном исследовании мы показали, что с помощью NELM можно осуществлять многопараметрическую диагностику как полупроводниковых интерфейсов, так и биоспецифичных электродов. Мы надеемся, что разработанное нами программное обеспечение окажется полезным инструментом для полупроводниковых исследований, а также для решения задач медицины и биологии.

Работа выполнена при поддержке проекта FSRM-2024-0001.

Список литературы

1. D. Crain, S. Rock, J. Garland, D. Roy, Comparison of dc and ac electroanalytical methods for measuring diode ideality factors and series resistances of silicon solar cells, *Current Applied Physics* 13 (9) (2013) 2087–2097.
2. D. D. Stupin, E. A. Kuzina, A. A. Abelit, A. K. Emelyanov, D. M. Nikolaev, M. N. Ryazantsev, S. V. Koniakhin, M. V. Dubina, Bioimpedance spectroscopy: Basics and applications, *ACS Biomaterials Science & Engineering* 7 (6) (2021) 1962–1986.
3. Macdonald, J. Ross, J. Schoonman, and A. P. Lehen. «Applicability and power of complex nonlinear least squares for the analysis of impedance and admittance data.» *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry* 131 (1982): 77-95.
4. Зи, С.М., Физика полупроводниковых приборов, Рипол Классик (1973).
5. Vishay Semiconductors, BPW20RF manual, Fig.6, Rev. 1, 19–Mar–02.

Моделирование влияния радиационного теплообмена на фронт кристаллизации β -Ga₂O₃ в процессе роста из расплава по методу Чохральского

Шапенков С. В.¹, Годяев М.В.^{1,2}, Крымов В.М.¹, Галактионов Е.В.¹

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

e-mail: seva.shapenkov@yandex.ru

Оксид галлия (Ga₂O₃) является ультра-широкозонным полупроводником ($E_g \sim 4,4 - 5,3$ эВ), перспективным для создания силовой электроники и детекторов УФ нового поколения. Термостабильная β -фаза Ga₂O₃ может быть получена методом роста из расплава и имеет температуру плавления ~ 1850 °С. Интерес представляют массивные були, выращиваемые методом Чохральского (Cz), в связи с необходимостью получать подложки различных ориентаций для производства приборов. На сегодняшний день, метод роста Ga₂O₃ по Cz очень длительный - средняя скорость вытягивания кристалла из расплава ~ 3 мм/ч [1].

Для оптимизации процесса без проведения большого количества опытов часто обращаются к методам моделирования. В работе [2] рассчитано тепловое поле для ростового процесса Ga₂O₃ по методу Cz, по результатам которого были сделаны оценки значений термических напряжений и продемонстрирована их сильная анизотропия в кристалле Ga₂O₃. В [3] исследовано влияние увеличения диаметра (масштабирования) вытягиваемой були Ga₂O₃ до 6 дюймов ($\sim 15,24$ см) на тепловые потоки и фронт кристаллизации (ФК). Авторы пришли к выводу, что с увеличением диаметра кристалла в центре и по краям ФК появляются вогнутые промежутки, приводящие к нарушению цилиндрической симметрии кристалла - спиральному росту. По их мнению, это связано с неравномерными потоками вещества в расплаве вдоль ФК. В работе [4] исследованы перспективы использования верхнего кольцеобразного экрана (insulation lid) в конструкции зоны роста. Предложенное решение привело к более плавной выпуклой форме ФК, что блокировало возможность спирального роста. С другой стороны, в перечисленных исследованиях влияние концентрации свободных носителей заряда, обусловленных в первую очередь вакансиями кислорода, на поглощение теплового излучения растущим кристаллом учитывается только формально: концентрация считается равномерно распределенной по его объему. Однако, факт изменения свойств объемных кристаллов Ga₂O₃ в атмосфере роста с неравномерной концентрацией кислорода хорошо известен [5], так как часто проявляется в постепенном окрашивании Ga₂O₃ вдоль направления вытягивания из расплава [6].

В данной работе приведены результаты компьютерного моделирования роста кристаллов методом Cz из расплава β -Ga₂O₃ в среде CGSim (Crystal Growth Simulator) с учетом теплового излучения через растущий кристалл и без его учета (полное поглощение). Были рассмотрены крайние ситуации, так как CGSim в базовой комплектации не позволяет учитывать изменение поглощения теплового излучения вдоль длины кристалла. За основу расчетов взята схема установки, используемая для роста Ga₂O₃ по методу Cz в иридиевом

тигле, нагреваемом индуктором и теплоизолированным экранами из ZrO_2 керамики. Вычисления проведены для кристалла диаметром 20 мм при различных положениях тигля и высоты расплава относительно индуктора. Скорость роста и вращения были приняты постоянными и равными 5 мм/ч и 6 об/мин, соответственно. Физические свойства для использованных материалов взяты из работ [2-4].

Изначальный ФК задан плоским. Для каждой сессии были построены треугольные сетки для решения соответствующих уравнений переноса. Положение тройной точки было зафиксировано. Вдоль ФК были выделены две специальные области в растущем кристалле и расплаве, соответственно, в которых строилась прямоугольная сетка с увеличенной плотностью узлов. Расчет формы ФК проводился с помощью определения вертикальной компоненты скорости роста на основании рассчитанного теплового поля на границе фаз, а затем с ее учетом выполнялся перенос узлов ФК с перестроением его профиля. Во всех рассмотренных задачах ФК резко изменялся с вогнутого на выпуклый при добавлении расчета теплового излучения через растущий кристалл. Выпуклый ФК вблизи центральной части испытывал изгиб внутрь кристалла, подобный описанному в [3]. Положение же тигля и расплава сказывалось только на искривленности ФК в центре и на краях.

Таким образом, было продемонстрировано сильное влияние радиационного механизма теплообмена на форму ФК для кристалла малого диаметра (20 мм). Изменение потока теплового излучения через растущий кристалл напрямую связано с концентрацией вакансий кислорода (свободных носителей заряда). Оно может быть вызвано флуктуациями концентрации кислорода в атмосфере вблизи вытягиваемой були Ga_2O_3 и, следовательно, должно учитываться при расчете тепловых зон роста.

Список литературы

1. Z. Galazka, J. Appl. Phys. **131**, 031103 (2022).
2. W. Miller et al., Crystals **7**, 26 (2017).
3. X. Tang et al., Crystals **11**, 25 (2020).
4. D. Wu et al., Crystals **12**, 1715 (2022).
5. M. R. Lorenz et al., J. Phys. Chem. Solids **28**, 403 (1967).
6. E. G. Villora et al., J. Cryst. Growth **270**, 420 (2004).

Анализ чувствительности характеристик фильтров на круглых волноводах к погрешности производства

Губский Д. С.¹, Земляков В.В.², Крутиев С.В.¹, Лонкина Д.В.¹

¹Южный федеральный университет

²ООО «Техкомпания Хуавей»

e-mail: ds@sfedu.ru

Широкое использование в СВЧ технике цилиндрических волноводящих структур, обладающих селективными свойствами [1], делает необходимым изучение их электродинамических характеристик. При этом в качестве резонаторов могут использоваться различные неоднородности сложного поперечного сечения, что делает актуальным изучение не

только их электродинамических характеристик [2], но и создание на их основе различных фильтров [3].

При проектировании СВЧ устройств используются различные пакеты компьютерного моделирования, особенно при оптимизации электродинамических характеристик селективных устройств. Известно, что многопараметрическая оптимизация трудоемкий процесс, требующий больших затрат машинного времени. При этом затрачиваемое время сильно зависит от выбора начального приближения. В итоге получается, что выбор конструкции прототипа фильтра и его первоначальных размеров важен и влияет на эффективность использования в дальнейшем пакетов компьютерного моделирования и проведение многопараметрической оптимизации.

Разработанный нами подход позволил смоделировать СВЧ фильтры на круглых волноводах, в которых в качестве резонаторов были использованы диафрагмы в форме радиального гребня и кольцевого сегмента конечной толщины [3]. Проведенное сравнение рассчитанных характеристик и экспериментальных данных показало хорошее совпадение, что подтвердило высокую точность разработанной методики.

Однако, необходимо отметить, что сложный профиль резонансных диафрагм (рис. 1 [3]) затрудняет высокую точность их изготовления и накладывает жесткие допуски. Поэтому в данной работе сделан акцент на изучение зависимости электродинамических характеристик фильтров при незначительном изменении геометрических размеров резонансных диафрагм. И наша задача выяснить, как неточности изготовления сказываются на электродинамических характеристиках. Отклонение каких параметров оказывает более существенное влияние на параметры селективного устройства. Для этого было исследовано изменение характеристик полосно-пропускающих фильтров при незначительном отклонении их геометрических размеров от оптимальных.

Рассмотрим кратко полученные результаты для фильтра пятого порядка.

Проведенное исследование зависимость модуля коэффициента отражения при изменении внешнего радиуса кольцевого сегмента r_2 (рис. 1 [3]) показало его незначительное влияние на добротность резонатора, так отклонение размера на 0,05 mm (меньше 2%) приводит к изменению модуля S_{11} всего на 2-3 дБ. Поэтому ошибки в изготовлении (неточности размеров) не приводят к существенным изменениям характеристики фильтра в полосе рабочих частот.

В работе также исследовано влияние размера радиального гребня (рис. 1 [3]) на амплитудно-частотную характеристику фильтра при его отклонении от оптимального размера равного 63.8° . Расчеты показали, что даже при незначительном изменении угла (в пределах 0.5° , меньше 1%) характеристика фильтра начинает «разваливаться», так как это приводит к резкому и значительному изменению резонансной частоты и добротности третьей диафрагмы.

Аналогичной оказалась и зависимость характеристики фильтра при изменении угла радиального кольцевого сегмента (рис. 1 [3]). При неточности изготовлений в пределах 0.5°

наблюдается существенное изменение добротности фильтра, что сказывается на его электродинамических параметрах.

Проведенные исследования показали, что допущенные неточности при изготовлении в угловых размеров на 0.5° (меньше 2%) могут приводить к отклонению $|S_{11}|$ до 25-30% от оптимального значения, а изменение внешнего радиуса кольцевого сегмента менее всего влияет на амплитудно-частотную характеристику фильтра.

Проведенные расчеты для полосно-пропускающего фильтра третьего порядка показали аналогичную зависимость электродинамических характеристик от размеров среднего резонатора.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при изготовлении фильтров необходимо контролировать азимутальные размеры неоднородности, как оказывающие существенное влияющие на амплитудно-частотную характеристику устройства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета ("Приоритет 2030").

Список литературы

1. Lonkina D.V., Gubskii D.S., Zemlyakov V.V. Cylindrical Waveguiding Structures with Complex Cross Sections in Microwave Units of Modern Information and Communication Systems. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2020. V. 65. No 9. PP. 967-981.
2. Lonkina D.V., Zemlyakov V.V., Gubsky D.S., Zargano G.F., Krytiev S.V. The Partial-Region Method for Electrodynamical Calculation of Cylindrical Structures with Metal Radial T-Ridges and Inhomogeneous Dielectric Filling. // Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. 64, No. 5. October 2021, PP. 357-369.
3. Лонкина Д.В., Земляков В.В., Губский Д.С., Крутиев С.В., Заргано Г.Ф. Электродинамический расчет и проектирование полосно-пропускающих фильтров на круглых волноводах // Журнал технической физики, 2023, том 93, вып. 12, с. 1701 – 1704.

Теоретическое описание кубической решётки из бианизотропных резонаторов, поддерживающей топологические состояния

Розенблит А. Д.¹, Олехно Н. А.¹

¹ИТМО

e-mail: alina.rozenblit@metalab.ifmo.ru

Свойство одновременного возбуждения электрического и магнитного моментов у частиц, называемое бианизотропным откликом, активно рассматривается в контексте управления электромагнитными полями [1]. Например, использование бианизотропии позволяет реализовать фотонные топологические изоляторы – структуры, поддерживающие устойчивые к дефектам локализацию или распространение волн вдоль границ. Так, с помощью

массивов бианизотропных резонаторов в виде треугольных решёток были реализованы системы с дираковской дисперсией, поддерживающие топологические краевые состояния [2-4]. Также были рассмотрены квадратные решётки из бианизотропных резонаторов [5,6], однако остаются неизученными топологические свойства кубической решётки из частиц с бианизотропным откликом. Настоящая работа посвящена разработке теоретической модели и исследованию топологических свойств массива бианизотропных частиц, расположенных в узлах простой кубической решётки.

Для вывода теоретической модели кубическая решетка из бианизотропных резонаторов аппроксимировалась трёхмерным массивом эквидистантно расположенных точечных электрических и магнитных диполей, ориентированных в плоскости (xy) перпендикулярно оси симметрии резонаторов z . Такое приближение основано на результатах численного моделирования собственных состояний диэлектрического бианизотропного резонатора, реализованного в виде двух концентрически соединённых цилиндров разного размера, оси симметрии которых ориентированы вдоль оси z [6]. Для вывода эффективного блоховского гамильтониана использовался метод диадной функции Грина.

С помощью полученной модели исследовано влияние величины параметра бианизотропии на дисперсию собственных энергий полученного эффективного блоховского гамильтониана. Для оценки топологических свойств проведено вычисление кривизны Берри для трёх различных плоскостей исследуемой модели. Показано, что в отсутствие бианизотропии дисперсионная диаграмма собственных энергий характеризуется четырёхкратным квадратичным вырождением в точках высокой симметрии зоны Бриллюэна Γ , M и A . Нетривиальное распределение кривизны Берри наблюдается только для слоёв, параллельных плоскости xy , и при ненулевом параметре бианизотропии, если учтены как минимум связи между соседними резонаторами в первой, второй и третьей координационных сферах. В дальнейшем рассмотренную систему можно реализовать экспериментально в микроволновом диапазоне с помощью керамических резонаторов с нарушенной симметрией, приводящей к гибридизации дипольного электрического и магнитного моментов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект № 24-72-10069).

Список литературы

1. Asadchy V. S., et. al. Bianisotropic metasurfaces: physics and applications, *Nanophotonics*, Vol. 7, No. 6, 1069-1094 (2018).
2. Gorlach A.A. et. al. Photonic Jackiw-Rebbi states in all-dielectric structures controlled by bianisotropy, *Physical Review B*, Vol. 99, No. 20, 205122 (2019).
3. Slobozhanyuk A.P. Near-field imaging of spin-locked edge states in all-dielectric topological metasurfaces, *Applied Physics Letters*, Vol. 114, No. 3, 130–136 (2019).
4. Slobozhanyuk A.P. Three-dimensional all-dielectric photonic topological insulator, *Nature Photonics*, Vol. 11, 130–136 (2017).
5. Slobozhanyuk A. P., et al., Experimental demonstration of topological effects in bianisotropic metamaterials, *Scientific Reports* 6, 22270 (2016).

6. Rozenblit A.D., et. al. Topological edge states in all-dielectric square-lattice arrays of bianisotropic microwave resonators, Physical Review B, Vol. 111, No. 8, 085415, (2025).

Calculation of the fusibility diagrams of quasi-simple ternary systems model (QSTSM). Algorithm and thermodynamic justification.

V. V. Kuznetsov³, Bagdat N. Azamatov², Nikolay A. Charykov^{1,2}, Natalya A. Kulenova², Marzhan A. Sadenova², Dmitry S. Dogatkin¹, V.V. Keskinov¹, M.V. Keskinova¹

¹Saint Petersburg State Institute of Technology

²Veritas Center, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

³Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

e-mail: vvkuznetsov@inbox.ru

The task of a priori calculation of phase equilibrium diagrams in multicomponent systems solely from binary subsystem data for the case of the implementation of so-called quasi-simple systems has been set relatively long ago [1, 2]. Quasi-simple systems are understood as systems of iso-activates of at least one of the components in which (lines of constancy of chemical potentials or activity under isothermal-isobaric conditions) are rectilinear (for triple systems) or represent planes or hyper-planes (for more component systems). Historically, such systems (the same in the essence) have been called differently for phase diagrams of various types: Storonkin pseudo-ideal systems in the case of fusibility diagrams [1]; systems obeying the Zdanovsky rule in the case of solubility diagrams [2, 3]; actually quasi-simple systems in the case of liquid-vapour phase equilibrium diagrams [4].

Indeed, if there are rectilinear iso-activates of any component in the system, then this fact must determine the type of functional dependence of the Gibbs potential of a liquid solution on composition variables or, what is the same thing, the dependence of chemical potentials on composition at $T, P = \text{const}$. The latter is true, since the properties of a liquid solution moving along a straight line iso-activate of a component of a ternary system (let's say with the number 1) must obey the fundamental differential equations: Gibbs-Duhem and cross-differentiation ones:

$$X_2 d\mu_2 + X_3 d\mu_3 = 0; \partial\mu_1 / \partial X_2 - \partial\mu_3 / \partial X_2 = \partial\mu_2 / \partial X_1 - \partial\mu_3 / \partial X_1 \quad (1)$$

where: X_i, μ_i – molar fraction and chemical potential in the liquid solution.

Earlier in [5], the authors developed an algorithm for calculating solubility diagrams, and in [4], diagrams of liquid–vapour phase equilibria in quasi-simple multicomponent systems exclusively from data on binary subsystems. In this paper, we have developed a universal algorithm for calculating the fusibility diagrams of quasi-simple systems from data on binary subsystems. Consider, for example, the fusibility diagram of the ternary quasi-simple system $\text{Na}_2\text{CO}_3(1)\text{-NaF}(2)\text{-NaCl}(3)$, which is a simple eutectic. QSTSM algorithm give the following equations for iso-activates:

$$NaCl - iso - activate : X_1 \cdot 1 / (1 - X_{NaCl}^{02}) + X_2 \cdot 1 / (1 - X_{NaCl}^{01}) = 1 \quad (2)$$

$$M NaF - iso - activate : X_1 \cdot (X_{NaF}^{01} - X_{NaF}^{02}) / X_{NaF}^{01} (1 - X_{NaF}^{02}) + X_2 \cdot 1 / X_{NaF}^{01} = 1 \quad (3)$$

where: X_{NaCl}^{01} - molar fraction of NaCl in binary subsystem NaF-NaCl; X_{NaCl}^{02} - molar fraction of NaCl in binary subsystem Na_2CO_3 -NaCl; X_{NaF}^{01} - molar fraction of NaF in binary subsystem Na_2CO_3 -NaF; X_{NaF}^{02} - molar fraction of NaF in binary subsystem Na_2CO_3 -NaF. Curve of joint crystallization NaCl+NaF is solution of a system of linear equations (2), (3) is following:

$$\Delta_1 = 1 / (1 - X_{NaCl}^{02}) (X_{NaF}^{01} - X_{NaF}^{02}) - (X_{NaF}^{01} - X_{NaF}^{02}) / X_{NaF}^{01} (1 - X_{NaF}^{02}) (1 - X_{NaCl}^{01});$$

$$\Delta_1^1 = 1 / X_{NaF}^{01} - 1 / (1 - X_{NaCl}^{01}); \Delta_1^2 = 1 / (1 - X_{Na_2CO_3}^{02}) - (X_{NaF}^{01} - X_{NaF}^{02}) / (1 - X_{NaF}^{02}) X_{NaF}^{01};$$

$$X_1 = \Delta_1^1 / \Delta_1; X_2 = \Delta_1^2 / \Delta_1; X_3 = 1 - X_1 - X_2$$

The QSTSM model provides similar systems of equations for two other mono-variant curves.

The same good agreement between QSTSM calculations and experiments was obtained for diagrams of other quasi-simple systems, both simple eutonic and systems with solid. solution crystallization.

Financial Support. Investigations are supported by Grant PCF BR24992786 “Development of Technology for Manufacturing Domestic Medical Instruments and Medical Devices”.

References

1. Storonkin A.V., Vasil'kova I.V.. Questions of the thermodynamics of heterogeneous systems and theory of surface phenomena. Questions on the thermodynamics of ternary eutectic and peritectic systems. Leningrad: LGU. 1971. Iss. №1. P.3-51.
2. Zdanovskiy A.B.. Patterns in changing the properties of mixed solutions. Proceedings of the salt laboratory AN SSSR. 1936. Iss.6. 70 P.
3. Filippov V.K.. Systems obeyed Zdanovskiy rule. Bulletin LGU. Ser.: Phys., Chem. 1977. N3. P.98-105.
4. Charykov N. A., Rumyantsev A.V., Keskinov V.A., et.al. A universal algorithm for the calculation of vapor-liquid equilibrium diagrams in quasi-simple multicomponent systems. Condensed Matter and Interphases. 2025; V.27 (1). 34 P. 000-000. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/000>
5. Charykov Nikolay A., Rumyantsev Alexey V., Keskinov Viktor A., et al. Algorithm (Procedure Variants) for the Calculation of Solubility Diagrams of Quasi-Simple Multicomponent Water-Electrolyte Systems. Journal of Chemical & Engineering Data. 2024. 69 (11), P.4089-4097. DOI:10.1021/acs.jced.4c00307.

Влияние коэффициентов поверхностного натяжения на форму вертикальных трехмерных жидких мостов между лиофильными и лиофобными твердыми плоскостями

Галактионов Е. В.¹, Галактионова Н.Е.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: evgalakt@mail.ru

Определение формы боковой поверхности жидкого моста малого объема при наличии зоны трехфазного контакта представляет собой актуальную задачу для решения многих научных и технологических проблем [1]. Одним из возможных практических применений теории жидких мостов является изучение профильных кривых менисков монокристаллов цилиндрической формы, выращиваемых из расплава методами, при которых мениск находится между двумя поверхностями: зонная плавка, выращивание с пьедестала при использовании различных методов нагрева [2], способ Степанова [3].

Форма моста, в первую очередь, зависит от типа твердых поверхностей. В зависимости от величины угла смачивания различают лиофильные (смачиваемые) и лиофобные (несмачиваемые) поверхности. Для лиофильных поверхностей угол смачивания меньше 90 градусов, а для лиофобных – больше. Подробный обзор работ по жидким мостам и их применениям приведен в [4]. Там же выделены два направления исследований по этой тематике: изучение формы поверхности жидкого моста и изучение его устойчивости относительно различных возмущений. Исследованию формы боковой поверхности вертикального жидкого моста фиксированного объема между двумя параллельными лиофильными твердыми плоскостями посвящена работа [5], а между лиофобными – [6].

В настоящей работе в предположении малости числа Бонда получены приближенные формулы, описывающие боковые поверхности вертикальных трехмерных жидких мостов между двумя лиофильными, а также двумя лиофобными твердыми плоскостями. Используется цилиндрическая система координат в предположении осевой симметрии. С помощью полученных приближенных формул исследовано влияние коэффициентов поверхностного натяжения на форму и размеры жидкого моста.

Выделены два фактора, определяющие это влияние и представляющие собой разности коэффициентов поверхностных натяжений на границах жидкого моста и твердых плоскостей, отнесенные к коэффициенту поверхностного натяжения между жидкой и газообразной средами. Установлено, что максимальная высота моста в случае фиксации одного из факторов достигается при стремлении другого фактора к нулю, причем это справедливо как для лиофильных, так и для лиофобных плоскостей.

Список литературы

1. Teixeira P.I.C., Teixeira M.A.C. The shape of two-dimensional liquid bridges. J. Phys.: Condens. Matter., **32**, 3, 034002, 2020;
2. Crystal Growth Processes Based on Capillarity: Czochralski, Floating Zone, Shaping and Crucible Techniques. Ed. Th. Duffar, John Wiley & Sons, 2010. 533 p.;

3. Антонов П.И., Затуловский Л.М., Костыгов А.С. и др. Получение профилированных монокристаллов и изделий способом Степанова. Л.: «Наука», 1981. 280 с.;
4. Fel L.G., Rubinstein B.Y. Stability of axisymmetric liquid bridges. Z. Angew. Math., **66**, 3447, 2016;
5. Галактионов Е.В., Галактионова Н.Е., Тропп Э.А. Форма поверхности вертикального жидкого моста между двумя параллельными твердыми плоскостями с учетом силы тяжести при малых числах Бонда. ЖТФ, **87**, 10, 1475, 2017;
6. Галактионов Е.В., Галактионова Н.Е. Форма боковой поверхности вертикального жидкого моста между несмачиваемыми твердыми плоскостями с учетом силы тяжести при малых числах Бонда. Тезисы докладов международной конференции «Физика.СПб». 23-27 октября 2023 года. Санкт-Петербург, 2023. с. 46

Индукцированные запаздыванием квазипериодические колебания в большой цепочке двунаправлено связанных лазеров

Григорьева Е. В.¹, Кашенко С.А.²

¹БГЭУ, Белоруссия

²ЯГУ

e-mail: grigorieva@tutby.news

В последнее время ввиду возможных приложений большой интерес вызывает динамика сетей связанных элементов различной природы, в том числе условия стабилизации и синхронизации генерации связанных лазеров. Более сложные квазипериодические и хаотические колебаний в сетях также были обнаружены и изучаются, как правило, численно [1, 2].

В настоящей работе мы представляем аналитическое описание квазипериодических режимов и условий их генерации на основе интегро-дифференциальной модели динамики цепочки лазеров с оптоэлектронными двусторонними связями через накачку. Модель была обоснована в [3, 4] в предположении большого числа элементов в цепочках и может описывать динамические неустойчивости в цепочках с различным дизайном оптоэлектронной связи между элементами. Было показано, что в случае двусторонних связей потеря устойчивости стационарной генерации наступает при критическом значении коэффициента связи γ_0 , зависящем от запаздывания в цепи связи T . При этом чередуются интервалы значений T , для которых разность фаз колебаний соседних элементов $\Delta\varphi = 0$ (синфазные колебания с частотами ω_1 или ω_2) и $\Delta\varphi = \pi$ (антифазные колебания). Значения T_0 и $\gamma_0(T_0)$ на границе таких интервалов соответствуют точкам бифуркации коразмерности два.

Для изучения локальной динамики в окрестности таких бифуркаций мы используем метод построения нормальных форм на центральном многообразии, применительно к критическим случаям (асимптотически) бесконечной размерности. Предложен алгоритм сведения исходной краевой задачи к уравнениям для медленно меняющихся амплитуд. В качестве

квазинормальной формы (КНФ) построена система комплексных уравнений типа Гинзбурга-Ландау, нелокальная динамика которых определяет поведение решений исходной краевой задачи. Мы получили четыре вида простейших однородных решения КНФ, которые существуют при параметрах типичных для лазеров класса В. Первое соответствует бегущей волне в распределенной системе и может быть интерпретировано как устойчивые антифазные ω_1 -колебания в цепочке. Второе решение, приводящее к ω_2 -колебаниям оказывается неустойчивым. Третье решение, отвечающее сумме бегущих волн с различными частотами, может быть устойчивым и приводит 2-х частотным квазипериодическим колебаниям элементов в цепочке. Наконец, четвертое однородное решение КНФ может быть интерпретировано как 3-х частотные квазипериодические колебания в цепочке. Последние представляют собой медленную периодическую смену синфазных ω_2 -колебаний и антифазных ω_1 -колебаний. Для исследования устойчивости такого режима необходимо учесть члены высшего порядка малости в КНФ.

Список литературы

1. Vicente R., Tang S., Mulet J., Mirasso R. and Liu Jia-Ming. Synchronization properties of two self-oscillating semiconductor lasers subject to delayed optoelectronic mutual coupling. *Phys. Rev. E*. 2006. Vol. 73. P. 047201.
2. Mahtab Mehrabbeik, Sajad Jafari, Riccardo Meucci, Matja Perc. Synchronization and multistability in a network of diffusively coupled laser models. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* 2023. Vol. 125. P.107380.
3. Grigorieva E.V. and Kashchenko S.A. Phase-synchronized oscillations in a ring of pump-coupled lasers. *Optics Communications*. 2023. Vol. 545. P. 129688.
4. Grigorieva E.V. and Kashchenko S.A. Antiphase and in-phase dynamics in laser chain models with delayed bidirectional couplings. *Physica D. Nonlinear Phenomena*. 2024. V. 467. P. 134223.

Обоснование режимов детектирования флуоресценции и обеспечения температур образцов при формировании графиков плавления ДНК

Белов Д.А.¹, Буляница А.Л.¹

¹ИАП РАН

e-mail: onoff_10@mail.ru

В Институте аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН) разработаны и серийно производятся детектирующие амплификаторы серии АНК, предназначенные для реализации генетических анализов методами полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ) и плавления ДНК. Эти методы основаны на анализе изменения оптических характеристик флуоресцентных красителей, связанных с исследуемыми молекулами ДНК, в зависимости от обеспечиваемых температурных режимов. Прецизионное детектирование флуоресценции и обеспечение температур образцов являются критически важными для успешной реализации методов. Эти факторы обеспечивают высокую точность и

надежность результатов, что особенно важно при количественном анализе ДНК и мониторинге реакций в реальном времени [1].

Известны два основных подхода к формированию графиков плавления: непрерывный, в котором изменение температуры и детектирование флуоресцентных откликов анализируемых образцов выполняется непрерывно, и пошаговый, в котором при термостатировании образцов на каждом температурном шаге выполняется регистрация нескольких отсчетов флуоресценции, необходимых для накопления статистики и вычисления среднего значения [2]. Ранее [3] были даны оценки пространственного распределения температуры на детектирующем амплификаторе АНК-48 (ИАП РАН, Россия), которые учитываются в расчетах настоящей работы. Среднеквадратическое отклонение (СКО) температур 48 проб составило 0,07 и 0,09 для температуры плавления проб около 80 °С, 0,13 и 0,15 для температуры около 60 °С для пошагового и непрерывного режимов соответственно.

Предмет исследования настоящей работы связан с определением режимов измерения сигнала флуоресценции при формировании графиков плавления ДНК. В первую очередь, требуется определить начальный момент измерения после выхода на стационарные значения температуры пробы, во-вторых, оценить необходимый объем накапливаемой выборки измерения. Оценка постоянных времени процесса одномерной теплопроводности для среды с усредненными характеристиками проведена методом разделения переменных [4]. Однако, применимость использованной схемы усреднения характеристик среды нуждается в экспериментальной верификации, что также является предметом исследования.

Оптимальное количество отсчетов флуоресценции было определено по результатам оценки изменения значимости различия дисперсий выборок по критерию Фишера F и двухвыборочному t -тесту с оценкой различия математических ожиданий выборок. Полученные результаты показали, что для получения достоверных средних значений достаточным является регистрация 3 отсчетов флуоресценции на каждом температурном шаге, начиная с 3-его значения. По результатам решения стационарного уравнения теплопроводности выявлено, что наибольшая постоянная времени τ примерно равна 2.24 с^{-1} , что хорошо согласуется с результатами эксперимента.

Полученные результаты позволяют выбрать режимы детектирования флуоресценции и обеспечения температур образцов при формировании графиков плавления ДНК на амплификаторе АНК-48. Предложенные подходы могут быть использованы при планировании экспериментов на других детектирующих амплификаторах и при реализации метода плавления в микрофлюидных устройствах [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-25-00492).

Список литературы

1. Kim N., Kwon J.S., Kang W.H., Yeom S.I. High-Resolution Melting (HRM) Genotyping // *Methods Mol Biol.* 2023. № 2638. P. 337-349.

2. Herrmann M.G, Durtschi J.D., Wittwer C.T., Voelkerding K.V. Expanded Instrument Comparison of Amplicon DNA Melting Analysis for Mutation Scanning and Genotyping // Clinical Chemistry. 2007. Vol. 53, № 8. P. 1-3.
3. Круглов В.А., Жуков Н.П., Морозов Р.Р. [и др.] Выбор оптимальных условий регистрации флуоресцентных сигналов и формирования кривых плавления на амплификаторе АНК-48 // АналитБиоПрибор-2024: Тезисы докладов Третьей ежегодной всероссийской молодежной конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов. 2024. С. 132-135.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики, Изд.5-е, М: Наука, 1977. 736 с.
5. Zhu H., Li H., Zhang H. et al. Heat transfer time determination based on DNA melting curve analysis // Microfluid Nanofluid. 2020. Vol. 24, art. № 7.

Физическое моделирование развития усталостного разрушения на различных масштабно-структурных уровнях при программном нагружении конструкционных материалов

Завойчинская Э. Б.¹, Лавриков Г.Е.¹

¹МГУ имени М. В. Ломоносова

e-mail: elen@velesgroup.com

Процесс разрушения при переменном программном нагружении является иерархическим случайным процессом развития хрупкого и вязкого разрушений по различным физическим механизмам на разных масштабных уровнях. Анализ закономерностей развития процесса приводит к необходимости его описания в рамках многоуровневых моделей междисциплинарного подхода физики твердого тела, материаловедения и механики деформируемого твердого тела. Применение разных методов исследований: на нано- и микромасштабном уровне - методов квантовой механики с использованием потенциалов межатомного взаимодействия, на мезоуровне - методов динамики дислокаций и дефектов и на макроуровне - методов теории упругопластических процессов деформирования и феноменологических подходов к описанию разрушения, приводит к значительным трудностям при моделировании процессов разрушения в широком спектре масштабов.

В основе предлагаемого авторами подхода [1,2] лежит многоуровневое рассмотрение процесса хрупкого усталостного разрушения по стохастической модели, которая устанавливает существование зависимости между вероятностью достижения предельных уровней дефектности (рассматриваются шесть масштабно-структурных уровней) и процессом нагружения в виде иерархической системы рекуррентных определяющих соотношений для этих уровней. При осевых программных нагружениях эта вероятность определяется интегральным оператором Гильберта-Шмидта, собственные числа которого являются функциями прочностных свойств материала и определяются по данным стандартных усталостных испытаний с учетом результатов физических исследований по развитию

хрупких трещин. Разработан вычислительный алгоритм построения кривых усталости по уровням дефектности и проведена численная реализация модели при двух - и трехблочных нагружениях стали и алюминиевых сплавов.

Обсуждаются результаты анализа для 0.25% углеродистой стали и алюминиевого сплава 7050-T7451 при нагружениях, состоящих из двух или трех блоков с разными амплитудами и числами циклов, и алюминиевого сплава 2024-T42 для двух блоков разных амплитуд и чисел циклов и их соответствие известным экспериментальным данным [3-7]. Для рассмотренных материалов модель хорошо описывает экспериментальные кривые усталости по макроразрушению при симметричном осевом нагружении.

Выявлены некоторые закономерности развития процесса разрушения. При двух режимах: 1/3 долговечности – нагружение с амплитудой, равной пределу выносливости, и далее – с возрастающими на 10% и 20% амплитудами соответственно, долговечность определяется, в основном, кривой усталости при максимальной амплитуде напряжения, что подтверждается расчетом. При двух режимах с убывающими на 10% и 20% амплитудами соответственно – долговечность несколько выше (до 15%) по отношению к долговечности при максимальной амплитуде напряжения. Расчеты для обратных тестов показали зависимость долговечности от последовательности приложения амплитуд нагружения с одинаковыми максимальными значениями амплитуд: в случаях с убывающими амплитудами долговечность меньше в среднем до 6 раз и максимальное напряжение меньше в среднем до 10% по сравнению с тестами при возрастающих амплитудах при одинаковой долговечности. Опытные данные для четырех рассмотренных трехблочных режимов с разным уровнем амплитуд хорошо описывается моделью. В случаях с возрастающей амплитудой кривые усталости практически совпадают с кривой усталости при нагружении с максимальной амплитудой, в случаях с убывающей амплитудой долговечность несколько выше в среднем до 10%. Областью применимости предложенных соотношений модели являются программные нагружения, в которых максимальное значение напряжений не превышает предела выносливости материала (или предела усталости по макроразрушению по коротким трещинам) более, чем на 30%. Долговечность при программных нагружениях в диапазоне чисел $N_F \geq 10^6$ циклов до разрушения хорошо описывается моделью. Рассмотренные соотношения не описывают блочные нагружения, в которых максимальное нагружение равно или близко к пределу текучести. Такие нагружения требуют дополнительного исследования.

Список литературы

1. Завойчинская Э.Б., Общие закономерности и критерии разрушения твердых тел на разных масштабно-структурных уровнях при длительном нагружении (обобщающая статья), Заводская лаборатория. Диагностика материалов, том. 8, № 7, 48-62, 2022
2. Zavoychinskaya E.B., A Stochastic Theory of Scale-Structural Fatigue and Structure Durability at Operational Loading, Understanding complex systems. Springer Nature Switzerland AG, 71–89, 2021
3. Kawada Y., Sekido Y., Saski S., Some experiments on the fatigue life under double and triple stresses, Bulletin of the JSME, V. 3, № 10, 275-281, 1960

4. Pavlou D., A phenomenological fatigue damage accumulation rule based on hardness increasing, for the 2024-T42 aluminum, Engineering Structures, V. 24, № 11, 1363-1368, 2002
5. Carvalho A.L.M., Martins J.P., Voorlwad H.J.C., Fatigue damage accumulation in aluminum 7050-T7451 alloy subjected to block programs loading under step-down sequence, Procedia Engineering, V. 2., № 1, 2037-2043, 2010
6. Antunes A.M.B.S., Baptista C.A.R.P., Barboza M.J.R., Carvalho A.L.M, Mogili N.V.V., Effect of the interrupted aging heat treatment T6I4 on the tensile properties and fatigue resistance of AA7050 alloy, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, V. 41, № 319, 2019
7. Murakami Y., Takagi T., Wada K., Matsunaga H., Essential structure of S-N curve: Prediction of fatigue life and fatigue limit of defective materials and nature of scatter, International Journal of Fatigue, V. 146, 2021

Моделирование электронных пучков высоких энергий

Мамаева С. Н.¹, Павлов А.Н.¹, Максимов Г.В.²

¹ СВФУ имени М. К. Аммосова

² МГУ им. М. В. Ломоносова

e-mail: sargylana_mamaeva@mail.ru

Электронные пучки в настоящее время широко используются во многих областях науки и техники [1]. Одним из ключевых элементов, используемых для генерации электронов, является полевой электронный катод (ПЭК). Он активно применяется в электронно-оптических системах современных микроскопов, СВЧ-генераторах и инжекторах ускорителей заряженных частиц. Ускоренные в электростатических ускорителях электроны используются, например, для стерилизации медицинских инструментов, производства рентгеновских снимков и изготовления кремниевых пластин [2].

Современное развитие ускорительной техники и электронно-оптических систем, предназначенных для формирования пучков электронов с энергиями от 1 МэВ и выше (т.е. электронов, скорости которых приближаются к скорости света), требует создания точных математических моделей. Эти модели должны описывать как эмиссионные характеристики источников электронов, так и параметры формируемых пучков.

В данной работе рассматривается математическая модель характеристик пучка релятивистских электронов ПЭК с учетом воздействия на пучок внешних электрического и магнитного полей, релятивистских эффектов, пространственного заряда и собственного магнитного поля пучка. Решение задачи расчета формы и размера пучка, эмиссионных характеристик острейного катода строится таким же образом как и алгоритм решения задачи для исследования динамики электронов, основных эмиссионных характеристик полевого эллипсоидального диода с пучком нерелятивистских электронов, показанном в работе [3].

Математические модели, позволяющие рассчитать основные характеристики ПЭК, форма которого аппроксимируется эллипсоидом вращения, состоят из систем уравнений,

описывающих движение крайнего электрона вне и внутри пучка соответственно, условия на границе пучок-вакуум (значок V показывает, что рассматривается случай вне пучка):

релятивистские уравнения движения крайнего электрона:

- 1)
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{v}_V}{\sqrt{1 - \frac{v_V^2}{c^2}}} \right) = e\vec{E}^V + e[\vec{v}_V, \vec{B} + \vec{B}_V^c], \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = e\vec{E} + e[\vec{v}, \vec{B} + \vec{B}^c];$$
- 2) уравнения Максвелла $\text{rot}\vec{E}^V = 0, \text{div}\vec{E}^V = 0, \text{rot}\vec{E} = 0, \text{div}\vec{E}^V = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \nabla \times \vec{B}^c = \frac{\mu_0 \vec{j}}{4\pi};$
- 3) уравнение непрерывности $\text{div}\vec{j} = 0;$
- 4) уравнение Фаулера-Нордгейма $j_0 = \alpha E_0^2 \exp\left(\frac{-b}{E_0}\right),$

где m, e — масса и заряд электрона, $\vec{E}$ — напряженность электрического поля, $\vec{B}$ — индукция внешнего магнитного поля; $\vec{B}^c$ — индукция собственного магнитного поля; ϵ_0, μ_0 — электрическая и магнитная постоянные; ρ — плотность пространственного заряда пучка эмитированных электронов, j_0 — плотность тока на поверхности катода, E_0 — напряженность электрического поля на поверхности катода, a, b — постоянные величины.

В результате решения двух систем уравнений: 1) с учетом релятивистских эффектов и 2) с учетом релятивистских эффектов и собственного магнитного поля пучка электронов получаются две системы уравнений, каждая из которых состоит из 22 обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Полученные системы решаются с помощью численного метода Рунге-Кутты 4 порядка с использованием программного обеспечения Mathcad.

В итоге были получены траектории крайних электронов, определяющие формы и размеры пучков, с учетом внешних электрических и магнитных полей, пространственного заряда, формы и размеров катода, релятивистских эффектов и собственного магнитного поля. Численный расчет систем уравнений показал усиление эффекта фокусировки пучка электронов внешним магнитным полем при учете релятивистских эффектов и влияния собственного магнитного поля. Кроме того, с помощью данных моделей определяются вольт-амперные характеристики, скорости электронов и другие параметры пучка.

Полученные теоретические результаты могут быть использованы для создания электронно-оптических систем, применяемых, например, в электростатических ускорителях электронов высоких энергий.

Список литературы

1. Развитие физики и технологии ускорителей заряженных частиц /Ред.-сост. Б. Ю. Шарков, И. Н. Мешков. — М.: РАН, 2021. — 140 с.
2. Hinterberger F. Electrostatic accelerators. — 2006.

3. Mamaeva S. N. et al. Mathematical Modeling of the Main Characteristics of Cold Field and Thermal Field Electron Cathodes of Scanning Electron Microscopes in the Study of Biological Samples //Technical Physics. – 2024. – Т. 69. – №. 7. – С. 2045-2048. DOI: 10.1134/S1063784224070284.

Флуктуации, ренормировка и диаграммная техника в теории критического скейлинга

Варнашев К. Б.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: k.varnashev@mail.ru

Основой построения количественной теории критического поведения веществ, испытывающих различные по своей природе фазовые переходы (магнитные, структурные, сверхпроводящие), является учёт влияния сильно развитых взаимодействующих между собой флуктуаций параметра порядка (ПП) на свойства исследуемых систем. Флуктуации ПП, охватывающие большие расстояния и крайне медленно затухающие, приводят к характерному для теории критических явлений сингулярному поведению различных термодинамических величин таких, например, как теплоёмкость или намагнитченность. Учесть влияние флуктуаций на свойства фазового перехода в критической точке позволяет гипотеза критического скейлинга (гипотеза подобия) [1, 2], суть которой заключается в предположении, что ответственные за критические сингулярности части свободной энергии (функционала Ландау-Вильсона) представляют собой обобщённые однородные функции некоторой комбинации термодинамических переменных (например, приведённой температуры или внешнего магнитного поля), через критические размерности которых выражаются все остальные критические показатели. При этом, в точке фазового перехода критические индексы, контролирующие аномальное поведение термодинамических функций, связаны скейлинговыми соотношениями, т. е. выражаются друг через друга.

В данной работе на примере теоретико-полевой модели, описывающей антиферромагнитные фазовые переходы в кристаллах TbAu₂, DyC₂, K₂IrCl₆, TbD₂ и в ниодиме [3, 4], демонстрируется, как акты многоступенчатых промежуточных сколь угодно высокой кратности процессов рассеяния флуктуонов друг на друге непосредственно вблизи точки фазового перехода могут быть естественным образом учтены посредством диаграмм Фейнмана в рамках перенормированной теории возмущения. Конкретно, мы показываем, как константы ренормировки теории, позволяющие перейти от «голых» (нефизических) зарядов и массы к их «одетым» (учитывающим флуктуации) аналогам, представляются степенными рядами, состоящими из бесконечного набора диаграмм Фейнмана; линиям в диаграммах отвечают движущиеся частицы, а точкам – их взаимодействие друг с другом. Каждая диаграмма требует вычисления трёх определяющих её величин: симметричного (комбинаторного) множителя, тензорных свёрток и значения интеграла, соответствующего данному графу. Причём последний вклад вычисляется, как правило, либо в $(4-\varepsilon)$ -мерном пространстве, либо в пространстве фиксированной размерности $D = 3$ (или $D = 2$).

Хотя диаграммные разложения представляют собой бесконечные ряды по заданному параметру, в действительности мы всегда имеем дело лишь с кусками этих рядов, соответствующими L -петлевому приближению (или порядку теории возмущения). Однако даже это позволяет извлечь из них достаточно надёжные не только качественные, но и количественные предсказания относительно критического поведения исследуемых веществ, при численной обработке расходящихся теоретико-полевых рядов надлежащей процедурой пересуммирования [5].

Список литературы

1. Kadanov L. P., Scaling laws for ising models near T_c , *Physics* **2**, 263, 1966.
2. Паташинский А. З., Гипотеза подобия корреляций в теории фазовых переходов второго рода, *ЖЭТФ* **53**, 1987, 1967.
3. Mukamel D., Krinsky S., Physical realizations of $n \geq 4$ -component vector models. II. ϵ -expansion analysis of the critical behavior, *Phys. Rev. B* **13**, 5078 1976.
4. Mudrov A.I., Varnashev K.B., On critical behavior of phase transitions in certain anti-ferromagnets with complicated ordering, *Письма в ЖЭТФ* **74**, 309 2001.
5. Le Guillou J.C., Zinn-Justin J., Critical Exponents for the n -Vector Model in Three Dimensions from Field Theory, *Phys. Rev. Lett.* **39**, 95, 1977.

Термоупругие напряжения, действующие в системах скольжения при выращивании из расплава методом Степанова (EFG) ленточных кристаллов оксида галлия

Крымов В. М.¹, Галактионов Е.В., Бахолдин С.И., Шапенков С.В.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: v.krymov@mail.ioffe.ru

Кристаллы β -оксида галлия интенсивно исследуются в последнее время и имеют хорошие перспективы для широкого применения в микро и мощной электронике. Основными свойствами этого кристалла, которые превосходят полупроводники третьего поколения, являются большая ширина запрещенной зоны, радиационная стойкость, превосходная сцинтилляционная способность и прозрачность в области глубокого ультрафиолета [1]. К настоящему времени уже появилось коммерческое производство подложек из β -Ga₂O₃. Однако для получения высококачественных бездефектных кристаллов необходимы как разработка процессов роста, так и изучение дефектов структуры и причин их образования. Таких исследований для кристаллов β -Ga₂O₃ проведено крайне мало. Дефектная структура лент β -Ga₂O₃ с ориентацией [010] (01) (направление роста и плоскость пластины) изучалась методами рентгеновской топографии, селективного травления и просвечивающей электронной микроскопии. В работе [2] на основе анализа векторов Бюргерса дислокаций были предложены несколько вариантов систем скольжения: а) {01}<010><112>, б) {101}<010><10>, в) {0}<001><10><12>, г) {10}<001><130><132>, д) {001}<00>, е) {10}<01>, ж) {100}<001>. Однако эти данные не подтверждены прямыми исследованиями

пластических свойств кристаллов $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и не рассмотрены причины и механизмы образования дефектов. Исследования, проведенные при выращивании других кристаллов из расплава, показали, что основной причиной образования дефектов является пластическая деформация под действием термических напряжений в системах скольжения по определенным кристаллографическим плоскостям [3]. В [4] такие напряжения были рассчитаны в ленточных кристаллах $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ с учетом прямолинейной анизотропии общего вида для различных направлений выращивания.

В данной работе проведен расчет термоупругих касательных напряжений в системах скольжения кристаллов $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, выращиваемых в форме лент. Разработан алгоритм расчета касательных напряжений в системах скольжения для кристаллов моноклинной сингонии. Определены две матрицы, первая из которых связывает рабочую систему координат со стандартной кристаллофизической системой координат, а вторая связывает ее с системами скольжения, заданными кристаллографическими индексами. Установлено, что при выращивании лент $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ в направлении $[010]$ с плоскостью (100) под действием осевого термического напряжения, действующего в направлении роста, работают только системы с) и d). Причем величины касательных напряжений в этих системах могут достигать 50% от величин соответствующих нормальных термоупругих напряжений. Кроме того, обнаружено, что термические напряжения, действующие у фронта кристаллизации, вызывают дополнительно работу еще нескольких систем скольжения, а именно, систем а), b), f) и g). Построена угловая зависимость касательных напряжений при повороте ленты вокруг оси $[010]$. Проведены расчеты этих напряжений для других ориентаций, в которых возможна работа систем скольжения.

Список литературы

1. Z. Chi, J. Asher, M. R. Jennings, E. Chikoidze and A. Pérez-Tomás, *Materials*, **15**, 1164, 2022;
2. Yan-shen Wang, Ming-zhi Zhu, and Yuan Liu, *China Foundry, Special Review*, **21**, 491, 2024;
3. С.И. Бахолдин, Е.В. Галактионов, В.М.Крымов, Изв. АН СССР, сер. физич., **63**, 9, 1816, 1999;
4. В.М. Крымов, Е.В. Галактионов, С.И. Бахолдин, ЖТФ, **94**, 12, 1957, 2024.

Исследование газовой динамики в плазмотроне для спектрального анализа с использованием численного моделирования

Мельников А. С.¹, Никифоров С. А.¹, Нагулин К. Ю.¹, Гильмутдинов А. Х.¹

¹КНИТУ-КАИ

e-mail: ASMelnikov@kai.ru

Современные методы спектрального анализа с индуктивно-связанной плазмой (ИСП), такие как масс-спектрометрия (МС) и оптическая эмиссионная спектрометрия (ОЭС), широко применяются в аналитической химии благодаря высокой чувствительности и

точности. [1] Однако их эффективность напрямую зависит от характеристик и стабильности горения плазмы, которая, в свою очередь, определяется газовой динамикой в плазмотроне. Вихреобразование, турбулентность и неравномерность распределения температуры могут существенно влиять на точность и воспроизводимость измерений и вызывать появление шумов в измеряемом сигнале. Кроме того, понимание структуры течений позволяет управлять параметрами плазмы, обеспечивать стабильность плазменного факела, минимизировать потери энергии и оптимизировать расход газа.

Использование подходов математического моделирования позволяет исследовать динамику газовых потоков, предсказать влияние изменения параметров потока на распределение концентрации исследуемых образцов, температуры и давления в системе, а также оптимизировать конструкцию прибора.

Численному моделированию процессов в ИСП уделяется значительное внимание в научной литературе [2–6]. Так, в работе [2] рассмотрено влияние различных параметров на поведение газовых потоков (мощность, расходы газов, геометрические параметры прибора) в ИСП-МС. Обнаружено возникновение вихревых потоков в горелке и даны рекомендации по их устранению путем увеличения расхода транспортного газа.

В рассмотренных работах, посвященных исследованию газовой динамики в ИСП-МС, численные модели представлены как правило в 2D- или осесимметричной постановке. Рассмотрение в трехмерной постановке следует учитывать, поскольку осесимметричные и двумерные модели не позволяют в полной мере учитывать сложные пространственные эффекты, такие как вихревые структуры, локальные неоднородности распределения скорости и температуры, а также влияние асимметрии подачи газа, что крайне важно для точного воспроизведения реальных условий работы плазмотрона.

Моделирование выполнено с использованием методов вычислительной гидродинамики в среде ANSYS Fluent. Геометрия прибора включает в себя три вложенных друг в друга кварцевые трубки, через которые подается три газовых потока: транспортный, плазмообразующий и защитный. Два последних подаются тангенциально для создания вращательного движения в плазмотроне. Рассматривались три кейса: 1) включен только центральный (транспортный) газовый поток, 2) включены центральный и средний газовые потоки, 3) включены все три газовых потока. Для описания мультифазного течения использовалась модель многокомпонентной среды (Species) с двумя фазами (аргон и воздух).

Результаты моделирования демонстрируют первичное влияние структуры газового потока на стабильность плазменного факела, в частности, наблюдается формирование вихревых зон, которые могут ухудшать воспроизводимость анализа. В первом режиме течение полностью ламинарное, при этом наблюдается отклонение струи вниз из-за более высокой плотности аргона по сравнению с воздухом. Во втором режиме, при подаче центрального и среднего потоков, центральная струя остается ламинарной почти на всем протяжении расчетной области, лишь незначительно рассеиваясь под влиянием плазмообразующего газа. В третьем режиме, при включении всех трех потоков, центральная струя сохраняется лишь на небольшом расстоянии от выхода горелки, после чего поток

становится турбулентным, что качественно совпадает с экспериментальными данными. Кроме того, во всех случаях наблюдается возникновение зоны с возвратными вихрями на выходе из горелки, что подтверждается экспериментально. Выявлены условия, способствующие уменьшению турбулентности и обеспечивающие оптимальную работу плазмотрона. Данные выводы могут быть использованы для оптимизации конструкции спектрометрических приборов и повышения точности аналитических измерений.

Список литературы

1. Wilschefski S. C., Baxter M. R. Inductively coupled plasma mass spectrometry: Introduction to analytical aspects // *Clinical Biochemistry Reviews*. 2019. Т. 40, № 3. С. 115–133. DOI: 10.33176/AACB-19-00024.
2. Aghaei M., Ghorbani M., Hasani M. Occurrence of gas flow rotational motion inside the ICP torch: A computational and experimental study // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2014. Vol. 29, № 2. P. 249–261. DOI: 10.1039/C3JA50302J
3. Tong J., Zhang Y., Li W. Numerical simulation and prediction of radio frequency inductively coupled plasma spheroidization // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 100. P. 1198–1206. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.108
4. Bernardi D., Boulos M. I., Mostaghimi J. Three-dimensional modeling of inductively coupled plasma torches // *Pure and Applied Chemistry*. 2005. Vol. 77, № 2. P. 359–372. DOI: 10.1351/pac200577020359
5. Voronov M., Shigapov R., Yakovlev V. Computational model of inductively coupled plasma sources in comparison to experimental data for different torch designs and plasma conditions. Part II: Theoretical model // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2017. Vol. 32, № 1. P. 181–192. DOI: 10.1039/c6ja00192k
6. Javid S. M., Alavi S., Guo X. et al. Torch Simulator: An analytical model for rapid prediction of inductively coupled plasma parameters // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2021. Vol. 178. 106182. DOI: 10.1016/j.sab.2021.106182

Численное моделирование ударно-волновых структур в сверхзвуковых потоках неравновесного колебательно- возбужденного газа

Храпов С. С.¹, Хоперсков А. В.¹, Храпов Н.С.¹

¹ВолГУ

e-mail: khrapov@volsu.ru

Сверхзвуковые неравновесные газодинамические течения могут возникать в соплах реактивных двигателей [1] и при гиперзвуковом обтекании аэродинамических поверхностей [2]. Неравновесность среды обусловлена различием термодинамической и колебательной температур в газе [3]. За счет различных физических процессов (электрические и СВЧ-разряды, ударные волны при гиперзвуковом обтекании, быстрое охлаждение сверхзвуковых струй, детонационные волны и т.п.) колебательная температура газа, связанная с колебательными энергетическими уровнями многоатомных молекул, может в несколько раз превышать термодинамическую температуру газа [1-3]. В этом случае релаксационные процессы начинают оказывать существенное влияние на динамику и структуру

газодинамических течений [4]. При определенных условиях неравновесный колебательно-возбужденный газ может становиться акустически активным и в нем на нелинейной стадии развития акустической и тепловой неустойчивостей формируются ударные волны (УВ) с различной структурой [5, 6]: пилообразная система слабых УВ и квазистационарная система ударно-волновых импульсов (УВИ). Локальные неоднородности на поверхности канала, по которому со сверхзвуковой скоростью протекает газ, являются источником звуковых волн [7]. При сверхзвуковом протекании по такому каналу неравновесного акустически активного газа в нем сформируются ударные волны [5, 6], которые будут оказывать негативное или позитивное воздействие на техническую установку в зависимости от ее типа и назначения.

Целью работы является разработка и апробация эффективного вычислительного инструмента, обладающего высоким пространственным разрешением и точностью, для исследования нелинейных волновых структур, формирующихся в сверхзвуковых неравновесных течениях колебательно-возбужденных газов на различных стадиях развития газодинамических неустойчивостей (акустической, тепловой, тангенциального разрыва скорости, гофрировочной неустойчивости УВ). Для разработки двумерной численной модели использовался метод газодинамического моделирования MUSCL (Monotone Upwind Scheme for Conservation Laws), адаптированный для интегрирования двумерных уравнений динамики неравновесного газа [5, 6]. Параллельный код численной модели реализован с использованием технологий CUDA и GPUDirect для гибридных вычислительных систем (суперкомпьютеров) с графическими процессорами (CPUs – multi-GPU).

Проведено численное моделирование ударно-волновых структур в плоском двумерном канале с трансзвуковым потоком неравновесного газа при наличии внешних источников нагрева и охлаждения. Показано, что для каналов, поперечный размер (ширина) которых существенно меньше размеров ударно-волновых импульсов, результаты 2D-расчетов для усредненных по поперечной координате канала параметров течения с хорошей точностью совпадают с результатами 1D-моделирования. С увеличением ширины канала структура УВИ становится более сложной вдоль поперечной координаты канала из-за влияния поперечных градиентов параметров течения.

Исследованы нелинейные волновые структуры в плоских сверхзвуковых струях неравновесного колебательно-возбужденного газа, возникающие в результате развития неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и отражательных (симметричных и антисимметричных) мод струи. Показано, что учет неравновесности среды усиливает неустойчивость тангенциального разрыва скорости в струе и увеличивает интенсивность ударно-волновых структур, возникающих на нелинейной стадии развития этих неустойчивостей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 23-71-00016, <https://rscf.ru/project/23-71-00016/>.

Список литературы

1. Волков К. Н., Брыков Н. А., Емельянов В. Н., Ефремов А. В. Многомасштабный подход к моделированию течений газа с частицами в камерах сгорания

- двигательных установок, Физико-химическая кинетика в газовой динамике, том. 25, вып. 1, <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-1/articles/1087>, 2024
2. Ankudinov A., Hypersonic Nonequilibrium Flow around a Sharp Edge, Fluid Dynamics, vol. 58, 1199-1205, 2023
 3. Осипов А. И., Уваров А. В., Кинетические и газодинамические процессы в неравновесной молекулярной физике, Успехи физических наук, том. 162, № 11, 1–42, 1992
 4. Makaryan V., Molevich N, Stationary shock waves in nonequilibrium media, Plasma Sources Science and Technology, vol. 16, 124-131, 2007
 5. Храпов С. С., Иванченко Г. С., Радченко В. П., Титов А. В. Численное моделирование акустической неустойчивости в неравновесном колебательно-возбужденном газе, Журнал технической физики, том. 93, 1727-1731, 2023
 6. Храпов С. С. Нелинейная динамика акустической неустойчивости в колебательно-возбужденном газе: влияние нагрева и охлаждения, Физико-химическая кинетика в газовой динамике, том 24, вып. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-6/articles/1059/>, 2023 г.
 7. Seleznev R. Analysis of the Flow Structure in a Supersonic Channel with Cavity, Fluid Dynamics, 2024 vol. 59, 81-89, 2024

Наноструктурированные и тонкопленочные материалы

Анализ нанопористых структур с помощью АСМ на примере пленки TiO₂

Безверхний В. П.¹, Муратова Е.Н.¹, Гагарина А.Ю.¹, Мошников В.А.¹, Максимов А.И.¹,
Врублевский И.А.², Лушпа Н.В.²

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ), ²БГУИР

e-mail: vlad150897@yandex.ru

Нанопористые структуры являются широким классом материалов и применяются в различных областях науки и техники. Кроме того, структура таких материалов может быть дополнительно модифицирована путем различных методов, в ходе которых поры заполняются и зарастают. В настоящее время контроль характеристик материалов при таких процессах обычно осуществляется интегральными методами, что часто приводит к получению недостаточно достоверных результатов. В данной работе для диагностики нанопористых материалов с зарастенными порами предлагаются методы АСМ, позволяющие получить подробную информацию о морфологии пористой структуры и карту токов растекания. Для демонстрации возможностей метода были изготовлены слои титана на алюминиевой подложке с последующим электрохимическим окислением.

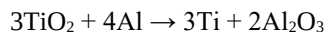
Пленки Ti толщиной 50-60 нм наносились на подложки из алюминиевой фольги методом электронно-лучевого распыления для формирования зерновой структуры с пустым пространством вокруг зерен. Затем проводилось электрохимическое окисление при разном напряжении анодирования от 10 В до 50 В в электролите из щавелевой кислоты C₂H₂O₄. Такие структуры могут использоваться для применения, например, как транспортный слой в перовскитных солнечных элементах [1, 2]. Подробно о свойства пленок диоксида титана были изучены в работе.

Полученные слои были исследованы методом атомно-силовой микроскопии в полуконтактном режиме (зонд NSG01). Для полученных сканов была получена статистика распределения высот, показавшая, что при повышении напряжения до 20 В глубина пор увеличивается. Дальнейшее повышение напряжения анодирования наоборот уменьшает глубину пор. При том чем больше напряжение, тем меньше глубина. Для полученных АСМ-изображений были проанализированы фрактальные свойства и получена Фрактальная размерность близкая к 2,5, что говорит о развитой поверхности пористой структуры близкой к броуновской поверхности. Фрактальная размерность образцов почти не изменяется

при различных напряжениях анодирования, что свидетельствует о сохранении общей морфологической структуры.

При напряжениях анодирования до 30 В окисляется только титан с образованием пленки TiO_2 . Оксид титана обладает меньшей плотностью по сравнению с титаном и растет вверх, что увеличивает глубину пор (II). При большем напряжении анодирования начинает окисляться алюминий до Al_2O_3 . В первую очередь окисление Al идет между зернами оксида титана, что приводит к зарастанию пор, т.к. Al_2O_3 обладает меньшей плотностью, чем Al. Алюминий также начинает окисляться после полного окисления титана под пленкой TiO_2 (III-IV), что приводит к резкому увеличению сопротивления всей структуры.

Часть неокислившегося алюминия, контактирующего с оксидом титана, начинает забирать на себя кислород, образуя вакансии в слое оксида титана и восстанавливать чистый титан из его оксида.



В результате между зернами образуются проводящие области, как показано на рис. 3, связанные с вакансиями в слое TiO_2 и наличием чистого Ti. Предложенный здесь механизм важен для понимания природы появления донорных центров в анодном оксиде титана.

В данной работе показано, как с помощью метода АСМ можно достоверно контролировать процессы заполнения и зарастивания пор. В качестве примера использованы пленки с пористой структурой, полученные электрохимическим окислением Ti на подложке Al при разных напряжениях анодирования. Для пористых пленок получены АСМ-изображения и проведен их анализ: найдено распределение высот и оценены фрактальные характеристики. Показано, что в качестве донорных центров в TiO_2 выступают вакансии кислорода, что объясняется двухслойной структурой Ti-Al, где после полного окисления титана часть Al, контактирующего с ним, начинает забирать на себя кислород.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-42-10029 (<https://rscf.ru/project/23-42-10029>).

Список литературы

1. V. Moshnikov, E. Muratova, A. Aleshin, A. Maksimov, G. Nenashev, I. Vrublevsky, N. Lushpa, A. Tuchkovsky, A. Zhilenkov, O. Kichigina. Controlled Crystallization of Hybrid Perovskite Films from Solution Using Prepared Crystal Centers. Crystals, V. 14, P. 376. DOI: 10.3390/cryst14040376.
2. А. Ю. Гагарина, В. П. Безверхний, Е. Н. Муратова, В. А. Мошников, И. А. Врублевский, А. К. Тучковский, Н. В. Лушпа. Получение и свойства наноразмерной пленки диоксида титана для транспортного слоя n-типа фотовольтаической ячейки. Физика и техника полупроводников, 2024, Т. 58, № 11. DOI: 10.61011/FTP.2024.11.59480.6580A

Статистические закономерности ранних стадий процесса самозалечивания интерфейсов несовместимых высокомолекулярных твёрдых тел

Бойко Ю. М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: yuri.boiko@mail.ioffe.ru

Принципиально важным аспектом контактного взаимодействия между высокомолекулярными твёрдыми телами является зарождение адгезионной прочности (S). Проявление этого физического феномена возможно лишь в том случае, когда сегменты полимерных цепей одного образца диффундируют через интерфейс и образуют новые межмолекулярные связи Ван-дер-Ваальса с молекулярными группами сегментов цепей другого образца в сверхтонком приповерхностном слое толщиной порядка нескольких нанометров [1]. В результате увеличивается концентрация межмолекулярных связей, что приводит к формированию механически устойчивых адгезионных соединений (АС). При отсутствии взаимной диффузии межповерхностное взаимодействие обеспечивается исключительно силами физического притяжения между электрически нейтральными молекулярными группами, расположенными на двух свободных поверхностях. Действия этих слабых дисперсионных сил явно недостаточно для удержания двух полимерных образцов в механически устойчивом контакте.

Естественно, реализация подобного молекулярного механизма возможна исключительно на расстеклованных поверхностях, когда крупномасштабное ротационно-трансляционное перемещение сегментов является активированным, и невозможна на застеклованных поверхностях, находящихся в стеклообразном физическом состоянии. Важно отметить, что даже если объём полимера находится в стеклообразном состоянии, сегментальный массоперенос через интерфейс также возможен. Однако для этого приповерхностный слой образца толщиной порядка диаметра статистически свёрнутого клубка макромолекулы (единицы—десятки нм, в зависимости от гибкости и длины цепи) должен находиться в высокоэластическом состоянии, которое должно сохраняться и в контактном слое на ранних стадиях самозалечивания. Данный эффект наблюдается при температурах (T), намного более низких, чем температура стеклования (T_c) объёма полимера ($T_c^{об}$), если данная T превышает T_c приповерхностного слоя ($T_c^{пов}$). Интересно отметить, что разница между $T_c^{пов}$ и $T_c^{об}$ может превышать даже 100 К [2-5].

Химически разнородные полимеры в своём большинстве являются термодинамически несовместимыми. Поэтому именно их интерфейсы представляют собой наибольший интерес. К их числу относится интерфейс полистирол (ПС) – полиэтилентерефталат (ПЭТФ). При контакте ПС и ПЭТФ происходит взаимное отталкивание молекулярных групп различного химического строения, что, на первый взгляд, не позволяет сформировать механически устойчивое АС ПС–ПЭТФ. Однако, в силу минимизации общей поверхностной энергии системы за счёт двукратного уменьшения общей площади её свободной

поверхности (четыре поверхности двух образцов до контакта и две поверхности после приведения образцов в контакт) адгезия реализуется благодаря активированию процесса самозалечивания интерфейса. Его движущей силой является термодинамически выгодное устранение зоны разрыва сплошности среды за счёт взаимной сегментальной диффузии.

Одним из наиболее широко используемых подходов к анализу степени завершённости процесса самозалечивания интерфейсов полимер-полимер является установление закономерностей кинетики эволюции среднеарифметического значения S ($S_{\text{ср}}$) от времени контакта (t). Однако для лучшего понимания механизмов самозалечивания и разрушения таких интерфейсов весьма информативным является и выявление статистических закономерностей распределения S [6]. Так как интерфейс ПС–ПЭТФ в данном контексте практически не изучался, в настоящей работе впервые проведён комплексный анализ распределений S , развивающейся в температурной области зарождения S , начиная с $T = 74^\circ\text{C}$, которая ниже значений $T_{\text{с об}}$ двух полимеров. Использован комплекс независимых статистических методов (распределения Вейбулла и Гаусса, серия стандартных тестов на нормальность) [7,8]. Посредством определения параметра нормальности (p) и его сопоставления с общепринятым фиксированным уровнем значимости $p = 0.05$ исследована справедливость нулевой гипотезы нормальности для серии массивов распределений S для интерфейса ПС–ПЭТФ. Проведено сопоставление критериев дисперсии экспериментальных данных с использованием предложенных нами ранее [9] безразмерных статистических параметров: обратной величины модуля Вейбулла ($1/m$) и стандартного отклонения (CO), приведённого к $S_{\text{ср}}$ ($\text{CO}/S_{\text{ср}}$). Установлено, что параметры $1/m$ и $\text{CO}/S_{\text{ср}}$ являются близкими по величине, вплоть до их совпадения, что свидетельствует об их единой статистической природе. Обсуждается влияние кинетики процесса эволюции S в широком интервале t на статистические параметры p , $1/m$ и $\text{CO}/S_{\text{ср}}$.

Список литературы

1. Wool R.P., *Polymer Interfaces: Structure and Strength*, Hanser Press: New York, 1995.
2. Guérin G., Mauger F., Prud'homme R.E. The adhesion of amorphous polystyrene surfaces below T_g . *Polymer*. 2003, 44, 7477–7484. DOI:10.1016/j.polymer.2003.09.018
3. Zhang X., Tasaka S., Inagaki N. Surface mechanical properties of low-molecular-weight polystyrene below its glass transition temperature. *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.* 2000, 38, 654–658. DOI:10.1002/(SICI)1099-0488(20000301)38:5<654::AID-POLB2>3.0.CO;2-Z
4. Boiko Yu.M., Bach A., Lyngaae-Jørgensen J. Self-bonding in an amorphous polymer below the glass transition: a T-peel test investigation. *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.* 2004, 42, 1861–1867. DOI: 10.1002/polb.20077
5. Boiko Yu.M. New simple method of measuring the surface glass transition temperature of polymers. *J. Polym. Sci.: Part B: Polym. Phys.* 2010, 48, 2012–2021. DOI:10.1002/polb.22081
6. Boiko Yu.M. Evolution of statistical strength during the contact of amorphous polymer specimens below the glass transition temperature: Influence of chain length. *Materials*. 2023, 16, 491. DOI:10.3390/ma16020491.
7. Yap B.W., Sim C.H. Comparisons of various types of normality tests. *J. Stat. Comput. Simul.* 2011, 81, 2141–2155. DOI:10.1080/00949655.2010.520163

8. Uyanto, S.S. An extensive comparison of 50 univariate goodness-of-fit tests for normality. *Austrian J. Statistics*. 2022, 51, 45–97. DOI:10.17713/ajs.v51i3.1279
9. Бойко Ю.М. Статистические аспекты эволюции прочности на интерфейсах совместимых разнородных аморфных полимеров с кардинально различающейся температурой стеклования. *ФТТ*. 2024, 66, 2159–2132. DOI:10.61011/FTT.2024.12.59585.6253PA

Концентрационные зависимости параметров линии ферромагнитного резонанса двух серий композитных плёнок CoFeB/SiO₂ с разной структурой для различных углов между направлением магнитного поля и плоскостью плёнок

Блинов З. Н.¹, Котов Л.Н.¹, Устюгов В.А.¹ Заварин Д.В.¹, Ковалёв П.Д.¹, Калинин Ю.Е.², Ситников А.В.²

¹Сыктывкарский государственный университет

²Воронежский государственный технический университет

e-mail: blinovzosim@gmail.com

Металл-диэлектрические композитные плёнки привлекают большое внимание исследователей, поскольку их электрические, магнитные и электромагнитные свойства могут изменяться в широких пределах при варьировании толщины плёнок, концентрации магнитных металлических сплавов и диэлектриков, а также при изменении параметров напыления плёнок [1, 2]. Композитные плёнки могут применяться в качестве основы при создании датчиков и биосенсоров с высокой чувствительностью к электромагнитным полям, благодаря своим уникальным характеристикам, таким как, сильный магнитооптический отклик, гигантское магнитосопротивление [3]. Одним из эффективных инструментов для изучения СВЧ электромагнитных свойств композитных плёнок является метод ферромагнитного резонанса (ФМР). ФМР может стать удобным методом для исследования структуры различных магнитных плёнок. Для решения этой задачи надо исследовать методом ФМР магнитные плёнки с различной структурой и далее находить корреляцию параметров ФМР со структурными параметрами плёнок. В настоящей работе проведены исследования концентрационных зависимостей положения (резонансного поля) B_r и ширины ΔB линии ФМР при разных углах φ между направлением постоянного магнитного поля и плоскостью композитных плёнок (CoFeB+SiO₂) с разной структурой. Были получены две серии композитных плёнок при бомбардировке мишеней ионами аргона магнитного сплава Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2} и диэлектрика SiO₂ [1, 2]. Плёнки серии I с концентрациями металлического сплава $x=0.45-0.85$ были получены в атмосфере аргона с давлением 1.4 мкПа. Плёнки серии II с концентрациями $x=0.31-0.52$ были получены в атмосфере аргона с давлением 1.35 мкПа и азота с давлением 0.2 мкПа. Добавление азота в камеру при напылении плёнок серии II позволяло получать гранулированные композитные плёнки в широком интервале x , даже за область перколяции для плёнок I серии. Плёнки I серии в

зависимости от x имели гранулярно-перколяционную структуру, полосовую металлическую структуру и структуру в виде металлической матрицы с внедрёнными в них диэлектрическими частицами. В экспериментах при комнатной температуре записывались резонансные линии ФМР с помощью радиоспектрометра РЭ-1306 при разных углах φ в интервале от 0° до 70° . Затем на основе полученных линий ФМР определялось значения B_r и ΔB . При $\varphi=0^\circ$ постоянное и переменное магнитные поля были взаимно перпендикулярны и лежали в плоскости плёнки.

Для композитных плёнок ($\text{CoFeB}+\text{SiO}_2$) обеих серий положение B_r и ширина ΔB линии ФМР немонотонно уменьшались с ростом концентрации x . Для плёнок серии II в интервале концентраций $x=0.38\text{--}0.46$ наблюдалось резкое уменьшение резонансного поля B_r , а для ширины ΔB в этом интервале наблюдался максимум, который возможно связан с возникновением перколяционных областей в плёнках. При $\varphi=0^\circ$ максимальные значения $B_r=0.27$ Тл и $\Delta B=0.15$ Тл соответствуют плёнкам с гранулированной структурой. Наименьшее значение $B_r=0.02$ Тл и $\Delta B=0.03$ Тл соответствуют плёнкам со структурой в виде металлической матрицы с внедрёнными в неё диэлектрическими частицами. При увеличении угла φ значения B_r и ΔB увеличиваются для всех плёнок с разными структурами, например, для плёнок с гранулированной структурой B_r растёт от 0.26 до 0.36 Тл. Всё это свидетельствует о том, что при $\varphi=0^\circ$ основной вклад даёт внутреннее размагничивающее поле, обусловленной структурой плёнок. А при увеличении φ от 0° до 70° вклад даёт размагничивающее поле, обусловленное формой плёнки. Полученные результаты исследований показывают, что на параметры ФМР композитных плёнок ($\text{CoFeB}+\text{SiO}_2$) значительное влияние оказывает структура магнитных плёнок. Следовательно, метод ФМР является структурно-чувствительным методом исследования тонких композитных магнитных плёнок и с помощью радиоспектрометра ФМР можно получать изображения микро- и наноструктуры плёнок.

Исследования выполнены за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 21-72-20048

Список литературы

1. *И. Устюгов В.А., Котов Л.Н., Ковалёв П.Д., Калинин Ю.Е., Ситников А.В.* Концентрационные зависимости параметров ФМР и структура композитных плёнок ($\text{CoFeB}+\text{SiO}_2+\text{N}_2$), полученных в атмосфере азота // *Физика твердого тела*, 2024, том 66, вып. 12. С. 2148–2151. DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59582.6516PA
2. *L. N. Kotov, Z. N. Blinov, P. D. Kovalev, D. V. Zavarin, Yu. E. Kalinin and A. V. Sitenkov*, Concentration and angular dependences of ferromagnetic resonance parameters and magnetic structure of CoTaNb/MgO composite films, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2024, 88 (Suppl 1), p80–p84.
3. *P.G. Baranov, A.M. Kalashnikova, V.I. Kozub, V.L. Korenev, Yu.G. Kusrayev, R.V. Pisarev, V.F. Sapega, I.A. Akimov, M. Bayer, A.V. Scherbakov, D.R. Yakovlev*, *UFN*, 189(8), 849 (2019).

Tunable negative differential resistance in SnO_2 : Co memristors on p-Si

Murodov J. ¹, Yuldashev.Sh.U

¹Center of Nanotechnology

e-mail: jamoliddinmilliy@gmail.com

Resistive switching phenomenon with different performance characteristics have been reported in various materials, including solid electrolyte [1], perovskites [2], organics [3] and binary transition metal oxides [4]. Among those materials, the metal oxides represent with many advantages of low cost, facile sample preparation. As one of the most studied wide bandgap semiconductors, ZnO thin films [5], Mg-ZnO films [6], CuO [7] and nanorods [8] as well as Mn-ZnO films [9] have been reported to shown stable resistive switching behavior.

However, study of the resistive switching property in cobalt-doped SnO_2 is few. It is well known that Co-doped SnO_2 is diluted magnetic semiconductor and is would be of great interesting to realized the resistive switching property. In this work, we demonstrate that 1%-5% cobalt-doped SnO_2 films based metal-insulator-metal (MIM) structure exhibit reproducible bipolar resistive switching behavior. Building upon this foundation, our study delves deeper into the specific mechanisms and characteristics of resistive switching in cobalt-doped tin dioxide. While prior research has explored the potential of various materials for resistive memory applications, the unique combination of magnetic doping and semiconductor properties in Co-doped SnO_2 presents an opportunity to engineer novel functionalities beyond conventional resistive switching. This includes the potential for achieving tunable switching parameters, enhanced device performance, and even the integration of spin-based functionalities into memristive devices.

A critical aspect of this work is the exploration of the negative differential resistance (NDR) phenomenon exhibited by our Co-doped SnO_2 memristors. NDR, characterized by a decrease in current with an increase in voltage, holds significant promise for applications in low-power logic circuits, oscillators, and neuromorphic computing architectures. This study aims to precisely characterize the NDR behavior, identify the underlying physical processes driving it, and assess its impact on the overall performance of the fabricated devices. We aim to demonstrate that by carefully controlling the doping levels and material processing conditions, the NDR effect can be reliably harnessed for practical applications.

The insights gained from this investigation not only contribute to a better understanding of the fundamental properties of Co-doped SnO_2 but also pave the way for the development of innovative memory and switching devices with improved efficiency and novel functionalities. Our approach aims to bridge the gap between theoretical potential and practical realization, positioning Co-doped SnO_2 as a viable candidate for next-generation electronics. The cobalt doped SnO_2 films were deposited on heavily doped p-type silicon (100) substrates by ultrasonic spray pyrolysis method at ambient atmosphere, as described in details in [8]. All chemical reagents utilized in the present study were of analytical grade and used without further purification. The aqueous solution of tin acetate (0.5 mol/l) and cobalt acetate (0.005 mol/l and 0.001 mol/l) were used as the sources of Sn and Co, respectively. The substrate temperature was set at 450 °C and the

thickness of SnO_2 : Co film was about 200 nm. In order to measure the electrical properties of the SnO_2 : Co films, Ag top electrodes of 220 μm in diameter with 100nm thickness were thermally evaporated with a metal shadow mask. The current-voltage (I-V) characteristics of Ag/ SnO_2 : Co/ SiO_2 /p-type Si structure were measured by a Keithley 2460 source-measure unit. During the measurement in voltage sweeping mode, the positive bias was defined by the current flowing from the top electrode to bottom electrode, and the negative bias was defined by the opposite direction. To ensure the reliability and reproducibility of our measurements, several steps were taken to standardize the electrical characterization process. The Keithley 2460 source-measure unit was configured to perform voltage sweeps with a step size of 0.05V, while the compliance current limit was set at 10 mA to prevent any irreversible damage to the devices. Prior to each measurement, the system was calibrated to minimize any systematic errors, and the contact resistance between the probe tips and top electrodes was carefully verified.

References

1. X. B. Yan, Et Al., *Bipolar Resistive Switching Performance of The Nonvolatile Memory Cells Based on $(\text{AgI})_{0.2}(\text{Ag}_2\text{MoO}_4)_{0.8}$ Solid Electrolyte Films*: J. Appl. Phys., 2009, 106, 054501. <https://doi.org/10.1063/1.3211293>
2. K. Kang, W. Hu and X. Tang, *Halide Perovskites for Resistive Switching Memory*: J. Phys. Chem. Lett. 2021, 12, 48, 11673–11682. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.1c03408>
3. W. Li, Et Al., *High On/Off Ratio Organic Resistive Switching Memory Based on Carbazoyl Dicyanobenzene And A Polymer Composit*: 2022, 126, 30, 12897–12905. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c03641>
4. D. Ielmini, *Resistive Switching Memories Based on Metal Oxides: Mechanisms, Reliability and Scaling*: Semicond. Sci. Technol., 2016, 31, 063002. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/31/6/063002>
5. F. M. Simanjuntak, D. Panda, K. H. Wei And T. Y. Tseng, *Status and Prospects of ZnO-Based Resistive Switching Memory Devices*: Nanoscale Research Letters, 2016, 11, 368. <http://dx.doi.org/10.1186/s11671-016-1570-y>
6. Sh.Abdullayev, S.L, D.J.L, R.Sh, *Negative Differential Resistance Effect In ZnMgO Memristor with SiO_2 Thin Oxide Layer on p-Type Silicon*: Euroasian Journal Of Semiconductors Science And Engineering, 2020. <https://uzjournals.edu.uz/semiconductors/vol2/iss2/3/>
7. Pundalik D. Walke, Et Al., *Memristive Devices from CuO Nanoparticles*: *Nanomaterials*, 2020. <https://doi.org/10.3390/nano10091677>
8. K. Bandyopadhyay, K. N. Prajapati and J. Mitra, *Resistive Switching in Individual ZnO Nanorods: Delineating The Ionic Current By Photo-Stimulation*: *Nanotechnology*, 2018, 29, 105701. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aaa63f>
9. S. S. Li And Y. K. Su, *Oxygen-Vacancy Induced Resistive Switching Effect In Mn-Doped ZnO Memory Devices*: *Physica Status Solidi Rrl*, 2019, 13, 2, 1800453. <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201800453>

Роль асимметрии угловых зависимостей критического тока в оптимизации потерь на перемагничивание композитных ВТСП лент

Гурьев В. В.¹, Чумаков Н.К.¹, Крылов В.Е.¹, Шавкин С.В.¹

¹НИЦ "Курчатовский институт"

e-mail: GuryevVV@mail.ru

Композитные высокотемпературные сверхпроводящие ленты на основе $(RE)Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (сокращенно REBCO, где RE – редкоземельный элемент) находят широкое применение в различных областях, включая насосы магнитного потока, трансформаторы, магнитные системы установок термоядерного синтеза и многие другие. Одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации этих материалов, являются энергетические потери при работе на переменном токе, особенно потери на перемагничивание, которые составляют наибольшую часть общих потерь.

Интересной особенностью лент REBCO, привлекающей в последнее время большое внимание, является асимметрия угловых зависимей критического тока $I_c(\theta, H)$, где H – величина приложенного магнитного поля, θ – угол между направлением поля и нормалью композитной ленты. При этом для всех углов θ транспортный ток ортогонален магнитному полю – т.н. конфигурация максимальной силы Лоренца. Асимметрия $I_c(\theta, H)$ проявляется в различной величине критического тока для двух направлений магнитного поля отклоняющихся от нормали на одинаковый (комплементарный) угол: $I_c(\theta, H) \neq I_c(-\theta, H)$. Установлено, что микроскопической причиной асимметрии $I_c(\theta, H)$ является отклонение кристаллографической плоскости ab REBCO от плоскости ленты, возникающей из-за особенностей технологии изготовления. Однако результирующая асимметрия $I_c(\theta, H)$ определяется не только указанным отклонением, но и величиной силы пиннинга и особенностями движения вихревой материи [1]. В результате может возникнуть ситуация когда значительной асимметрии не наблюдается, хотя отклонение ab плоскости ленты существенно.

В данной работе мы приводим результаты исследований угловых зависимостей критического тока $I_c(\theta, H)$, и петель гистерезиса магнитного момента $M(H, \theta)$ образца DyBCO изготовленного в НИЦ «Курчатовский институт». При малых значениях магнитного поля угловые зависимости $I_c(\theta, H)$ демонстрируют заметную асимметрию, в то время как при высоких полях, напротив, асимметрия практически исчезает, и значения критического тока для комплементарных пар углов оказываются близкими. В результате, если рабочие условия этой ленты соответствуют высоким магнитным полям, то асимметрия $I_c(\theta, H)$, отсутствующая явно, может, тем не менее, проявляться в различной величине потерь на перемагничивание при увеличении поля от нуля до рабочих значений. Это подтверждается разной площадью петель намагничивания $M(H, \theta)$ для комплементарных углов. Таким образом, демонстрируется, что даже при отсутствии явной асимметрии $I_c(\theta, H)$, отклонение кристаллографической плоскости ab от плоскости ленты может существенно повлиять на магнитные потери в реальных условиях эксплуатации.

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра "Электрофизика" в рамках выполнения государственного задания НИЦ "Курчатовский институт".

Список литературы

1. В.В. Гурьев, И.В. Куликов, С.В. Шавкин Анизотропия критического тока технических сверхпроводников: методы анализа и примеры применения // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез (2024) т. 47, вып. 3 93

Использование освещения для идентификации газовых сред полупроводниковыми датчиками на основе оксида цинка

Клычков Н. А., Симаков В.В. Синёв И.В.

СГУ

e-mail: nklychkov@mail.ru

Одним из актуальных направлений в области газовой сенсорики является разработка полупроводниковых датчиков, характеризующихся низким энергопотреблением, высокой степенью безопасности при детектировании легковоспламеняющихся веществ и долговременной стабильностью [1,2]. В последние годы наблюдается увеличивающийся интерес к исследованию и разработке газовых датчиков на основе наноструктур и композитов оксида цинка (ZnO) с развитой поверхностью (включая наночастицы, нанопроволоки, наноцветы и другие формы), которые функционируют при комнатной температуре [3].

Слои ZnO демонстрируют газочувствительность и фоточувствительность в ультрафиолетовой (УФ) области спектра, поэтому, являются перспективным материалом для разработки энергоэффективных газовых сенсоров с управляемыми параметрами [4-6]. Особый интерес представляет исследование влияния освещения на газочувствительность и селективность отклика металлооксидных газовых сенсоров [7-10].

На основании предположения, что при освещении ZnO наблюдается межзонная генерация носителей заряда, рекомбинация которых происходит через локализованный энергетический уровень, индуцированный адсорбированным кислородом, предложена модель, описывающая проводимость материала в стационарных неравновесных условиях.

$$\Phi_n - N_s^{-1} (n \cdot N_a^0 - n_t \cdot N_a^-) = 0, \quad \Phi_n - \frac{\Phi_n}{\Phi_p} \cdot N_s^{-1} (p \cdot N_a^- - p_t \cdot N_a^0) = 0,$$

$$P_a \cdot (N_s - N_a) = N_a^0,$$

$$P_d \cdot (N_s - N_d) = N_d^0,$$

$$N_D^+ - n + p(n, \eta, \Phi) = \frac{N_s}{d} \cdot \left(\frac{n - \Phi_n}{n + \eta_r} + \sum_A \frac{n}{n + \eta_a} - \sum_D \frac{\eta_d}{\eta_d + n} \right)$$

где N , N^0 , $N^{+/-}$ -- общая концентрация поверхностной примеси и концентрация поверхностной примеси в нейтральной и заряженной формах соответственно; $N_{a,d}$ и N_D -- концентрация примесей на поверхности и в объёме соответственно; N_s -- плотность центров адсорбции; d -- толщина слоя; n -- концентрация электронов в зоне проводимости; $p(n, \eta, \Phi)$ -- концентрация дырок в валентной зоне, зависящая от параметров центра рекомбинации и освещённости; Φ -- концентрация оптически сгенерированных носителей заряда в объёме; n_i , p_i -- концентрация электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне, когда уровень Ферми приближается к энергетическому уровню центра рекомбинации; P -- давления газов, нормированные на скорости их десорбции; A и D -- количество сортов газов-окислителей и газов-восстановителей в рабочей среде сенсора соответственно; η_a и η_d -- нормированные параметры газов, зависящие от их давления, глубины залегания и типа центров адсорбции, температуры и тд; η_r -- параметр газа, генерирующего центры рекомбинации при адсорбции.

Анализ (1)÷(5) показывает, что существуют такие условия, при которых воздействие светового потока на проводимость образца равносильно воздействию газа-восстановителя. Расчёты показали, что режим освещения можно выбрать таким образом, чтобы проводимость датчика совпадала с проводимостью, наблюдаемой при воздействии референтного газа. Это означает, что при введении в атмосферу газа-восстановителя, отличающегося от референтного, будет зафиксирован соответствующий отклик датчика.

Для проверки теоретических расчётов по предложенной модели исследовалась газо- и фоточувствительность слоёв оксида цинка сформированных с помощью золь-гель технологии. Экспериментально показано, что с помощью воздействия УФ-излучения можно управлять проводимостью ZnO сенсора таким образом, чтобы уровень электропроводности при освещении соответствовал уровню при воздействии определённой концентрации различных газов-восстановителей (этанол, ацетона и воды).

Таким образом, модуляция режима освещения может быть использована для управления откликом датчика при воздействии анализируемого газа. Полученные результаты имеют существенное значение для разработки нового поколения газоанализаторов, обладающих улучшенными характеристиками энергоэффективности и безопасности.

Список литературы

1. Simakov, V. V., Yakusheva, O. V., Voroshilov, A. S., Grebennikov, A. I., & Kisin, V. V. (2006). Variation of the conductivity of a thin film of tin dioxide in response to step-wise gas sampling. *Technical Physics Letters*, 32(8), 725–728. <https://doi.org/10.1134/S1063785006080256>
2. Zhu, L., & Zeng, W. (2017). Room-temperature gas sensing of ZnO-based gas sensor: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 267, 242–261. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.10.021>
3. Wang, Y., Li, X., Wang, N., et al. (2008). Controllable synthesis of ZnO nanoflowers and their morphology-dependent photocatalytic activities. *Separation and Purification Technology*, 62(3), 727–732. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.03.035>

4. Gupta, S. K., Joshi, A., & Kaur, M. (2010). Development of gas sensors using ZnO nanostructures. *Journal of Chemical Sciences*, 122, 57–62. <https://doi.org/10.1007/s12039-010-0006-y>
5. Fan, S. W., Srivastava, A. K., & Dravid, V. P. (2010). Nanopatterned polycrystalline ZnO for room temperature gas sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 144(1), 159–163. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.10.054>
6. Villegas, E. A., et al. (2018). Effects of grain size on the UV-photoresponse of zinc oxide thin films grown by spray-pyrolysis. *Physica Status Solidi (a)*, 215(11), 1800107. <https://doi.org/10.1002/pssa.201800107>
7. Синёв, И. В., Клычков, Н. А., Тимошенко, Д. А., & Симаков, В. В. (2020). Влияние освещения на распознавательную способность мультисенсорных микросистем на основе нитевидных нанокристаллов диоксида олова. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*, 12, 713–721. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2020.12.713>
8. Li, M., et al. (2023). Discriminating gas molecules at room temperature by UV light modulation (ULM) of nonselective metal oxide sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 378, 133115. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.133115>
9. Liu, J. M., et al. (2007). Effect of grain size on the electrical properties of ultraviolet photodetector with ZnO/diamond film structure. *Journal of Crystal Growth*, 300(2), 353–357. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.12.029>
10. Ayouchi, R., et al. (2009). Photosensitivity of nanocrystalline ZnO films grown by PLD. *Applied Surface Science*, 255(11), 5917–5921. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.01.033>

Электrofизические свойства гибридных графен-нанотрубных квази-2D структур

Слепченков М. М.¹, Барков П. В.¹, Глухова О. Е.^{1,2}

¹СГУ им. Н. Г. Чернышевского

²Сеченовский Университет

e-mail: slepchenkovm@mail.ru

Семейство аллотропов углерода на протяжении многих лет зарекомендовало себя как один из важнейших классов материалов, отличающихся богатством размерности и необыкновенной широтой функционального применения [1]. Среди различных аллотропных модификаций углерода нанотрубки (1D-структура) и графен (2D-структура) привлекают наибольшее внимание исследователей и разработчиков как перспективные кандидаты для следующего поколения устройств нано- и оптоэлектроники, а также накопителей энергии благодаря своим уникальным структурным и физико-химическим свойствам [2]. Принимая во внимание возможности современных технологий синтеза графена и углеродных нанотрубок (УНТ), благодаря которым можно получать УНТ различной хиральности и диаметра, одностенные и многостенные, графен в виде монослоя и слоистой структуры с различными типами укладки слоев, а также разные варианты взаимной ориентации графена и УНТ и их способ соединения в составе гибрида [3,4], можно говорить о потенциальном геометрико-топологическом многообразии атомных конфигураций

гибридных графен-нанотрубных структур. В связи с этим, в настоящее время важная роль отводится исследованиям, выполняемым методами атомистического моделирования, которые позволяют прогнозировать, какие топологические типы атомных конфигураций гибридной структуры графен-УНТ демонстрируют наиболее выгодные физико-химические свойства. Целью данного исследования является выявление закономерностей влияния структурных особенностей на электрофизические свойства гибридных тонкопленочных графено-нанотрубных структур. Объектом исследования являются квази-2D пленки, образованные двухслойным графеном и хиральными одностенными углеродными нанотрубками (ОУНТ) суб- и нанометрового диаметров. В качестве структурных особенностей рассматриваются индексы хиральности и диаметр нанотрубки, тип укладки слоев графена, ориентация нанотрубки по отношению к графену. Анализ электрофизических свойств проводится на основе рассчитанных энергетических зонных диаграмм и токовых характеристик. Расчеты атомной конфигурации и электронно-энергетических параметров исследуемых гибридных графен-ОУНТ структур выполняются в рамках теории функционала плотности в схеме сильной связи с самосогласованным вычислением заряда SCC-DFTB с использованием программного пакета открытого доступа DFTB+ версия 20.2 [5]. Токковые характеристики исследуемых атомных конфигураций графен-ОУНТ структур рассчитываются в рамках формализма Ландауэра-Буттикера с использованием аппарата функций Грина-Келдыша [5] при температуре 300 К. Важной особенностью исследуемых графен-нанотрубных структур, выявленной в ходе исследования, является наличие у них анизотропии электропроводности в разных направлениях токопереноса (транспорта электронов): параллельно или перпендикулярно оси нанотрубки (вдоль направления "кресло" или вдоль направления "зигзаг" гексагональной решетки графена). Наблюдаемая анизотропия объясняется тем, что в одном из направлений токопереноса определяющий вклад в формирование электрофизических свойств графен-нанотрубного гибрида вносит бислойный графен, а вдоль другого - нанотрубка. Для направления токопереноса с наибольшей электропроводностью рассчитываются вольт-амперные характеристики гибридных структур графен-ОУНТ. На основе полученных результатов делаются выводы о перспективах использования рассматриваемых топологических типов атомных конфигураций гибридных графен-нанотрубных структур в устройствах наноэлектроники, в частности полевых транзисторах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 24-79-10316.

Список литературы

1. Kharlamova M.V., Kramberger C., Chernov A.I. Advanced Carbon Nanostructures: Synthesis, Properties, and Applications // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. P. 1268. DOI: 10.3390/nano13071268.
2. Pyo S., Eun Y., Sim J., Kim K., Choi J. Carbon nanotube-graphene hybrids for soft electronics, sensors, and actuators // *Micro and Nano Syst. Lett.* 2022. Vol. 10. P. 9. DOI: 10.1186/s40486-022-00151-w.
3. Wu X., Mu F., Zhao H. Recent progress in the synthesis of graphene/CNT composites and the energy-related applications // *J. Mater. Sci. Technol.* 2020. Vol. 55. P. 16– 34. DOI: 10.1016/j.jmst.2019.05.063.

4. Du W., Ahmed Z., Wang Q., Yu C., Feng Z., Li G., Zhang M., Zhou C., Senegor R., Yang C. Y. Structures, properties, and applications of CNT-graphene heterostructures // 2D Materials. Vol 2019. Vol. 6. Iss. 4. P. 042005. DOI: 10.1088/2053-1583/ab41d3.
5. Elstner M., Seifert G. Density functional tight binding // Phil. Trans. R. Soc. A. 2014. Vol. 372. P. 20120483. DOI: 10.1098/rsta.2012.0483.
6. Datta S. Quantum Transport: Atom to Transistor - Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2005, 405 p.

Получение и свойства электродов на основе тонких пленок композитных материалов вида $\text{BiFO}_3/\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ для фотоэлектрохимического разложения воды

Никольская А.Б.¹, Козлов С.С.¹, Алексеева О.В.¹, Карягина О.К.¹, Петрова В.И.¹, Ларина Л.Л.¹, Шевалеевский О.И.¹

¹ИБХФ им. Н.М. Эмануэля РАН

e-mail: anickolskaya@mail.ru

Ключевой задачей современной мировой энергетики является переход к ресурсосберегающим технологиям и широкому внедрению возобновляемых источников энергии [1]. Одним из наиболее перспективных и экологически безопасных энергоносителей считается «зеленый водород», который генерируется в процессе электролиза воды под действием энергии солнечного излучения [2]. В связи с этим важной задачей является разработка высокоэффективных электролитических систем разложения воды, а также поиск для их электродов устойчивых к водной среде материалов высокой проводимости [3]. Высоким потенциалом обладают мультиферроики, обладающие необходимыми для этой цели параметрами эффективного переноса носителей зарядов и возможностью их разделения под воздействием внешнего электрического поля. Особенный интерес представляет химически стабильное соединение со структурой перовскита BiFeO_3 (BFO), так как у него относительно узкая ширина запрещенной зоны (2,7 эВ) и его легко синтезировать простыми методами из недорогостоящих материалов [4]. Однако, фотокаталитические свойства данного соединения не позволяют достичь высокой эффективности генерации водорода [4, 5]. Данная проблема может быть решена путем создания новых видов композитных материалов на основе BFO с улучшенными фотоэлектрическими и каталитическими свойствами.

В данной работе с использованием методов «мягкой химии» были получены тонкие пленки композитных материалов вида BFO/LNMO, где LNMO – это соединение со структурой $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$, относящееся к классу двойных перовскитов и характеризующееся высокой светочувствительностью. Пленки BFO/LNMO с различным содержанием LNMO (20%, 50%, 80%), а также тонкие пленки чистых BFO и LNMO наносились на стеклянные подложки методом центрифугирования (spin-coating) с последующим отжигом в муфельной печи. Структурные, морфологические и оптические свойства пленок были исследованы методами оптической спектроскопии, рентгеновской дифрактометрии и атомно-

силовой микроскопии. Фотоэлектрические свойства пленок были изучены с использованием методов вольтамперометрии и импедансной спектроскопии. Для создания фотоанодов тонкие пленки BFO/LNMO наносились на стеклянные подложки, покрытые проводящим слоем FTO (SnO_2 допированный ионами фтора) и тонким слоем из наночастиц TiO_2 . Измерение эффективности процесса электролиза воды с использованием полученных электродов проводилось методом вольтамперометрии с линейной разверткой и использованием трехэлектродной электрохимической ячейки.

В результате проведенных исследований было установлено, что синтезированные фотоаноды на основе композитных материалов BFO/LNMO могут быть успешно использованы в электролитических системах для генерации “зеленого водорода”. Было показано, что разработанные композиты вида BFO/LNMO, в сравнении с соединением BFO, обладают улучшенными структурными свойствами и характеризуются более узкой шириной запрещенной зоны, что позволяет существенно повысить выход водорода в процессе электролиза. Наилучшие результаты были получены с использованием фотоанода на основе композитного материала BFO/LNMO, в котором количественное содержание обоих соединений находилось в равных долях (1:1).

Список литературы

1. Gayen D., Chatterjee R., Roy, S. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **21**, 5285–5310 (2024)
2. A.K. Worku, D.W. Ayele, D.B. Deepak, A.Y. Gebreyohannes, S.D. Agegnehu, M.L. Kolhe. *Adv. Energy Sustainability Res.* **5**, 2300273 (2024)
3. T. Ikuerowo, S.O. Bade, A. Akinmoladun, B.A. Oni. *Int. J. Hydrogen Energ.* **76**, 75-96 (2024)
4. Nassereddine Y., Benyoussef M., Asbani B., El Marssi M., Jouiad M. *Nanomaterials* **14**, 51 (2023)
5. Zhou T., Zhai T., Shen H., Wang J., Min R., Ma K., Zhang G. *Chemosphere* **339**, 139678 (2023)

Хеометрический анализ функционирования тонких плёнок PdO в качестве химического сенсора на молекулы озона в атмосфере

Чистяков В. В.¹, Рябцев С.В.², Аль-Хабиб А.А.К.², Соловьев С.М.¹, Домашевская Е.П.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Воронежский государственный университет

e-mail: v.chistyakov@mail.ioffe.ru

Тонкие (30 нм) плёнки PdO *p*-типа, получаемые окислением напылённых на подложки SiO_2 слоёв Pd, известны как низкоомные чувствительные элементы на *ppb*-концентрации в воздухе активных частиц (озон, хлор). При этом селективность достигалась за счёт мультивариантной калибровки (МК), построенной на максимумах амплитуд Фурье экстрагированного сигнала электропроводности $\text{S}_{\text{extr}} = \text{S}_{\text{raw}} - \text{S}_{\text{air}}$ – превышения над

референсным (среда) отклика в среде с аналитом в режиме гармонической модуляции температуры t° сенсора [1].

Отмечена несимметричность отклика на стадиях нагрева и охлаждения, дающая петлю гистерезиса проводимости как в Ar ОСЧ, так и в воздухе с/без аналита. При этом величина S_{extr} продолжала расти по прохождению максимума температуры (350°), но при $t^0 \sim 110^\circ\text{C}$ возвращалась к значениям на стадии нагрева [ibid].

Потому этот гистерезис нельзя объяснить долговременными релаксациями из-за разупорядоченности рельефа зон. Да и сама структура зон вызывает вопросы в связи с шириной запрещенной зоны E_g : согласно разным экспериментальным данным и расчётам в рамках Density Functional Theory (DFT) варьирующейся от 0 до 2.67 эВ. Множественные модификации DFT [2] показывают, что PdO должен быть *топологическим полуметаллом* с узловыми как *точками Дирака*, так и *линиями Вейля* пересечения зон и с поверхностными состояниями (ПС) типа *дуг Ферми* и "*барабана*" (drumhead).

Авторы предполагают, что гистерезис электропроводности есть проявление: а) свойств топологического заряда носителей, препятствующих их рекомбинации, и/или б) сепарации зарядов на ПС и в объёме, и/или в) *гидродинамического* токопереноса при повышенных температурах сильно коррелированных носителей, что увеличивает их подвижность.

В результате опытов с озоном, получаемым от генератора ГС-024-25 в концентрациях $C=25, 55, 90$ и 250 ppb , установлено, что в диапазоне температур $50..250^\circ\text{C}$ кондуктометрический аналог величины адсорбции (полусумма откликов $S_{extr}(C, t^0\text{C})$ на стадиях нагрева и охлаждения) лучше всего ($\text{adj-R}^2=0.996$) описывается формулой Йовановича, учитывающей удары молекул газа-носителя, и не предполагающей миграцию адсорбата по поверхности. При этом учёт убывания подвижности дырок из-за рассеяния на адчастицах O_3 значительно улучшал качество модели (adj-R^2 , статистики Стьюдента параметров).

Для прояснения механизма чувствительности проводились опыты температурно-программируемой десорбции (ТПД) по методике Вигнера - Поляни (В. - П.). Спецификой являлось то, что после выхода сопротивления образцов на плато при заданной концентрации озона $[\text{O}_3]$ и $t_{\min}=50^\circ\text{C}$ нагрев с момента отключения генератора до $t_{\max}=250^\circ\text{C}$ в течение 1280 с осуществлялся согласно линейному росту обратной абсолютной температуры $1/T, \text{K}^{-1} \sim t, \text{c}$.

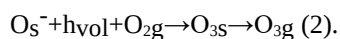
Все отклики $S_{extr}(t^0\text{C})$ имели S-образный вид с серединным интервалом десорбционного падения от ~ 65 до $\sim 180..190^\circ\text{C}$ и крайними участками роста. Для данных по 4-м концентрациям O_3 специфицирован (Statistica 10, $\text{adj-R}^2>0.98$) кондуктометрический аналог уравнения В.- П.

$$\frac{dS_{extr}}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = \left\{ AS_{raw} e^{-(U_a + gT^2)/kT} - BT^n e^{-E_a/kT} \right\} S_{extr} \quad (1).$$

Первый член в фигурных скобках означает поток дырок h_{vol} к поверхности через растущий по мере десорбции барьер $U_a + gT^2$; второй, с $n=0$ для большей части образцов и $n=4$ - для меньшей - интерпретируется как инжекция валентных электронов объёма поверх барьера $E_a \sim U_a/3$ в приповерхностный слой. Они, рекомбинируя с дырками, тормозят десорбцию, а, занимая ПС (см. выше), создают инверсионный слой. Отсутствие в выражениях для потоков ричардсоновского множителя T^2 говорит о постоянстве скоростей носителей, косвенно подтверждая топологический характер PdO.

Интегрирование (1) (Maple 2023) с подстановкой $S_{raw} = S_{extr} + S_{air}$ и начальными условиями (Н.У.) на S_{extr} при t_{min} идеально описывало эксперимент. Но для Н.У. при t_{max} давало сингулярность либо нулевую стартовую адсорбцию $S_{extr}(t_{min})=0$, что означало полную десорбцию адчастиц O_3 при $250^\circ C$.

1-й порядок правой части (1) по величине S_{extr} свидетельствует о **молекулярной** форме **адсорбции** O_3 , и/или о десорбции по подтверждающей формулу Йовановича схеме



Представляемый хеометрический анализ результатов ТПД может служить верифицирующей альтернативой МК в деле обеспечения селективности полупроводниковых химических сенсоров, в т.ч. на базе топологических материалов, всё более востребованных в газовом анализе и гетерогенном катализе.

Список литературы

1. Чистяков В.В., Рябцев С.В., Аль-Хабиб А.А.К., Соловьев С.М., Обработка сигналов, полученных в условиях модуляции рабочей температуры кондуктометрического сенсора на базе PdO, Физика твердого тела, том. 12, 2107-2112, 2023
2. Xu L, Meng W, Zhang X, Dai X, Liu Y, Wang L, Liu G, Palladium oxide: an excellent topological electronic material with 0-D and 1-D band crossings and definite nontrivial surface states. Physical Chemistry Chemical Physics : PCCP, 22(33):18447-18453, 2020

Модификация поверхности CdS при нанесении и отжиге структурированного металлом органического покрытия

Харитонов П. Г.¹, Стецюра С.В.¹, Козловский А.В.²

¹СГУ имени Н.Г. Чернышевского

²СПбПУ

e-mail: haritonovapg@gmail.com

Разработанная нами технология создания фоточувствительного материала CdS с нановключениями фазы FeS, включает этапы создания ультратонкого органического покрытия арахината железа (ArchFe) на поверхности монокристаллической пластины или поликристаллической пленки сульфида кадмия (CdS) [1] и последующего длительного (до 1 часа) отжига полученной гибридной структуры CdS/ArchFe для прохождения процессов диффузии атомов Fe, образования и роста преципитатов FeS [2]. Полученные материалы имеют новые интересные характеристики, например, наряду с повышением фоточувствительности в видимой области спектра наблюдаются магнитные свойства в области значений типичных для разбавленных магнитных полупроводниковых материалов [3].

Качество и воспроизводимость данной технологии во многом зависят от равномерности распределения и однородности органического покрытия ArchFe, возможных процессов самоорганизации молекул ArchFe и кластеризации Fe на поверхности CdS в процессе отжига. Для изучения модификации поверхности CdS при нанесении и отжиге органического покрытия были проведены исследования методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в режиме амплитудной модуляции сигнала с получением изображений как рельефа поверхности, так и распределений сигналов рассогласования цепи обратной связи и фазового контраста, которые при совместном анализе дают возможность получения дополнительной информации об исследуемой поверхности. Так, сигнал рассогласования цепи обратной связи, возникающий в процессе сканирования, содержит дополнительную информацию, обеспечивая подчеркивание малоразмерных деталей рельефа поверхности благодаря дополнительному учету сил упругости. Он используется для более полного воспроизведения рельефа, в том числе на органических покрытиях и биообъектах [4]. Метод фазового контраста является одним из наиболее распространенных методов АСМ-визуализации для выявления участков поверхности, различающихся по своим свойствам, например, таким как, адгезия, жесткость, упругость и вязкость. Исходя из этого, метод весьма перспективен при исследовании гибридных и гетерофазных материалов, например, структур, совмещающих несколько компонентов на основе полимеров и неорганических материалов [5].

В данной работе представлены результаты исследования и совместного анализа сканов поверхности, включающие сканы поверхности «чистого» CdS, структуры CdS/ArchFe сразу после нанесения органического покрытия и после отжига указанной структуры в течение 1 часа при 550 °С. Изображения АСМ получены на АСМ-микроскопе ИНТЕГРА Спектра (НТ-МДТ Спектрум Инструментс, Россия)

Анализ сканов включал статистическую обработку сканов с учётом данных о сигнале рассогласования цепи обратной связи и фазового контраста. АСМ-изображения подтвердили однородность свойств поверхности «чистого» CdS и структуры CdS/ArchFe. Для «чистой» поверхности CdS фазовое АСМ-изображение показывает распределение относительной величины сдвига фазы колебаний кантилевера в области сканирования, совпадающей с топографическим АСМ-изображением «чистого» CdS. Нанесение ArchFe существенно уменьшает средние значения сигналов рассогласования и фазового сдвига, причем эти распределения имеют даже меньший разброс параметров, чем для «чистого» CdS, что также подтверждает однородность нанесения слоя ArchFe. После отжига топология поверхности меняется - на ней отчетливо видны кристаллиты размером 200-500 нм кубической и тетраэдрической формы, что подтверждает результаты работы [3], указывающие на образование нанофаз Fe_2O_3 и CdO на поверхности CdS после отжига ArchFe. При этом разброс параметров на всех АСМ распределениях возрастает после отжига ArchFe по сравнению с поверхностью неотожженной структуры CdS/ArchFe и приближается по значениям к «чистому» CdS. Таким образом, показано, что совместное применение колебательных методик АСМ позволило охарактеризовать органическое, структурированное Fe покрытие, нанесенное на CdS и используемое в технологии создания разбавленного полуметаллического полупроводникового материала.

Список литературы

1. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G., Glukhovskoy E. G. Langmuir-Blodgett technology to obtain semi-magnetic photosensitive materials // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15, No. S3.3. P. 250-254. DOI: 10.18721/JPM.153.349
2. Харитонов П. Г., Глуховской Е. Г., Козловский А. В. Фотоэлектрические характеристики и морфология поверхности сульфида кадмия, модифицированного арахином железа // Физика и техника полупроводников. 2023. Т. 57, № 7. С. 518-521. DOI: 10.61011/FTP.2023.07.56780.4912C
3. Stetsyura S. V., Kharitonova P. G. Magnetic properties of heterophase film coatings based on a solid solution of cadmium sulfide and iron // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16, No. S1.2. P. 236-240. DOI: 10.18721/JPM.161.236
4. Давлеткильдеев Н.А., Козинская А.В., Азаров В.Ф., Глотов А.В. Атомно-силовая микроскопия как метод определения структурно-функциональных особенностей слизистой оболочки сфинктерных зон толстой кишки человека // Вестник Омского университета. 2014. Т. 29, №. 4. С. 114-117
5. Maver U., Velnar T., Gaberscek M., Planinsek O., Finsgar M. Recent progressive use of atomic force microscopy in biomedical applications // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2016. Vol. 80. P.96-111. DOI: 10.1016/j.trac.2016.03.014

Сканирующая ионная микроскопия как метод измерения количества слоев эпитаксиального мультиграфена

Ю.В. Петров^{1,2}, Т.С. Аргунова², С.П. Лебедев², А.В. Анкудинов², С.Ю. Приображенский³

¹Санкт-Петербургский государственный университет,

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

³СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: argunova@mail.ioffe.ru

Свойства, проявляемые графеном – одним слоем атомов углерода, объединенных в гексагональную решетку, – изменяются по мере увеличения количества слоев. Графен, состоящий из 5–10 слоев, или мультиграфен (МГ), начинает вести себя как объемный графит, когда число слоев становится больше 10. Толщина эпитаксиального мультиграфена (ЭМГ), полученного методом сублимации полуизолирующей подложки карбида кремния (SiC), как правило, изменяется по площади подложки. Переменная толщина влияет на физические свойства ЭМГ. Тем не менее, ЭМГ используют для электронных приборов, в частности, биосенсоров, выбрав оптимальную технологию изготовления чипов [1].

Определение числа слоев ЭМГ является важной задачей. К традиционным методам ее решения относятся просвечивающая или сканирующая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, рамановская спектроскопия и т.д. [2]. В настоящей работе описано применение гелиевой ионной микроскопии для изучения свойств ЭМГ на подложках SiC. Сканирующая ионная микроскопия (СИМ), перспективная для наноинженерии, химического анализа и визуализации *in situ*, хорошо зарекомендовала себя как метод получения наноструктур на основе графена с высоким пространственным разрешением [3]. Однако, для оценки слоистости графена ранее не использовалась.

На СИМ–изображениях ЭМГ формируется контраст, состоящий из темных и светлых участков. Для интерпретации контраста были рассмотрены следующие факторы: (i) различие в величине поверхностного потенциала, обусловленного разностью в работе выхода электронов из ЭМГ; (ii) различие в толщине ЭМГ, в том числе, играющего роль фильтра для электронов, возбуждаемых в SiC; (iii) рельеф поверхности.

Прямое сопоставление СИМ–изображений с данными Кельвин–зонд–микроскопии [4] позволило объяснить какие из этих участков имеют больший поверхностный потенциал. В результате получено правильное объяснение формирования СИМ–сигнала от ЭМГ, изготовленного термодеструкцией SiC. Обсуждается применение метода СИМ для оценки количества слоев мультиграфена.

Список литературы

1. Schmidt N.M., Shabunina E.I., Lebedev S.P., *et al.* Quality assessment of processed graphene chips for biosensor application, *Materials*, vol. **16**, 5628, 2023.
2. Kumar V., Kumar A., Lee D–J., Park S–S., Estimation of number of graphene layers using different methods: a focused review, *Materials*, vol. **14**, 4590, 2021 г.

3. Iberi V., Vlasiouk I., Zhang X.-G., *et al.* Maskless lithography and *in situ* visualization of conductivity of graphene using helium ion microscopy, Scientific Reports, vol. 5, 11952, 2015.
4. Дунаевский М.С., Гущина Е.В., Малых Д.А., Лебедев С.П., Лебедев А.А. Тестовые структуры на базе SiC с тонкими слоями графена для определения аппаратной функции для кельвин-зонд-микроскопии, ПЖТФ, т. 49, 24–27, 2023.

Электрические свойства объемных наноструктурированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15} <\text{Te}>$

Tagiyev M. M.^{1,2}, Х.Ф. Алиева², Г.Д. Абдинова², И.А.Абдуллаева³, Т.И. Пириева², С.Г. Джафарова⁴.

¹Азербайджанский Экономический Университет

²Институт Физики Министерство Науки и Образование Азербайджанской Республики

³Азербайджанский Университет Архитектуры и Строительства

⁴Гянджинский государственный университет

e-mail: *mail_tagiyev@mail.ru*

Основные закономерности научной работы

В последние годы широко обсуждается перспективность наноструктур в качестве термоэлектрических материалов [1,2]. Благодаря использованию нанотехнологий термоэлектрическую добротность $Z \sim \mu/k\rho$ (где, μ -подвижность носителей заряда, $k\rho$ решеточная часть теплопроводности) можно увеличить в наноструктурных материалах за счет туннелирования электронов между наноструктурными зернами (частицами) термоэлектрика. Поскольку фононы не могут туннелировать через вакуумный зазор, они не участвуют в процессах теплопроводности, что приводит к уменьшению фононной части теплопроводности и росту термоэлектрической добротности. Рассеяние фононов на границах наноструктурных зерен также приводит к уменьшению фононной теплопроводности и росту термоэлектрической добротности Z .

С целью выяснения влияния размеров зерен на электрические свойства кристаллов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$ легированных 0.0005ат. %Te (материала с наиболее высокими термоэлектрическими параметрами $Z \sim 6,2 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ и $ZMT \sim 7,2 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ [3]) в данной работе получены экструдированные образцы данного состава с размерами зерен 200 мкм, 38 нм, 32 нм, 15 нм и исследованы их электропроводность, коэффициенты термоэдс и Холла в интервале температур 90-300К.

Из синтезированного материала, дробленных в фарфоровой чашке, отбирали фракции с размерами частиц $\leq 0,2 \text{мм}$. Из этих фракций были получены наноразмерные порошки с использованием шаровой мельницы марки АГО-2. Размеры частиц в порошке определены с помощью рентгеновской установки XRD D8 ADVANCE, Bruker, и программы TOPAS-4.2 и EVA. Были получены порошки с размерами $2 \cdot 10^5$; 38; 30 и 15 нм.

Исследование электрических свойств экструдированных объемных наноструктурированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ легированных 0,0005 ат. % Те проводилось на образцах не прошедших отжиг после экструзии, и на этих же образцах, прошедших оптимальный отжиг, при температуре $\sim 503\text{K}$ в течение 5 часов, в интервале температур 90–300K, вдоль длины образца.

В образцах $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$, легированных теллуром, термообработка существенно влияя на электрические свойства образцов приводит к росту электропроводности σ , коэффициентов термоэдс α (в большинстве случаях), Холла R_H , в подвижности носителей заряда μ вычисленной из соотношения $\mu = R_H \cdot \sigma$ в некоторых образцах уменьшению концентрации носителей заряда образцов n . В образце с размерами зерен 32 нм легированных теллуром, влияние термообработки на σ больше, чем в нелегированных образцах с этими же размерами зерен. Минимальное влияние термообработки на s наблюдается в образцах $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$ легированных 0,0005 ат. % Те с размерами зерен 15 нм.

Рентгеновскими методами установлено, что в процессе экструзии материала параллельно с образованием текстуры также образуются дефекты кристаллической решетки, приводящие к усилению рассеяния электронов и фононов т.е. к уменьшению подвижности носителей тока, а так же росту концентрации носителей тока.

В наноструктурированных образцах имеются многочисленные границы между наночастицами (дефекты), которые уменьшают подвижность носителей заряда. При термообработке уменьшается концентрация структурных дефектов результате чего растёт подвижность носителей тока и электропроводность. С уменьшением размеров зерен растёт количество границ зерен и одновременно концентрация носителей тока и электропроводность.

Исследование электрических параметров образцов от размеров наночастиц и термообработки показывают, что в рассеяние носителей тока в них при низких температурах преобладающую роль играет текстура. Изменение электрических характеристик этих образцов с термообработкой удовлетворительно объясняется процессами, происходящими в структуре при горячей экструзии и послеэкструзионной термообработке.

Список литературы

1. Сидоренко Н.А., Дашевский З.М. // ФТП. 2019. Т. 53. В. 5. С. 693–697.
2. Тагиев М.М. // Неорг. материалы. 2021. Т. 57. № 2. С. 119–124.
3. Tagiyev M.M., Abdinova G.D., Barkhalov B.Sh.// Russian Physics Journal. 2022. V. 64. p. 1592–1598.

Экспериментально-аналитическое исследование проблемы компенсации механических напряжений в системе InGaAs множественных квантовых ям для излучателей ближнего ИК диапазона

Салий Р. А.¹, Малевская А.В., Малевский Д.А., Минтаиров С.А., Надточий А.М.,
Калюжный Н.А.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: r.saliy@mail.ioffe.ru

Светоизлучающие диоды (СИД), ближнего инфракрасного (ИК) диапазона широко используются для систем дистанционного управления и оптической связи [1]. Для этих приложений требуется высокая выходная оптическая мощность, которая зависит как от эффективности вывода излучения, так и от внутренней квантовой эффективности активной области СИД. Улучшение эффективности вывода излучения лежит в области решений постростовой технологии и включает: снижение коэффициента отражения излучения на гетерогранице полупроводник-воздух за счет текстурирования поверхности [2], снижение поглощения ИК излучения в ростовой подложке за счет ее удаления, формирование эффективных тыльных отражателей [3]. В свою очередь улучшение внутренней квантовой эффективности СИД достигается за счет эпитаксиальных технологических решений. В высокоэффективных ИК СИД используется активная область с множественными квантовыми ямами (МКЯ), для которой требуется технология компенсации механических напряжений [4, 5]. Компенсация деформаций сжатия и растяжения, возникающих в структурах с МКЯ из-за разницы параметров кристаллической решетки, помогает увеличить критическую толщину системы и, соответственно, увеличивать число КЯ без образования дефектов в активной области СИД.

В данной работе методом металлорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) созданы и исследованы AlGaAs/GaAs структуры, содержащие InGaAs МКЯ и варианты (Al)GaAsP слоев, компенсирующих механические напряжения. Гетероструктуры предназначены для формирования активной области СИД, излучающих на длине волны 940 нм.

Существует два ограничения для термодинамически стабильной системы напряженных слоев МКЯ. Во-первых, критическая толщина отдельного напряженного слоя накладывает ограничение на термодинамическую стабильность каждого слоя системы. Во-вторых, в системе МКЯ отдельный слой КЯ увеличивает общее напряжение массива, что ведет к релаксации в верхних слоях. Путем компенсации деформации сжатия одного напряженного слоя другим, «растягивающим» (или наоборот), критическая толщина массива КЯ может быть увеличена. Для компенсации «растягивающего» напряжения In-содержащей квантовой ямы, выращенной в матрице AlGaAs, мы применяли твердые растворы, содержащие фосфор.

Для расчета оптимальных параметров компенсирующих слоев (КС) был проведен анализ ряда методов [6], основанных на линейной теории упругости сплошных сред:

1. Метод усредненной решетки, который исходит из представления о том, что сбалансированную структуру можно получить путем усреднения по толщине параметров решетки слоев (допускают, что материалы имеют идентичные параметры жесткости); 2. Метод деформации (напряжения), взвешенного по толщине, где полагают равным нулю сумму произведений величин напряжений слоев на их толщины (и дополненный метод, учитывающий постоянные упругости слоев); 3. Метод нулевого напряжения, в котором два механически деформированных слоя, достигают самого низкого энергетического состояния при отсутствии среднего напряжения.

С помощью твердотельной модели [7] определены составы «х» и «у» для $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/(\text{Al})\text{GaAs}_{1-y}\text{Py}$, КЯ/КС, для излучения в диапазоне 930-960 нм, и рассчитана оптимальная толщина этих слоев в рамках указных подходов. Методом МОГФЭ выращены структуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/(\text{Al})\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ с толщиной КС, близкой к расчетным значениям, а также реперная структура $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ МКЯ без КС. Все образцы исследованы путем анализа спектров фотолюминесценции (ФЛ). В результате, во-первых, показано общее увеличение интенсивности ФЛ скомпенсированных МКЯ по сравнению с реперной напряженной структурой более чем на 60%, что говорит об общей эффективности рассматриваемого подхода. Во-вторых, экспериментально определены параметры КС, обеспечивающие наилучшую ФЛ активной области, и, как следствие, повышенную внутреннюю квантовую эффективность СИД. В-третьих, выделены методы, дающие хорошую корреляцию расчетных параметров КС с экспериментом.

Исследованные структуры МКЯ с КС были использованы в активной области гетероструктур СИД с длиной волны 940 нм. Сформированные с помощью разработанных ранее постростовых технологий [2-3] СИД продемонстрировали высокую оптическую мощность (>65 мВт при токе 100 мА) и высокие значения квантовой и энерго-эффективности (>55%). Благодаря бездефектному складированию КЯ продемонстрирована работоспособность СИД при токе накачки до 1 А с высокой выходной мощностью.

Список литературы

1. M. Vasilopoulou, A. Fakharuddin, F. Pelayo García de Arquer, D. G. Georgiadou, H. Kim, A.R. M. Yusoff, F. Gao, M.K. Nazeeruddin, H.J. Bolink, E.H. Sargent, *Advances in solution-processed near-infrared light-emitting diodes*, *Nature Photonics*, v. 15, pp. 656–669, 2021.
2. А.В. Малевская, Н.Д. Ильинская, Н.А. Калюжный, Д.А. Малевский, Ю.М. Задранов, П.В. Покровский, А.А. Блохин, А.В. Андреева, “Исследование методов текстурирования светодиодов на основе гетероструктур $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ ”, *ФТП*, т.55, 11 страницы: 1086–1090, 2021.
3. А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, Р.А. Салий, Ф.Ю. Солдатенков, М.В. Нахимович, Д.А. Малевский, *ПЖТФ*, т.50, 18 страницы: 22–26, 2024.
4. W.-C. An, H.-G. Kim, L.-K. Kwac, J.-S. So, H.-J. Lee, J., *Balanced Strain Compensation of $\text{In}_{0.07}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.2}\text{GaAs}/\text{GaAsP}_{0.06}$ for Improving 940 nm Infrared Light-Emitting Diodes* *Nanosci. Nanotechnol.*, 19, 2224, 2019.
5. Р.А. Салий, А.В. Малевская, Д.А. Малевский, С.А. Минтаиров, А.М. Надточий, Н.А. Калюжный, *Светоизлучающие $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -диоды на основе InGaAs*

скомпенсированных квантовых ям с минимизированными внутренними потерями на поглощение излучения 940 нм. Кристаллогр., т.69, 4, с. 743–752, 2024.

6. N. J. Ekins-Daukes, K. Kawaguchi and J. Zhang, *Crystal Growth & Design*, 2, 4, 287–292, 2002.
7. C.G. Van de Walle, Band lineups and deformation potentials in the model-solid theory, *Physical Review*, v. 39 (3), pp. 1871, 1989.

СВЧ экранирующие свойства природных углеродсодержащих композитов

Королев Р. И.¹, Антонец И. В.¹, Голубев Е. А.²

¹СГУ им Питирима Сорокина

²Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

e-mail: korolev36a@gmail.com

В последние годы значительно увеличился интерес к природным разупорядоченным sp^2 углеродным материалам, обладающим структурой схожей со стеклоуглеродом. Наиболее перспективными природными стеклоуглеродными материалами являются шунгиты Карелии [1], получившие прикладное применение в различных технологических процессах, например, при создании аккумуляторных батарей [2–4], температурных и электрохимических датчиков [5,6].

Особое внимание исследователей привлекает использование шунгитов в качестве экранирующих микроволновое излучение материалов [7–10]. Обнаружено, что в отдельных СВЧ диапазонах эффективность экранирования ультратонких пластин шунгитов может достигать 100%, в первую очередь за счет высокого отражения и поглощения до 45% [10,11]. В настоящей работе впервые исследованы СВЧ отражающие, проходящие и поглощающие свойства ультратонких композитных пластин природного разупорядоченного sp^2 углерода толщиной от 8 до 20 мкм в пяти диапазонах частот от 7.8 ГГц до 56 ГГц.

Для экспериментальных исследований были получены серии пластин природного шунгита с содержанием углерода от 2 до 97 ат. %. Образцы отобраны из нескольких крупнейших проявлений углеродосодержащих материалов Карелии: Максово (ShM, М, 17, 23, 41, 53, 96 ат. %, Karan 55 ат. %), Шуньга (ShSh, 73, 97 ат. %), Чеболакша (ShCh, 34 ат. %), Нигозеро (ShN, 2 ат. %), Тетюгино (Tetug, 54 ат. %), Лебещина (ShL, 49, 64 ат. %), Зажогоно (ShZ, 47 ат. %). Дополнительно исследовались три образца антраксолитов с острова Новая Земля из кварц-карбонатных жил рудопроявления Перья (ANZPr, 96 ат. %), битумного проявления Колумбия (Columb, 90 ат. %) и проявления Красная гора, Карелия (ShKG, 95 ат. %). Все образцы были собраны вручную непосредственно из вмещающих пород. Пластины шунгита толщиной 2–3 мм и размерами 2.5×1.5 см выпилены из цельных кусков горной породы, наклеены с помощью канадского бальзама на стандартное лабораторное стекло толщиной 2.5 мм и шлифованы до толщины 8–20 мкм. Тонкая шунгитовая пластина снималась со стекла при помощи лабораторного скотча.

СВЧ коэффициенты отражения R и прохождения T (по мощности) тонких пластин разупорядоченного углерода определялись при нормальном падении волны в прямоугольном волноводе с использованием панорамных измерителей КСВН в диапазонах частот: 8.24–12.05 ГГц (P2-61), 12.05–17.44 ГГц (P2-67), 17.44–25.86 ГГц (P2-66), 25.86–37.5 ГГц (P2-65), 37.5–53.57 ГГц (P2-68). Для сбора данных с измерителя КСВН использовался четырехканальный 16 битный АЦП ADS1115 подключенный к ПК через микроконтроллер ATmega 328p и преобразователь USB-Serial на базе микросхемы CH340. Два канала АЦП подключались через токоограничивающие резисторы 10 кОм к выводам X и Y разъема «Самописец» измерителя КСВН. Полученные данные передавались через виртуальный СОМ-порт на ПК. Каждый диапазон измерителя градуировался по всем отмеченным делениям шкального устройства. Для устранения сигнала паразитной интерференции полученные данные усреднялись методом взвешенного скользящего среднего. По измеренным R и T вычислялся коэффициент поглощения $A = 1 - R - T$.

Результаты исследований показали для большинства образцов шунгитов постепенное нарастание коэффициента отражения и уменьшение коэффициента прохождения в зависимостях от частоты при переходе от одного диапазона к другому, при этом незначительное изменение R и T внутри каждого диапазона (исключение составляет 37.5–53.57 ГГц, в котором амплитуда колебаний R и T существенно выше). Это обусловлено в первую очередь наличием в структуре шунгита кварца, пирита и других диэлектрических включений, которых в исследуемой части образца тем больше, чем больше размер волновода (с ростом частоты уменьшается). Так для шунгитов М30 с содержанием углерода 25 ат. % СВЧ коэффициент отражения в диапазоне частот 8.24–12.05 ГГц составляет 0.25, а в 37.5–53.57 ГГц может достигать 0.50. Для образца Tetug (55 ат. %) R в аналогичных диапазонах изменяется от 0.68 до 0.85. Максимально эффективное экранирование от 95 до 99.6% за счет высокого отражения обнаружено в диапазонах частот 25.86–37.5 ГГц и 37.5–53.57 ГГц. А наиболее высоким поглощением до 45% обладают образцы в диапазонах частот 17.44–25.86 ГГц, 25.86–37.5 ГГц с содержанием углерода 17–41 ат. %.

Исследование выполнено в рамках госзадания ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» № 075-03-2024-162 по теме «Влияние структуры на статические и динамические электропроводящие свойства разупорядоченного углерода»

Список литературы

1. Melezhik V.A., Filippov M.M., Romashkin A.E., A giant palaeoproterozoic deposit of shungite in NW Russia: Genesis and practical applications. *Ore Geol. Rev.* V. 24, 135–154, 2004.
2. Vazquez-Samperio J., Acevedo-Pe~na P., Guzman-Vargas A., Reguera E., Cordoba-Tuta E., Incorporation of heteroatoms into reticulated vitreous carbon foams derived from sucrose to improve its energy storage performance, *Int. J. Energy Res.*, v. 45, 6383–6394, 2020.
3. Adelhelm P., Cabrera K., Smarsly B.M., On the use of mesophase pitch for the preparation of hierarchical porous carbon monoliths by nanocasting, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, v. 13, 015010, 2012.
4. Chou N.H., Pierce N., Lei Y., Perea-López N., Fujisawa K., Subramanian S., Robinson J.A., Chen G., Omichi K., Rozhkov S.S., Rozhkova N.N., Terrones M.,

- Harutyunyan A.R., Carbon-rich shungite as a natural resource for efficient Li-ion battery electrodes, *Carbon*, v. 130, 105–111, 2018.
5. Fan S., Ji L., Mao G., Sui X., Wang H., Zhu Y., Song H., Voltammetric determination of phentolamine mesylate in pharmaceutical formulations at poly (4- aminobenzene sulfonic acid)-modified glassy carbon electrode, *Chem. Pap.*, v. 74, 4411–4417, 2020.
 6. Guan J.F., Zou J., Liu Y.P., Jiang X.-Y., Yu J.G., Hybrid carbon nanotubes modified glassy carbon electrode for selective, sensitive and simultaneous detection of dopamine and uric acid, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, v. 201, 110872, 2020.
 7. Gupta S., Tai N.-H., Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X-band, *Carbon*, v. 152, 159e187, 2019.
 8. Letellier M., Macutkevicius J., Kuzhir P., Banys J., Fierro V., Celzard A., Electromagnetic properties of model vitreous carbon foams, *Carbon*, v. 122, 217–227, 2017.
 9. Belousova E.S., Radio-shielding properties of concretes based on shungite-containing nanomaterials, *Nanotechnologies Constr. Sci. Electron. J. Minsk. CNT NanoBuilding*, v. 2, 56–67, 2013.
 10. Antonets I.V., Golubev E.A., Shcheglov V.I., Sun S., Electromagnetic shielding effectiveness of lightweight and flexible ultrathin shungite plates, *Current Applied Physics*, v. 29, 97-106, 2021.
 11. Golubev E.A., Antonets I.V., Shcheglov V.I., Static and dynamic conductivity of nanostructured carbonaceous shungite geomaterials, *Materials Chemistry and Physics*, v. 226, №3, 195-203, 2019.

Локализованный поверхностный плазмонный резонанс квазиупорядоченной системы наночастиц Bi в матрице GaAs

Поленок Е.Д.^{1,2}, Берт Н.А.², Иванов А.А.², Преображенский В.В.³, Путятю М.А.³, Семягин Б.Р.³, Снигирев Л.А.², Ушанов В.И.², Яговкина М.А.², Чалдышев В.В.²

¹СПБПУ Петра Великого

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³ИФП СО РАН им.А.В. Ржанова

e-mail: polenok.ed@edu.spbstu.ru

Локализованный поверхностный плазмонный резонанс (LSPR) представляет интерес для современной науки из-за ряда его уникальных свойств, среди которых локализация электрического поля световой волны в нанометровом масштабе и многократное усиление поглощения на резонансной частоте[1].

В оптоэлектронике LSPR не находит широкого применения из-за технологической проблемы: методы формирования наночастиц из традиционных плазмонных материалов не совместимы с эпитаксиальными технологиями роста, применяемыми для коммерческого производства полупроводниковых приборов. В связи с этим возникает спрос на альтернативные плазмонные материалы [2].

В рамках данной работы будет рассмотрен самый многообещающий плазмонный материал для использования с полупроводниками группы AIII BV – висмут [3]. LSPR

наночастиц висмута в матрице GaAs не имеет максимума в окне прозрачности полупроводника, однако, все равно может быть зафиксирован спектрально из-за большой ширины резонансного пика. Для усиления сигнала мы применили особую конфигурацию структуры: периодическое расположение квазидвумерных слоёв наночастиц Bi в матрице GaAs.

Образец, состоящий из 24 дельта-слоёв наночастиц Bi в матрице GaAs был выращен методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Были проведены оптические, электронно-микроскопические и рентгеноструктурные исследования, в которых определены геометрические параметры системы и получены данные о распределении висмута в образце [4].

Получены спектры оптического отражения образца в окне прозрачности GaAs при углах падения света от 25° до 70° с шагом $2,5^\circ$, при S-поляризации. Все максимумы отражения демонстрируют спектральный сдвиг в область коротких длин волн при увеличении угла падения света. Такое поведение свойственно брэгговскому максимуму отражения, который смещается по закону:

$$\lambda_{\max} = 2d\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}} - \sin^2 \theta} \quad (1)$$

где d — расстояние между слоями, ε_{eff} — эффективная диэлектрическая проницаемость вещества, θ — угол падения света.

Для того, чтобы показать, что сдвиг действительно является брэгговским и соответствует квазипериодической системе наночастиц висмута в матрице арсенида галлия, необходимо прибегнуть к численному моделированию. Первым шагом в этом моделировании является описание взаимодействия между электромагнитной волной и наночастицей висмута. Эта задача может быть решена в рамках теории Ми. Поскольку наночастицы висмута имеют форму, близкую к сферической, их оптический отклик может быть описан с помощью поляризуемости следующего вида:

$$\alpha_A(\omega) = 2\pi a^3 \frac{\varepsilon_d(\omega) - \varepsilon_m(\omega)}{\varepsilon_d(\omega) + 2\varepsilon_m(\omega)} \quad (2)$$

где a — радиус частицы, — диэлектрическая проницаемость металла, — диэлектрическая проницаемость среды. Для описания диэлектрической функции материала матрицы GaAs использовалась известная модель Адачи [5]. Данные о диэлектрических свойствах металлических нановключений Bi были взяты из работы Ушанова и др. [3]. Отклик двумерного слоя, состоящего из таких частиц рассчитывался с помощью модели Перссона-Либша [6]. Моделирование спектров оптического отражения было выполнено с помощью метода матриц переноса.

При построении модели мы принимали во внимание, что в процессе роста производилось пять остановок, при которых проводились промежуточные отжиги. Поэтому в модели вся структура была разделена на пять групп, в каждой из которых толщины разделительных слоев GaAs и параметры квазидвумерных слоев нановключений Bi полагались одинаковыми. При этом период в разных группах варьировался от 119 до 161 nm. Диаметры

металлических наночастиц варьировались от 5 до 19 nm. В целом величина вариаций геометрических параметров структуры, использованная при моделировании оптических спектров, соответствовала данным структурных исследований [4]. Спектры оптического отражения, полученные с помощью данного подхода, находятся в хорошем согласии с экспериментальными.

Таким образом, висмут демонстрирует потенциал в качестве альтернативного плазмонного материала для интеграции в полупроводниковые структуры, что открывает новые возможности для разработки полупроводниковых оптоэлектронных устройств с использованием LSPR.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Санкт-Петербургского научного фонда № 24-22-20012, <https://rscf.ru/project/24-22-20012/>.

Список литературы

1. Maier S. A. et al. Plasmonics: fundamentals and applications. – New York : Springer, 2007. – Т. 1. – С. 245.
2. Naik G. V., Shalaev V. M., Boltasseva A. Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver //Advanced materials. – 2013. – Т. 25. – №. 24. – С. 3264-3294.
3. Ushanov V. I. et al. Plasmon Resonance in a System of Bi Nanoparticles Embedded into (Al, Ga) As Matrix //Nanomaterials. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 109.
4. Поленок Е. Д. и др. Формирование квазидвумерных слоев наночастиц висмута в эпитаксиальных пленках арсенида галлия //Физика твердого тела. – 2024. – Т. 66. – №. 9. – С. 1514-1519.
5. Adachi S. GaAs, AlAs, and Al_xGa_{1-x}As: Material parameters for use in research and device applications //Journal of applied physics. – 1985. – Т. 58. – №. 3. – С. R1-R29.
6. Persson B. N. J., Liebsch A. Optical properties of two-dimensional systems of randomly distributed particles //Physical Review B. – 1983. – Т. 28. – №. 8. – С. 4247.

Magnetic nanomaterials for modern technologies of imaging and treatment of human organs

Камзин А. С.

Ioffe Institute

e-mail: kasklen@gmail.com

The report presents the latest developments and studies of magnetic nanoparticles and magnetic nanocomposites required for modern methods and techniques of visualization and treatment of human organs, namely magnetic resonance imaging, magnetic particle imaging, magnetic hyperthermia, targeted drug delivery, etc. If nanoparticles are a single-component (single-phase) material, then nanocomposites (NC) consist of two or more components with different, and often opposite properties, such as hard and soft magnetic materials (HM/SM), ferromagnets and ferroelectrics (FM/FE), graphene and ferrites (G/F). For applications in biomedicine all of these materials are widely studied. For example core/shell (C/S) NCs consist of core? which has high magnetic characteristics, but is often toxic. Therefore the core is coated with a biocompatible

material. Advances in nanotechnology make it possible to synthesize a variety of multifunctional nanomaterials. Combining components with completely different characteristics creates nanocomposites with new unique properties, which opens up new broad opportunities for their various applications.

The report examines the latest advances in the field of creating nanomagnetic materials for biomedical application: the magnetic structure, properties and phase composition of various nanoparticles and nanocomposites. The main attention is paid to experimental data obtained by the Mössbauer spectroscopy (MS) - a highly sensitive and effective method for studying the magnetic structure and phase states of materials. The MS method allows extracting information about the properties of materials that is inaccessible to other known techniques.

In studies of HM/SM nanocomposites ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{La}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{MnO}_3$), it was found that a transition layer with a manganite structure with a small amount of iron $\text{La}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{Mn}(\text{Fe})\text{O}_3$ is formed between hexagonal ferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) and manganite ($\text{La}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{MnO}_3$). In NC of the type (Gr/FeOxide, Gr/ $\text{Fe}_3\text{O}_4+\text{CoFe}_2\text{O}_4$), secondary phases such as hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), iron carbides and iron-depleted carbon clusters were detected, which was confirmed in the works of other authors.

In FM/FE NC ($(x)\text{NiFe}_{204}+(1-x)\text{BaTiO}_3$ or $\text{BiFeO}_3/\text{SrTiO}_3$), which have both magnetic and ferroelectric properties, direct experimental evidence of the existence of a phase transition to a paramagnetic state in $\text{BiFeO}_3/\text{SrTiO}_3$ NC at room temperature was obtained for the first time. Hybrid ceramics consisting of hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 = \text{HxAp}$) and ferrite (Fe_3O_4), as well as HxAp and hexagonal ferrite ($\text{HxAp-BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) were synthesized and studied for the first time. Separately synthesized HxAp and ferrite were then mixed, pressed into tablets and annealed in carbon dioxide for 30 minutes at a temperature of 1200°C . Tests of magnetic bioceramics ($\text{HxAp-BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) in a medical laboratory have shown high efficiency in the hyperthermic treatment of malignant tumors.

In studies of C/S ($\text{FeO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$), ($\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{O}_4$), ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) NCs, it was found that a layer is formed on the surface of the shell in which the spin magnetic moments are skewed relative to the moments inside the shell. Based on the experimental data, a model of the $\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ NC structure is proposed.

The presented research results on the properties of NC are new and unique and were obtained due to the high sensitivity of the Mössbauer spectroscopy method. The studied nanoparticles and nanocomposites are being tested in medical laboratories as promising materials for biomedical applications.

Электронные и транспортные свойства гетероструктуры графен/MoS₂

Шарин Е. П.¹, Балахнин А.В.

¹Noth-Eastern Federal University

e-mail: esharin@yandex.ru

Превосходные физико-химические свойства графена (превосходная термическая стабильность, высокая электропроводность, благоприятная механическая прочность, высокое значение модуля Юнга) вызвали большой интерес не только к его фундаментальным и прикладным аспектам, но и к изучению других двумерных материалов [1,2].

Материалы, которые в последнее время привлекают внимание исследователей, являются дихалькогениды переходных металлов (ДПМ). В отличие от графена монослой MoS₂ и WS₂ являются полупроводниками с естественной запрещенной зоной [3]. ДПМ обладают разнообразными электронными, тепловыми и оптическими свойствами, которые могут дополнять свойства графена. Например, по сравнению с нулевой запрещенной зоной графена, MoS₂ обладает прямой запрещенной зоной, что делает его привлекательным материалом для нанoeлектронных применений, таких как полевые транзисторы с высоким коэффициентом включения-выключения и низким энергопотреблением. Сочетание графена и дисульфида молибдена может улучшить стабильность циклирования и скорость работы MoS₂ в литий-ионных аккумуляторах, однако механизмы, лежащие в их основе, остаются менее изученными.

Мы исследовали электронные и термоэлектрические свойства гетероструктуры монослой графен/MoS₂, которая состоит из монослоя MoS₂ и графена. Изменение электронных структур вблизи уровня Ферми является причиной того, что рассчитанный Зеебеком коэффициенты S и электропроводность σ/T монослоя графен/MoS₂ в значительной степени зависят от таких же коэффициентов графена и монослоя MoS₂. Коэффициент мощности $S^2\sigma/T$ гетероструктуры графен/MoS₂ увеличен по сравнению с показателями графена и монослоя MoS₂ при концентрации электронов от 10^{11} до 10^{12} см⁻². В настоящем исследовании представлена возможность улучшения свойств монослоя MoS₂ путем формирования гетероструктуры монослой графен/MoS₂.

Список литературы

1. K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab, K. Kim, "A roadmap for graphene," *Nature* **490** (7419), 192-200 (2012). DOI: <https://doi.org/10.1038/nature11458>
2. H. Malekpour, K. H. Chang, J. C. Chen, C. Y. Lu, D. L. Nika, K. S. Novoselov, A. A. Balandin, "Thermal conductivity of graphene laminate," *Nano lett.* **14** (9), 5155-5161 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1021/nl501996v>
3. H. S. S. Ramakrishna Matte, A. Gomathi, A. K. Manna, D. J. Late, R. Datta, S. K. Pati, C. N. R. Rao, "MoS₂ and WS₂ analogues of graphene," *Angewandte Chemie International Edition*, **49** (24), 4059-4062 (2010). DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201000009>

Исследование мемристорных структур с односторонней проводимостью на основе Cu_2O

Дзюба Д. А.¹, Саенко А. В.¹, Вакулов З. Е.¹, Смирнов В. А.¹

¹Южный Федеральный Университет

e-mail: dmdzyuba@sfnedu.ru

Среди множества мемристорных структур существует отдельный класс мемристоров с односторонней проводимостью («Self-rectifying memristor structures») [1]. Применение таких структур позволяет уменьшить проблему паразитных токов в мемристорных кроссбар массивах [2], приводящую к ошибкам адресного обращения к ячейкам памяти ReRAM. Таким образом, исследование мемристорных структур с односторонней проводимостью, в частности на основе Cu_2O является актуальной задачей.

С целью исследования влияния материала электродов на свойства резистивного переключения мемристоров с односторонней проводимостью были изготовлены две многослойные структуры $\text{ITO}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Ag}$ и $\text{ITO}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Ni}$. Каждый последующий слой мемристорных структур формировался меньшей площади для возможности контакта зондов в процессе исследования резистивного переключения. Образцы формировались методом магнетронного распыления на установке VSE-PVD-DESK-PRO (ООО «АкадемВак») [3]. Толщины слоёв составили: $\text{ITO} = 250$ нм, $\text{Cu}_2\text{O} = 250$ нм, $\text{Ag} = 150$ нм и $\text{Ni} = 150$ нм.

Измерение вольтамперных характеристик резистивного переключения мемристорных структур проводилось с помощью зондовой станции и измерителя сопротивлений Keithley 6517B. При измерениях вольфрамовые зонды подводились к следующим слоям: Cu_2O и Ag , Cu_2O и Ni , Cu_2O и ITO .

Результаты измерений показали наличие стабильного резистивного переключения на вольтамперных характеристиках при 5 циклах, как в прямом («+» Cu_2O , а «-» Ag или Ni или ITO), так и в обратном включении («-» Cu_2O , «+» Ag или Ni или ITO). Наличие мемристорного эффекта обусловлено нитевидным эффектом – образованием и разрывом проводящих каналов в слое Cu_2O за счёт наличия ионов и вакансий кислорода [4]. Ключевой особенностью, просматривающейся на вольтамперных характеристиках одновременно с мемристорным эффектом, явилась несимметричность ВАХ относительно оси абсцисс, характерная для диодных структур. Вольт амперные характеристики исследовались в интервале от -20 до 20 В. Для структуры $\text{ITO}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Ag}$ при подведении зонда отрицательной полярности к серебру, а положительной полярности к Cu_2O при напряжении 20 В коэффициент выпрямления составил 5, а напряжение отсечки около 11 В. Для структуры $\text{ITO}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Ni}$ при подведении зонда отрицательной полярности к никелю, а положительной полярности к Cu_2O при напряжении 20 В коэффициент выпрямления составил также 5, а напряжение отсечки уменьшилось до 9 В. И при подведении зонда отрицательной полярности к ITO , а положительной полярности к Cu_2O при тех же 20 В коэффициент выпрямления снизился до 2, а запирающее напряжение, наоборот, возросло до 13 В.

Подобное поведение изготовленных мемристоров можно объяснить образованием барьера Шоттки на границах металл-полупроводник. Известно, что омический контакт между полупроводником р-типа и металлом может быть образован только в случае, если работа выхода металла равна или больше, чем у полупроводника р-типа [5]. Работы выходов используемых материалов равны: $A_W = 4,5$ эВ, $A_{ITO} = 4,65$ эВ, $A_{Ag} = 4,7$ эВ, $A_{Ni} = 5$ эВ, $A_{Cu_2O} = 4,8$ эВ. На основании проведённого эксперимента можно сделать вывод, что односторонняя проводимость структуры обусловлена самым высоким из образуемых барьеров Шоттки, т. е. на границе Cu_2O и вольфрамового зонда измерительной станции (Cu_2O/W). Изменение материала второго контакта с полупроводником р-типа (Cu_2O) приводит к уменьшению напряжения отсечки структуры по мере использования материалов с возрастающей работой выхода, что обусловлено уменьшением барьера Шоттки на границах Cu_2O/ITO , Cu_2O/Ag и Cu_2O/Ni (на границе Cu_2O/ITO образуется меньший барьер Шоттки, чем на границе Cu_2O/W , а на границах Cu_2O/Ag и Cu_2O/Ni образуются омические контакты). Этим же обусловлено и увеличение коэффициента выпрямления при измерении резистивного переключения структур через слои Cu_2O/ITO , Cu_2O/Ag и Cu_2O/Ni .

Список литературы

1. Ren, Sheng-Guang & Dong, A-Wei & Yang, Ling & Xue, Yi-Bai & Li, Jian-Cong & Yu, Yin-Jie & Houji, Zhou & Zuo, Wen-Bin & Li, Yi & Cheng, Wei-Ming & Miao, Xiang-Shui. (2023). Self-Rectifying Memristors for Three-Dimensional In-Memory Computing. *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.). 36. e2307218. 10.1002/adma.202307218. | DOI:10.1002/adma.202307218
2. Ziang Chen, Guofu Zhang, Hao Cai, Christopher Bengel, Feng Liu, Xianye Zhao, Shahr Kvatinsky, Heidemarie Schmidt, Rainer Waser, Stephan Menzel and Nan Du / Study on sneak path effect in self-rectifying crossbar arrays based on emerging memristive devices / *Front. Electron. Mater.*, 04 October 2022, Sec. Semiconducting Materials and Devices Volume 2 - 2022 | <https://doi.org/10.3389/femat.2022.988785>
3. Saenko A.V., Tominov R.V., Jityaev I.L., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Polupanov N.V., Smirnov V.A. Transparent Zinc Oxide Memristor Structures: Magnetron Sputtering of Thin Films, Resistive Switching Investigation, and Crossbar Array Fabrication // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14. – P. 1901. | DOI:10.3390/nano14231901
4. Rohini R. Patil and all / Resistive Switching Memory Properties of Electrodeposited Cu_2O Thin Films / *JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS* / Vol. 12 No 2, 02035(4pp) (2020) / DOI: 10.21272/jnep.12(2).02035
5. Schottky W. / Vereinfachte und erweiterte Theorie der Randschicht-gleichrichter. / *Zeitschrift für Physik* Volumen 118, Seite 539–592 (1942). <https://doi.org/10.1007/BF01329843>

Синтез шестигранных наноалмазов в германий-аргоновой электродуговой плазме

Тимеркаев Б. А.¹, А.А. Хуснутдинова¹, Б.Р.Шакиров¹, Н.Г.Андреева¹

¹КНИТУ-КАИ

e-mail: btimerkaev@gmail.com

В недавних работах авторов данной статьи [1, 2] было обращено внимание на роль атомов германия в зарождении и синтезе наноалмазов. Более того, германий может служить центром, структурозадающим атомом, вокруг которого начинает формироваться sp^3 структура алмаза. Но роль германия только этим не ограничивается. В работе Полянова с соавторами [3] было показано, что германий может участвовать и в дальнейшем росте наноалмазов. В этом случае атомы германия вблизи кристалла алмаза создают особое поле, которое способствует формированию sp^3 связей атомов углерода. Задачей данной работы является создание соответствующих условий для роста наноалмазов. В электродуговой аргоно-углеродо-германиевой плазме уже были синтезированы два типа алмаза: в виде четырехгранных бипирамид, и некоторого подобия додекаэдра. Удивительно, что присутствие атомов германия стимулируют образование разных видов наноалмазов. Если германий оказывает каталитическое влияние на синтез наноалмазов и с помощью плазмохимических технологий удастся синтезировать два вида наноалмазов, то возможно реализация и других вариантов синтеза sp^3 структур углерода. Самое главное, надо найти условия, при которых это может быть реализовано.

Плазмохимический реактор для синтеза наноалмазов состоит из вакуумной камеры, систем электрического питания, вакуумирования, газоснабжения. Для прогнозирования распределения температурных полей в плазмохимическом реакторе и создания условий необходимых для синтеза нанокристаллов германия были проведены предварительные численные эксперименты в рамках единой с точки зрения описания газоразрядного промежутка и электродов модели [4–6].

В качестве электродов в работе был использован графит цилиндрической формы диаметром 18 мм. В центральной части поверхности анода было проделано отверстие, в которое помещали каплевидный германий, который приблизительно на 1 мм выступал с поверхности графита. В качестве катода также был использован графит, торец которого был заострен. Электроды были установлены вертикально. Во время экспериментов можно было управлять положением обоих электродов.

Перед экспериментом вакуумная камера было заполнена аргоном до давления 55 кПа. Дугу зажигали путем создания непосредственного замыкания и размыкания контакта между электродами. Была проделана серия экспериментов с различными значениями разрядного тока от 50 до 100А. Дугу поддерживали порядка 10 секунд. При длительном горении дуги уже образовавшиеся наноструктуры на поверхности катода стали испаряться. Наиболее интересные результаты получились при токе 50 А и напряжении 20 В.

Синтезированные образцы на лицевой поверхности катода, были исследованы с помощью электронного микроскопа.

Поперечные размеры наноалмазов оказались порядка 0,6 – 1 мкм. Они представляют собой шестигранные призмы. Боковые грани представляют собой прямоугольники. Некоторое подобие полученным наноалмазам было продемонстрировано в работе [1]. Выращенные в той работе наноалмазы имели два вида морфологии: одни соответствовали классической правильной морфологии в виде граненного шара с шестью квадратными гранями и двенадцатью правильными шестигранниками, а другие наноалмазы представляли структуру тоже с 18ю гранями, но грани представляли прямоугольники и неправильные шестигранники. Таким образом, в работе [1] было показано, что в электродуговой плазме могут быть осуществлен синтез различных видов наноалмазов при наличии германиевых катализаторов. Результаты данной работы подтверждают выводы работы [1]: германиевый катализатор в зависимости условий эксперимента может привести к созданию нано и микроалмазов различных видов.

Таким образом, в данной работе осуществлен плазмохимический синтез нано и микроалмазов в виде шестигранных призм диаметрами порядка 0,6 – 1 мкм и высотами 0,1 – 1 мкм. Морфология полученных наноструктур отличается от ранее синтезированных нано и микроалмазов. Главной причиной отличительных особенностей полученных наноструктур от ранее полученных является интенсивность потока атомарного углерода, которая не позволяет завершить процесс формирования наноструктур.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках соглашения № 075-03-2025-335 от 16.01.2025 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ

Список литературы

1. B. A. Timerkaev, E. A. Kalskova, B. R. Shakirov, R. R. Kurbangaleev, R. R. Shaikhatarov, and I. G. Galeev. The Role of Germanium in the Plasma Chemical Synthesis of Nano and Micro-Diamonds. *High Energy Chemistry*, 2024, Vol. 58, Suppl. 3, pp. S461–S463. DOI: 10.1134/S0018143924701364
2. B. A. Timerkaev, N. G. Andreeva, B. R. Shakirov, A.K. Ilyasov, E. Kalskova, A. A. Sharipova, and R. R. Kurbangaleev. Germanium Catalyst for Synthesis of Carbon Nanotubes and Nanodiamonds in Carbon-argon Plasma *High Energy Chemistry*, 2024, Vol. 58, Suppl. 3, pp. S455–S460. DOI: 10.1134/S0018143924701352.
3. Palyanov Yu.N., Kupriyanov I.N., Borzdov Yu.M., Surovtsev N.V. // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. P. 14789.
4. Saifutdinov A.I., Timerkaev B.A., Saifutdinova A.A. // *JETP Letters*. 2020. V. 112. № 7. P. 405-412.
5. Saifutdinov A.I. // *Journal of Applied Physics*. 2021. V. 129. № 093302.
6. Saifutdinov, A., Timerkaev, B. Modeling and Comparative Analysis of Atmospheric Pressure Anodic Carbon Arc Discharge in Argon and Helium–Producing Carbon Nanostructures. *Nanomaterials*, 2023, 13(13), 1966. <https://doi.org/10.3390/nano13131966>

Нетканые материалы (полотна) сополи(уретан-имидов), аппретированные электропроводящим полипирролом

Диденко А. Л.¹, Шишов М.А., Сапурина И.Ю., Бурсиан А.Э., Саприкина Н.Н., Иванова А.С., Крафт В.Е., Ваганов Г.В., Камалов А.М., Юдин В.Е., Светличный В.М., Кудрявцев В.В.

¹Филиал ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» – Институт высокомолекулярных соединений; Санкт-Петербург

e-mail: vanilin72@yandex.ru

Мультиблочные сегментные сополи(уретан-имиды) (СПУИ) – новые перспективные эластомерные материалы [1,2], сочетающие в себе эластичность, прочность, диэлектрические свойства и теплостойкость. В частности, на основе преполимеров СПУИ с использованием метода электроформования (электроспиннинга) разработаны нетканые полотна в виде проницаемой матрицы, состоящей из микроволокон с регулируемым размером и плотностью [3]. Нами впервые с целью придания нетканому СПУИ материалу электропроводящих свойств нетканые полотна СПУИ аппретированы электропроводящей формой полипиррола (ППи) путем гетерофазного синтеза ППи [4] на поверхности микроволокон СПУИ. Данные сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показывают, что композиционный материал имеет структуру «волокно в оболочке», в которой слой ППи покрывает волокна СПУИ. Электропроводность исходной матрицы СПУИ $10^{-12} - 10^{-14}$ См/см, после аппретирования ППи проводимость увеличилась на 12 порядков и достигла 1.5 ± 0.5 См/см. Слой ППи имеет высокую адгезию к волокнам СПУИ, поэтому композит СПУИ-ППи сохраняет механическую стабильность, имеет хорошие прочностные характеристики при некотором снижении показателей эластичности. Материал имеет омические вольт-амперные характеристики и высокую электрическую стабильность при наложении постоянного электрического потенциала, а также в условиях долговременного (по времени) циклирования потенциала в диапазоне $\pm 1,0$ В. Поверхностные свойства композита СПУИ-ППи (гидрофобность – гидрофильность, пористость) соответствуют свойствам нативного ППи, поэтому могут целенаправленно меняться за счет допирования и редопирования электропроводящего полимера. ППи обладает как электронным, так и ионным типом проводимости, по этой причине при смачивании водным электролитом проводимость композита несколько возрастает. Разработка электропроводящих полимеров на основе СПУИ имеет несомненные перспективы для мобильной электроники (включая сенсоры), изделий медицинского назначения (биоэлектроды, регенерирующие матрицы для электростимуляции роста клеток), электронного текстиля, мембран с электроуправляемыми свойствами.

Исследование ведется в рамках государственного задания: «Полимерные и композиционные материалы для перспективных технологий», регистрационный номер проекта 1023031700040-5-1.4.4. (2024-2027гг)

Список литературы

1. Sang X., Wang R., Chen X., Zhang L., An M., Shen Y. A // *Advanced Materials Research*. 2011; 284-286:1746. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.284-286.1746
2. Ueda T., Inoue S.-I. // *Materials*. 2018;8 ;11. p.p. 264–273. DOI:10.4236/ojopm.2018.81001
3. Didenko A. L. et al, // *Polym Eng Sci*. 2025; V. 65, Issue 2. DOI: 10.1002/pen.27071
4. Zavrazhnykh, N.A., Sapurina, I.Y., Shishov, M.A., Orlov, V.P., Yudin, V.E. // *Polymer Science – Series A*, 2023, 65(3), p.p. 264–273. DOI: 10.1134/S0965545X23700943

Поверхностные плазмон-поляритоны в упорядоченных массивах углеродных нанотрубок с диэлектрическим наполнением

Санников Д. Г.¹, Зайцев В.А.¹, Афанасьев С.А.¹, Моисеев С.Г.^{1,2}, Санников Д.Г.¹, Сыса А.В.^{1,3}, Шаман Ю.П.^{1,3}

¹УлГУ

²УФирЭ им. В. А. Котельникова РАН

³НПК «Технологический центр»

e-mail: sannikov-dg@yandex.ru

В настоящей работе исследованы дисперсионные характеристики поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) терагерцевого диапазона частот в упорядоченных массивах одно- и двустенных углеродных нанотрубок УНТ с учетом затухания, связанного с омическими потерями. Использование численного моделирования методом конечных элементов позволило получить дисперсионные характеристики ППП с учётом взаимного влияния электромагнитных полей соседних нанотрубок в массиве. В численной модели стенки металлических УНТ представлены коаксиальными цилиндрическими проводящими оболочками квазинулевой толщины (двумерными проводящими слоями). Электродинамические характеристики стенок УНТ определяются тензором проводимости, полученным с использованием гидродинамического подхода [1,2].

В качестве базисной модели выбран упорядоченный массив одинаково ориентированных УНТ одинакового диаметра, которые в первом приближении считались бесконечно протяжёнными. Рассмотрены различные вмещающие диэлектрические среды (наполнители) и различные топологии структуры: объёмные массивы УНТ с квадратной и гексагональной элементарной ячейкой, пучки УНТ конечной ширины, плоские массивы УНТ. Для различных расстояний между УНТ в массивах получены частотные зависимости постоянных распространения и затухания, проведён анализ радиального и азимутального распределения напряжённости электрического поля, рассмотрены условия вырождения ППП мод разных порядков. Установлено, что с уменьшением расстояния между нанотрубками постоянные распространения и длины пробега ППП мод разного порядка уменьшаются. Низкочастотная (акустическая) ППП мода нулевого порядка (фундаментальная мода) в двустенных УНТ характеризуется наиболее высокой степенью локализации поля в

области между стенками нанотрубки, что проявляется в слабой чувствительности её дисперсионных характеристик к плотности массива и диэлектрической проницаемости вмещающей среды.

Путём решения в аналитической форме уравнения Гельмгольца в сочетании с набором граничных условий для полей на стенках УНТ получено дисперсионное уравнение для ППП в уединенных нанотрубках, учитывающее диэлектрические проницаемости вмещающей среды. Для разреженных массивов УНТ показано согласование результатов численного и аналитического расчетов. Для разных ППП мод определены границы применимости аналитического решения для расчёта дисперсионных характеристик ППП в массивах нанотрубок.

Результаты исследования могут быть полезны для создания сенсоров, модуляторов, а также генераторов ППП на основе массивов УНТ с накачкой дрейфовым током [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00880).

Список литературы

1. Mowbray D.J., Mišković Z.L., Goodman F.O., Wang Y.N. Physical Review B, vol. 74, p. 195435 (2006).
2. Moradi A. Optics Communications, vol. 283, pp. 160–163 (2010).
3. Afanas'ev S.A., Fotiadi A.A., Kadochkin A.S., Kitsyuk E.P., Moiseev S.G., Sannikov D.G., Svetukhin V.V, Shaman Y.P., Zolotovskii I.O. Photonics, vol. 10(12), p. 1317 (2023).

Проводимость, магнитопроводимость композитных плёнок CoFeB/SiO₂ с разной структурой при температурах 80-400 К и магнитных полях 0-9 Тл

Уткин А.А.¹, Котов Л.Н.¹, Семяшкин И.В.¹, Калинин Ю.Е.², Ситников А.В.²

¹Сыктывкарский государственный университет

²Воронежский государственный технический университет

e-mail: utych@yandex.ru

В последние годы магнитные нанокompозитные материалы привлекают повышенное внимание благодаря их перспективам в области спинтроники, сенсорики и запоминающих устройств. Композитные металл-диэлектрические плёнки демонстрируют широкий спектр свойств и эффектов, зависящих от состава и структуры материала и условий внешнего воздействия. Ряд исследований [1,2] показывает, что структура композитных плёнок играет ключевую роль в формировании их электрических и магнитных свойств, что делает изучение этих материалов актуальной задачей современной физики конденсированного состояния и материаловедения.

В работе исследованы температурные зависимости проводимости и магнитопроводимости (МП) композитных плёнок CoFeB/SiO₂ в интервале температур 80–400 К и в магнитных полях до 9 Тл. Композитные плёнки получены методом ионной бомбардировки с концентрациями металлического сплава $x=0.45-0.83$ [1]. Изменение состава в таком интервале x позволило получить плёнки с гранулированной, гранулярно-перколяционной структурой, а также плёнки с полосовой и матричной структурами. Измерения электрического сопротивления плёнок проводились с помощью четырёх-контактного метода, а микроструктурные исследования выполнялись с помощью метода магнито-силовой микроскопии.

Показано, что проводимость плёнок линейно увеличивается с ростом температуры, что может свидетельствовать о полупроводниковом механизме переноса заряда в композитных плёнках: металл-диэлектрик. Рассчитана энергия активации процессов проводимости: для гранулированных плёнок при $x = 0.45$ она составляет 0.22 эВ, а для плёнок с металлической полосовой структурой $x = 0.49 - 0.02$ эВ. Для плёнок с $x = 0.45-0.49$, обладающих гранулированной структурой с небольшими объёмами перколяционных областей, наблюдается значительная положительная МП, достигающая 230% при 400 К. Для плёнок с $x = 0.56-0.72$, имеющих металлическую магнитную полосовую структуру, эффект МП выражен значительно слабее, возможно, из-за большого вклада в отрицательную МП лоренцевского магниторезистивного эффекта. Максимальные изменения МП наблюдаются для плёнок с гранулированной структурой при $x = 0.45$, в которых при температуре 370 К начинается экспоненциальный рост МП в слабых магнитных полях, что может быть обусловлено термическими процессами магнитного упорядочения в композитном материале. В магнитных полях 5 Тл выявлен переход от положительной к отрицательной МП при 270 К, что, возможно, связано с изменением механизмов рассеяния носителей заряда. В полях до 9 Тл сильное увеличение МП наблюдается в плёнках с гранулированной структурой, в то время как для матричных образцов с $x > 0.8$, магнитопроводимость остаётся практически неизменной. В плёнках с $x = 0.49$ при температуре 100 К наблюдается выраженная зависимость сопротивления от магнитного поля, что, возможно, связано со спин-зависимым транспортом. Для плёнок с большими $x = 0.68$ при 300 К влияние магнитного поля на сопротивление выражено слабее, что, вероятно, подтверждает уменьшение магнитосопротивления для плёнок с металлической полосовой структурой.

Проведённые исследования позволяют сделать предположения о наличии нескольких механизмов формирования магнитопроводимости в композитных плёнках CoFeB/SiO. Анализ температурных зависимостей МП показал, что на её величину может существенно влиять структура материала и соотношение металлических и гранулированных областей. На наш взгляд наиболее существенный вклад в МП композитных металл-диэлектрических плёнок оказывают лоренцевский и туннельный магниторезистивные эффекты. Эти два эффекта дают вклады в магнитопроводимость с разным знаком, а соотношение вкладов зависит от температуры, индукции магнитного поля и структуры плёнок. Результаты проведённых исследований могут быть полезны для разработки новых материалов для магнитоэлектроники, спинтроники, включая биосенсоры и запоминающие устройства.

Исследования были выполнены за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 21-72-20048

Список литературы

1. Л.Н. Котов, А.А. Уткин, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика», 15 (4), 85–92 (2023). DOI: 10.14529/mmph230410
2. L. KotoV, V. Vlasov, P. Kovalev, A. Utkin, Y. Kalinin, A. Sitnikov, V. Ustygov, IEEE Xplore (2023 International Conference on Next Generation Electronics (NEleX), Vellore, India, 2023), 5. 10.1109/NEleX59773.2023.10420863

Влияние положения поверхности образца относительно фокальной плоскости оптической системы на эффективность выхода наночастиц ZnS при лазерной абляции

Харькова А. В.¹, Кочуев Д.А., Хорьков К.С., Вознесенская А.А.

¹Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

e-mail: alenaenergie@gmail.com

Использование субпикосекундных лазерных импульсов для получения наночастиц является эффективным инструментом. Тонкая настройка параметров лазерной абляции позволяет эффективно влиять на свойства получаемых наночастиц. Основными факторами, влияющими на свойства получаемых наночастиц при лазерной абляции, являются среда обработки, плотность мощности лазерного луча [1-3]. В работе рассмотрен процесс синтеза наночастиц сульфида цинка при различном положении обрабатываемой поверхности относительно фокальной плоскости оптической системы. Синтез частиц проведен при помощи фемтосекундной лазерной системы с длиной волны 1030 нм, частота следования импульсов составила 10 кГц, длительность импульса – 280 фс. В качестве среды обработки был использован аргон. В качестве образца использован сульфид цинка, полученный методом CVD. Исследование эффективности выхода материала проводилось при помощи весов марки OHAUS ADVENTUR CRAR, взвешивание образца осуществлялось до и после воздействия лазерного излучения. В процессе получения проб мощность излучения была постоянным параметром и составляла 0,6 Вт, погрешность параметра мощности лазерного излучения в процессе абляции не превышала 0,5%. В ходе экспериментов осуществлялось изменение положения поверхности образца относительно фокальной плоскости в пределах 7 мм с шагом 1 мм, как в вверх, так и вниз по вертикальной оси. Цикл обработки был равен 75 минутам. Зависимость эффективности выхода наночастиц от положения обрабатываемой поверхности образца относительно фокальной плоскости имеет нелинейный характер. В зависимости от положения поверхности образца происходило изменение плотности мощности лазерного луча. При расположении поверхности образца в фокусе, диаметр пятна составлял 67 мкм, что соответствовало плотности энергии 3,404 Дж/см². При данных параметрах выход частиц за один цикл обработки удаленная масса

была равна 41,2 мг. При перемещении образца по вертикальной оси на 5 мм диаметр пятна составил 70,1 мкм, что соответствовало плотности энергии 3,109 Дж/см². Наиболее эффективный режим абляции наблюдается в случае, когда положение фокальной плоскости расположено на 5 мм ниже обрабатываемой поверхности образца, и составило 96,1 мг. Несмотря на идентичные значения плотности мощности при положении поверхности образца на 5 мм ниже от фокальной плоскости удаляемая масса была равна 33,4 мг. Данный факт можно объяснить значительным влиянием лазерного эрозионного факела формирующегося над поверхностью образца на распространение лазерного излучения. В результате проведенных работ осуществлен синтез наночастиц сульфида цинка при фемтосекундной лазерной абляции. Проведено исследование фракционного состава порошка, формы получаемых наночастиц, химического состава, которое позволяет говорить о его возможности применения в качестве сырья для изготовления оптических компонентов. Получена зависимость производительности абляционной обработки в зависимости от положения фокальной плоскости оптической системы относительно обрабатываемой поверхности.

Список литературы

1. Elsayed K. A. et al. Effect of focusing conditions and laser parameters on the fabrication of gold nanoparticles via laser ablation in liquid //Optics & Laser Technology. – 2013. – V. 45. – P. 495-502.
2. Zhang D. et al. Influence of distance between sample surface and focal point on the expansion dynamics of laser-induced silicon plasma under different sample temperatures in air //Optik. – 2020. – V. 202. – P. 163511.
3. Sola D., Peña J. I. Study of the wavelength dependence in laser ablation of advanced ceramics and glass-ceramic materials in the nanosecond range //Materials. – 2013. – V. 11. – P. 5302-5313.

Теоретическое исследование электронной структуры ультратонких 2D полиморфов HgTe

Гавриков А. А.¹, Кузнецов В.Г.², Колобов А.В.¹

¹РГПУ им. А.И. Герцена

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: antongavr@gmail.com

Открытие графена [1] вызвало взрывной интерес к поиску других двумерных (2D) материалов, важных для различных приложений в оптоэлектронике, спинтронике, солнечной энергетике [2,3] и т.д. Большинство 2D материалов, таких как гексагональный нитрид бора (h-BN), халькогениды металлов, дихалькогениды переходных металлов, получают из трехмерных (3D) слоистых структур посредством механического или химического расслоения отдельных слоев с ковалентной связью внутри слоя, удерживаемых вместе слабыми ван-дер-Ваальсовыми (вдВ) силами. Помимо слоистых 3D материалов, существуют ряд таких как, например, силицен и германен, которые имеют стабильные 2D структуры и обладают широким спектром интересных свойств.

Большое значение для практического материаловедения и кристаллической инженерии имеет полиморфизм, поскольку позволяет контролировать свойства материала путем контроля/изменения его структуры. Полиморфизм в 2D материалах, демонстрируя широкий спектр атомных структур, составов и связанную с ними универсальность свойств, представляет особый интерес для рационального проектирования 2D материалов в атомарно тонком пределе с предопределёнными архитектурами и новыми функциональными возможностями.

Целью данной работы является исследование методом функционала плотности электронной структуры ультратонких 2D полиморфов теллурида ртути, как в фазе сфалерита, так и в инвертированной фазе с граничными атомами халькогена. Интерес к данной задаче инициирован инверсной зонной структурой полуметалла HgTe, обладающей тем уникальным свойством, что в центре зоны Бриллюэна зона проводимости Γ_6 s-симметрии оказывается ниже по энергии валентной зоны Γ_8 p-симметрии. Инверсная зонная структура объемного HgTe является причиной появления квантового спинового эффекта Холла в 2D квантовых ямах HgTe/CdTe.

Расчеты энергетических зон объемного HgTe и ультратонких 2D пластин были проведены методом функционала плотности (DFT) с учетом спин-орбитального взаимодействия (Spin-Orbit Coupling, SOC) по плосковолновому коду Quantum Espresso. При этом был использован обобщенно-градиентный обменно-корреляционный функционал в форме PBEsol с учетом хаббардовского одноузельного отталкивания (GGA+U). Выбор метода GGA+U обусловлен тем, что полулокальные GGA функционалы не воспроизводят инверсный порядок зонной структуры объемного HgTe и характерный для тривиальных изоляторов порядок зонной структуры нанопластины 1ML HgTe, при котором s-зона Γ_4 лежит выше p-зон $\Gamma_{5,6}$. [4, 5].

Расчеты зонных структур объемного HgTe и нанопластины 1ML HgTe воспроизвели результаты предшествующих работ [4, 5], тем самым верифицировав наш метод расчета, и явились реперными для расчетов зонных структур нанопластин 2ML и inv-2ML HgTe.

Расчеты зонной структуры нанопластины 2ML HgTe продемонстрировали инверсный порядок зон $\Gamma_{5,6} - \Gamma_4$ и двугорбый характер валентной зоны и зоны проводимости в окрестности точки Γ . Вблизи уровня Ферми форма зонной структуры пластины 2ML HgTe, не обладающей центром инверсии, обнаруживает сходство с зонной структурой, характерной для вейлевских полуметаллов второго типа.

Зонная структура 2D полиморфа inv-2ML HgTe также имеет инверсный порядок зон, при котором s-зона Γ_4^- находится ниже по энергии p-зон $\Gamma_{5,6}^-$ и двугорбую структуру зон в окрестности точки Γ , но при этом ширина запрещенной зоны оказывается ненулевой.

АВК благодарен Герценовскому университету за поддержку данного исследования в рамках внутреннего гранта № 43-ВГ; ВГК выполнял работу в рамках госзадания Минобрнауки РФ (тема FFUG-2024-0042). Часть расчетов проводилась на суперкомпьютере ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Список литературы

1. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov. *Science* 306, 666 (2004).
2. M. S. Xu, T. Liang, M. M. Shi, H. Z. Chen. *Chem. Rev.* 113, 3766 (2013).
3. A. L. Ivanovskii. *Russ. Chem. Rev.* 81, 571 (2012).
4. J. Li, C. He, L. Meng, H. Xiao, C. Tang, X. Wei, J. Kim, N. Kioussis, G. M. Stocks, J. Zhong. *Sci Rep.* 5, 14115 (2015).
5. J. Anversa, P. Piquini, A. Fazzio, T. M. Schmidt. *Phys. Rev. B.* 90, 195311 (2014).

Структурные свойства твердого раствора GaInAsSbBi на разориентированной подложке GaSb

Пащенко А. С.^{1,2}, Блохин Э.Е.¹, Никулин Д.А.^{1,2}

¹ФИЦ ЮНЦ РАН

²ФГАОУ ВО СКФУ

e-mail: semicondlab@ssc-ras.ru

Для выращивания полупроводниковых тонких пленок все большую популярность приобретает метод импульсного лазерного напыления (pulsed laser deposition) [1–6]. Основными преимуществами импульсного лазерного напыления (ИЛН) перед другими методами физического осаждения является возможность контроля стехиометрии пленок [7, 8], снижение температуры подложки для выращивания тонких пленок III–V [9], дискретное поступление потока вещества от мишени к подложке в промежутках времени между лазерными импульсами. На сегодняшний момент главным недостатком метода является присутствие капель на ростовой поверхности. К моменту написания публикации было известно об одном случае выращивания GaInAsSbBi на подложке GaSb в 2022 году [10]. В нашем исследовании будут представлены результаты по выращиванию твердого раствора GaInAsSbBi на разориентированной подложке GaSb методом ИЛН. Подложки GaSb имеют параметр решетки, близкий к другим соединениям III-V групп, а узкая ширина запрещенной зоны позволяет создавать на них гетероструктуры в среднем инфракрасном диапазоне. В выращивании твердотельных гетероструктур разориентированные подложки используются для улучшения структурного качества эпитаксиальных слоев [11, 12]. Актуальность введения Bi в твердые растворы III-V групп обусловлена тем, что в 2007 году был открыт эффект антипересечения валентной зоны при добавлении металлоидов в GaAs [13], а затем в 2013 году была теоретически предсказана возможность преодоления нескольких фундаментальных недостатков светоизлучающих устройств ближнего и среднего инфракрасного диапазона, обусловленных оже-рекомбинацией и спин-орбитальным расщеплением в валентной зоне [14]. В этом же исследовании было показано, что соединения с Bi и Sb имеют наибольшую энергию спин-орбитального расщепления, которая смещает профиль валентной зоны внутрь запрещенной зоны, уменьшая ее. Кроме того, соединения с висмутом, из-за его большого физического размера, получили применение в новом классе сильно рассогласованных полупроводниковых сплавов (highly mismatched semiconductor alloys (HMAss)) [15]. Указанные выше факты показывают высокую практическую актуальность

разработки такого класса полупроводниковых материалов. В этой связи целью работы являлось выращивание твердого раствора GaInAsSbBi на подложке GaSb (001) методом ИЛН и исследование его морфологии и структурных свойств.

Образцы были выращены методом ИЛН [1, 6]. В качестве подложки были использованы пластины GaSb(Te) с разориентацией 6° между кристаллическими плоскостями (100) и (111)А. Исследование структурных свойств и морфологии проводилось методами просвечивающей электронной (ПЭМ), сканирующей электронной (СЭМ) и атомно-силовой микроскопией (АСМ), а также рентгеновской дифракцией (РД). Элементный анализ и картирование выполнялись методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией.

Результаты РД показали, что плёнка является поликристаллической и неоднородной. Основная фаза соответствует кубической структуре типа сфалерита. Исследования методом ПЭМ показали хорошее согласование с РД. На светопольных и темнопольных ПЭМ-изображениях (режим дифракционного контраста) видны границы зерен перпендикулярные плоскости гетерограницы. Размер зерен сравним с толщиной плёнки, которая достигает ≈ 40 нм. Плёнка состоит из зёрен, ориентированных преимущественно случайным образом. Элементный анализ показал, что все элементы мишени (Ga, In, As, Sb, Bi) присутствуют в плёнке. Состав плёнки определяется как $\text{Ga}_{0,75}\text{In}_{0,25}\text{Sb}_{0,1}\text{As}_{0,87}\text{Bi}_{0,03}$. СЭМ-изображения поверхности плёнки, показывают незначительную шероховатость поверхности и наличие редких капель на ней, которые пока еще присущи методу ИЛН и обусловлены несколькими факторами: сурфактант эффектом Bi, сегрегацией In, сложными процессами поверхностной диффузии.

Полученные результаты показывают, что при усилении контроля роста в методе ИЛН возможно улучшить кристаллические свойства твердых растворов GaInAsSbBi на разориентированных подложках GaSb, а также свидетельствуют о перспективности применения метода ИЛН для эпитаксиального выращивания сильно рассогласованных полупроводниковых сплавов на основе III–V–Bi соединений.

Авторы выражают благодарность Девицкому О.В. (ФИЦ ЮНЦ РАН, СКФУ) за помощь в выращивании образцов.

Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № 125011200148-9.

Список литературы

1. S. Pashchenko, O. V. Devitsky, L. S. Lunin, I. V. Kasyanov, D. A. Nikulin, O. S. Pashchenko. Structure and morphology of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates grown by pulsed laser deposition // *Thin Solid Films*. 2022. Vol. 743, P.139064.
2. N. A. Shepelin, Z. P. Tehrani, N. Ohannessian, C. W. Schneider, D. Pergolesi, T. Lipert. A practical guide to pulsed laser deposition // *Chemical Society Review*. 2023. Vol. 52. P.2294-2321.
3. T. K. O. Vu, M. T. Tran, E. K. Kim. Optimization of active antireflection ZnO films for p-GaAs-based heterojunction solar cells // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 924. P.166531.

4. V.A.S. Kandadai, V. Gadhamshetty, B. K. Jasthi. Effect of buffer layer and substrate growth temperature on the microstructural evolution of hexagonal boron nitride thin films // *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 447. P.128805
5. Chanchal, K. Jindal, A. Pandey, M. Tomar, P. K. Jha. Phase-defined growth of In_2Se_3 thin films using PLD technique for high performance self-powered UV photodetector // *Applied Surface Science*. 2022. Vol. 595. P.153505.
6. S. Pashchenko, O. V. Devitsky, M. L. Lunina, E. M. Danilina, O. S. Pashchenko, B. Ber, V. I. Sakharov. Epitaxial growth of GaInAsBi thin films on Si (001) substrate using pulsed laser deposition // *Vacuum*. 2024. Vol. 227. P.113372.
7. W. C. McGinnis, A. Hening. Relative effects of pulsed laser deposition parameters on the stoichiometry of thin films // *Thin Solid Films*. 2023. Vol. 764. P.139603.
8. D. T. Yimam, H. Zhang, J. Momand, B. J. Kooi. Pulsed laser deposited stoichiometric GaSb films for optoelectronic and phase change memory applications // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2021. Vol. 133. P.105965.
9. T. N. Van, E. Laborde, C. Champeaux, F. Dumas-Bouchiat, D. T. Quang, T. N. Vu, C. N. Xuan, D. T. H. Giang, T. P. Van. Tunability of optical properties of InSb films developed by pulsed laser deposition // *Applied Surface Science*. 2023. Vol. 619. P.156756.
10. R. A. Carrasco, C. P. Morath, J. V. Logan, K. B. Woller, P. C. Grant, H. Orozco, M. S. Milosavljevic, S. R. Johnson, G. Balakrishnan, P. T. Webster. Photoluminescence and minority carrier lifetime of quinary GaInAsSbBi grown on GaSb by molecular beam epitaxy // *Applied Physics Letters*. 2022. Vol. 120. P. 031102.
11. E. A. Emelyanov, A. V. Vasev, B. R. Semyagin, M. Yu. Yesin, I. D. Loshkarev, A. P. Vasilenko, M. A. Putyato, M. O. Petrushkov, V. V. Preobrazhenskii // *Semiconductors*. 2019. Vol. 53. No. 4. P. 503–510.
12. A. E. Marichev, R. V. Levin, G. S. Gaggis, A. B. Gordeeva. Obtaining solid solutions of InGaAsP in the spinoidal decomposition region // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 741. P.012039.
13. K. Alberi, J. Wu, W. Walukiewicz, K.M. Yu, O.D. Dubon, S.P. Watkins, C.X. Wang, X. Liu, Y.-J. Cho, J. Furdyna. Valence-band anticrossing in mismatched III–V semiconductor alloys // *Physical Review B*. 2007. Vol. 75. P.045203.
14. C. A. Broderick, M. Usman, E.P. O'Reilly. Theory of the Electronic Structure of Dilute Bismide Alloys: Tight-Binding and $k \cdot p$ models. In: H. Li, Z.Wang (eds) *Bismuth-Containing Compounds* // *Springer Series in Materials Science*. 2013. Vol. 186. Springer. New York. NY.
15. W. Walukiewicz, J. M. O. Zide. Highly Mismatched Semiconductor Alloys: From Atoms to Devices // *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 127. P.010401.

Фотокаталитические материалы на основе диоксида титана

Дорогов М. В.¹, Чиркунова Н.В.^{1,2}

¹Университет ИТМО

²Тольяттинский государственный университет

e-mail: mvdorogov@itmo.ru

Фотокатализ рассматривается как один из способов решения современных экологических проблем и энергетического кризиса, поскольку процесс осуществляется только за счет солнечной энергии. Большое внимание уделяется получению новых фотокаталитических материалов чувствительных к видимому свету. Наноматериалы на основе диоксида титана считаются перспективными полупроводниковыми фотокатализаторами благодаря стабильности, высокой фотокаталитической активности и отсутствия токсичности. К минусам диоксида титана относят то, что он проявляет фотокаталитическую активность только при УФ-облучении из-за ширины запрещенной зоны, которая для фазы анатаз составляет 3,2 эВ [1].

В настоящее время предложено ряд способов, позволяющих сдвинуть фотокаталитическую активность TiO_2 в видимую область спектра облучения, например, добавление металлических и неметаллических допирующих элементов [2]. Также предложены различные подходы для управления формой и огранкой нанокристаллов, формирования гетеропереходов с другими полупроводниками и добавления со-катализаторов из благородных металлов (Au или Pt) с целью улучшения разделения зарядов. Так обработка гидрированием в различных условиях (давление, температура и т.д.) приводит к образованию серо-черных форм TiO_2 , которые демонстрируют сильное поглощение видимого и ближнего инфракрасного света, при этом чем темнее цвет, тем выше способность поглощать свет, поэтому «черный TiO_2 » показывает самую высокую интенсивность поглощения видимого света [3].

В настоящей работе исследуются оптические и фотокаталитические свойства диоксида титана, различной морфологии и размера, получаемые методами гитротермального и золь-гель синтеза. Повышение фотокаталитической активности диоксида титана осуществлялось механическим со-допированием оловом и серой. Отмечается, что помимо допирования дополнительно реализуется механическая активация материала, которая так же оказывает влияние на фотокаталитические свойства [4]. В работе исследованы структурные, дисперсные и морфологические свойства полученных образцов. Химический состав определяли методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии, морфологию оценивали с помощью сканирующей электронной микроскопии, внутреннюю структуру исследовали методом рентгеновской дифракции, ширину запрещенной зоны рассчитывали из спектров диффузного отражения, снятых на спектрофотометре с интегрирующей сферой, а электронную структуру изучали методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

Отмечено, что морфология и размеры наночастиц диоксида титана в процессе механического со-допирования практически не изменяются. На дифрактограмме полученных нанопорошков фиксируются рефлексы от анатаза и рутила, что показывает внедрение олова и серы в структуру диоксида титана. Установлено, что механическое со-допирование оловом и серой позволяет уменьшить ширину запрещенной зоны диоксид титана с 3.2 эВ (чистый) до 2.98 эВ (допированный оловом и серой 5 ат. %).

Фотокаталитическую активность полученных в работе материалов определяли в классическом емкостном реакторе периодического действия на реакции разложения органического модельного загрязнителя метиленового синего как в УФ, так и в видимом диапазоне света. Показано, что полученные фотокатализаторы обладают высокой фотокаталитической активностью при деградации модельного поллютанта [5].

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSER-2025-0005).

Список литературы

1. C.H.A. Tsang, K. Li, Y. Zeng, W. Zhao, T. Zhang, Y. Zhan, R. Xie, D.Y.C. Leung, H. Huang, Titanium oxide based photocatalytic materials development and their role of in the air pollutants degradation: Overview and forecast, *Environment International*, 2019, vol. 125, pp. 200–228
2. X. Chen, S.S. Mao, Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications and applications, *Chemical Reviews*, 2007, vol. 107, no. 7, pp. 2891–2959.
3. N. Liu, X. Zhou, N.T. Nguyen, K. Peters, F. Zoller, I. Hwang, C. Schneider, M.E. Miehllich, D. Freitag, K. Meyer, D. Fattakhova-Rohlfing, P. Schmuki, Black Magic in Gray Titania: Noble-Metal-Free Photocatalytic H₂ Evolution from Hydrogenated Anatase, *ChemSusChem*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 62–67.
4. N.V. Chirkunova, M.V. Dorogov, Effect of Heat Treatment on Titanium Dioxide Co-Doped with Tin and Sulfur, *Reviews on Advanced Materials and Technologies*, 2024, vol. 6, no. 1, pp. 24–28.
5. N.V. Chirkunova, M.M. Skryabina, M.V. Dorogov, SolGel Prepared TiO₂ Photocatalyst, *Reviews on Advanced Materials and Technologies*, 2020, vol. 2, no. 3, pp. 44–50.

Исследование структурных особенностей природного разупорядоченного углерода методом текстурного анализа изображений ВРЭМ

Устюгов В. А.¹, Антоненц И. В.¹, Голубев Е. А.²

¹СГУ им. Питирима Сорокина

²ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

e-mail: ustyugov@syktsu.ru

Значительная удельная проводимость природных углеродсодержащих материалов с содержанием чистого углерода более 80%, разделенного прослойками кварца, обеспечивает возможность создания весьма дешевых и в то же время высокоэффективных экранирующих и поглощающих покрытий [1,2]. При этом углеродная составляющая таких

материалов сформирована в виде слоев графена различной ориентации, образующих пачки, ленты и глобулы [3,4]. Наиболее удобным для исследования такой сложной структуры является метод высокоразрешающей растровой электронной микроскопии (ВРЭМ) [5,6]. Однако ключевым остается вопрос интерпретации микроизображений и определение структурных элементов, отвечающих за проводимость.

В наших ранних исследованиях разработаны алгоритмы распознавания микро- и наноразмерных проводящих и непроводящих фаз и оценка их распределения для природного разупорядоченного углерода методами двух- и трехуровневой дискретизации [7,8]. Однако определение структурных элементов в данных работах выполнялось вручную (“на глаз”), что затрудняет обеспечить повторяемость результатов. Настоящая работа посвящена автоматизированному анализу ВРЭМ изображений природного разупорядоченного углерода с применением технологии компьютерного зрения и анализа текстуры с десятиуровневой дискретизацией. Методика предварительной обработки изображений и вариант алгоритма выделения структурных элементов на основе метода поиска по шаблону представлен в работе [9].

Современные алгоритмы позволяют определить множество численных показателей текстур (текстурных признаков Харалика [10]): энергия, контраст, гомогенность, энтропия. Последняя активно применяется для сегментации изображений физических объектов (микрофотографий минералов, биологических тканей, спутниковых снимков поверхности Земли и др.) по характерной текстуре составляющих их изображений.

Предварительная обработка ВРЭМ изображений разупорядоченного углерода заключалась в его переводе в формат оттенков серого, когда значение каждого пикселя характеризуется числом в пределах $[0; 255]$. Для выделения структурных элементов исходные карты размером 40×40 нм разбивались на фрагменты 60×60 пикселей, что соответствовало площади участка образца 2×2 нм². Выбранный размер участка согласован с характерной шириной слоев, составляющих пачки и ленты. Алгоритм, реализованный на языке Python, вычисляет гистограмму изображения, содержащую относительные количества пикселей с определенным значением яркости. В качестве метрики для оценки текстуры в пределах участка образца выбиралась энтропия по Шеннону. Полученные значения энтропии сохранялись в матрице размером 20×20 по числу фрагментов исходного изображения. Для дальнейшего анализа значения матрицы нормировались, то есть приводились к диапазону чисел $[0; 1]$.

Основные преимущества получаемых алгоритмом матриц энтропии:

- независимость значений энтропии от угла поворота изображения образца;
- возможность сопоставления энтропии фрагментов образца, находящихся на различных уровнях вдоль оси, перпендикулярной плоскости образца, поскольку значение энтропии определяется статистическими свойствами гистограммы, а не конкретными значениями пикселей.

На основании полученных матриц энтропии по Шеннону была проведена оценка структурных свойств образцов шунгита. По пороговому значению энтропии выделены участки, не содержащие структурных элементов. Методом нахождения локальных максимумов матриц определены компактные фрагменты, содержащие пачки. Выделены широкие структурированные области образцов, содержащие ленты, а также конгломераты различных структурных элементов.

Исследование выполнено в рамках госзадания ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» № 075-03-2024-162 по теме «Влияние структуры на статические и динамические электропроводящие свойства разупорядоченного углерода»

Список литературы

1. Antonets I.V., Golubev Ye.A., Shcheglov V.I., Sun, S., Electromagnetic shielding effectiveness of lightweight and flexible ultrathin shungite plates. *Curr. Appl. Phys.*, v. 29, 97–106, 2021.
2. Antonets I.V., Golubev Ye.A., Shcheglov V.I. et. al., Estimation of local conductivity of disordered carbon in a natural carbon-mineral composite using a model of intragranular currents, *J. Phys. Chem. Solids*, v. 171, 110994, 2022.
3. Zhang L., Deng F., Chen X., Zhang S., Xing X., Liu Z., Catalytic Role of High Pressure in the Graphitization of Amorphous Carbon, Fuller. Nanotub. Carbon Nanostruct., v. 31, 1171–1179, 2023
4. Golubev Ye.A, Antonets I.V., Electrophysical Properties and Structure of Natural Disordered sp² Carbon, *Nanomaterials*, v. 12, 3797, 2022.
5. Rouzaud J.N., Clinard C. Quantitative High-Resolution Transmission Electron Microscopy: A Promising Tool for Carbon Materials Characterization, *Fuel. Proc. Technol.* v. 77–78, 229–235, 2002.
6. Pesin L.A., Baitinger E.M. A New Structural Model of Glass- like Carbon, *Carbon*, v. 40, 295–306, 2002.
7. Antonets I.V., Golubev E.A., Shcheglov V.I., Evaluation of microstructure and conductivity of two-phase materials by the scanning spreading resistance microscopy, *Ultramicroscopy*, v. 222, №3, 113212, 2021.
8. Antonets I.V., Golubev E.A., Shcheglov V.I., Application of the trinary discretization method for the structural analysis of natural disordered sp² carbon, Fuller. Nanotub. Carbon Nanostruct., v. 32, № 3, 246–253. 2024.
9. Устюгов В.А., Антоненц И.В., Голубев Е.А. Автоматизированный анализ изображений микроскопии шунгитов. Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика, т. 53, № 4, 69–83, 2024.
10. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein H, Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. SMC-3, №6, 610–621, 1973.

Оптические и фотоэлектрические свойства многослойных структур GaN/InP, сформированных методом плазмохимического атомно-слоевого осаждения

Ярчук Э. Я.^{1,2}, Уваров А.В.², Максимова А.А.^{1,2}, Гудовских А.С.^{1,2}

¹СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

²СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: ernst_yarchuk@mail.ru

В условиях нарастающей потребности в возобновляемых источниках энергии солнечная энергетика занимает центральное место в современной науке. Стремление к более эффективному преобразованию солнечного излучения в электричество мотивирует разработки новых материалов с требуемыми фотоэлектрическими характеристиками, и их комбинирование в создании солнечных элементов.

В настоящей работе исследуется возможность использования решеточно-согласованных с кремниевой подложкой многослойных композиций GaN/InP для формирования верхнего перехода. Использование бинарных соединений нитрида галлия и фосфида индия с противоположно различающейся постоянной кристаллической решетки относительно кремниевой подложки позволяет компенсировать упругие напряжения. Вариация толщины квантовых ям InP позволит достичь необходимого значения эффективной ширины запрещенной зоны для верхнего перехода (1.7-1.8 эВ) [1]. Для формирования короткопериодных сверхрешеток GaN/InP с резкими границами раздела и низким фоновым уровнем легирования было применено плазмохимическое атомно-слоевое осаждение при температурах, не превышающих 400°C. Для исследования оптических и электрических свойств слои GaN и InP формировались данным методом на кварцевых подложках. В многослойных GaN/InP структурах толщина слоёв GaN и InP варьировалась в диапазоне от 0.3 до 3 нм и от 0.6 до 6 нм, соответственно [2].

Структурные свойства исследовались с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния с использованием лазера на длине волны 532 нм на спектрометре EnSpectr R532. Оптические свойства исследовались по результатам измерения спектров пропускания и отражения слоев, осажденных на кварцевых подложках, в диапазоне длин волн 400-1200 нм. Спектры фотолюминесценции для слоев GaN, InP и структуры GaN/InP измерялись с возбуждением лазером на длине волны 798 нм при комнатной температуре. Для исследования фотоэлектрических свойств на поверхности слоев InP и GaN/InP структур методом термического вакуумного напыления через свободную маску наносились серебряные контакты.

Для сверхрешеток GaN/InP, выращенных на кварцевых подложках, наблюдается основной пик фотолюминесценции на длине волны 890 нм (1.39 эВ) и слабое «плечо» на длине волны 908 нм. При этом по их спектрам коэффициента поглощения был определен край поглощения по методу Тауца [3] для прямозонных полупроводников, который соответствует энергиям 1.3–1.35 эВ.

В ходе исследования были измерены температурные зависимости темновой и фото-проводимости, что позволило оценить фотоэлектрические свойства пленок на основе сверхрешеток GaN/InP, а также отдельных слоев GaN и InP. Микрорекристаллические слои InP продемонстрировали высокое значение фотопроводимости, что обуславливает перспективность этого материала для использования в фотоэлектрических преобразователях, работающих в диапазоне длин волн 350-950 нм. Фотопроводимость многослойных GaN/InP структур, измеренная в планарной конфигурации на кварце, существенно ниже. Однако следует заметить, что в такой конфигурации темновая проводимость GaN/InP структур также существенно ниже и демонстрирует экспоненциальную зависимость от обратной температуры. Проводимость многослойных GaN/InP структур может быть связана с барьерами на границе раздела GaN/InP. Полученные значения энергии активации для различных образцов со слоями GaN и GaN/InP, находящиеся в диапазоне 0.1-0.5 эВ, демонстрируют зависимость между толщиной пленки и структурными свойствами, их анализ будет представлен в работе.

Список литературы

1. Исследование квантовых ям InP/GaP, полученных методом газовой фазной эпитаксии / А. И. Баранов, А. В. Уваров, А. А. Максимова и др. // Письма в ЖТФ. 2023, том 49, №6. С. 16–20. DOI: 10.21883/PJTF.2023.06.54810.19404
2. Baranov, A. I., Kleider, J. P., Gudovskikh, A. S., Darga, A., Nikitina, E. V., & Egorov, A. Y. (2016). Deep-level study of Ga(In)P(NAs) alloys grown on Si substrates. Journal of Physics: Conference Series, 741, 012077. DOI:10.1088/1742-6596/741/1/012077
3. Tauc, J., Grigorovici, R., & Vancu, A. (1966). Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Germanium. Physica Status Solidi (b), 15(2), 627–637. DOI:10.1002/pssb.19660150224

Создание пленок нитрида кремния с высоким содержанием кремния.

Гердт А. Д.¹, Литвинов М.А.²

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

²СПбПУ

e-mail: alexandrgerdt1999@gmail.com

В настоящее время нитрид кремния используется не только в качестве изоляционного слоя полупроводниковых приборов, но и находит применение в оптических устройствах, микромеханических системах и фотонных интегральных схемах. Для таких современных вариантов применения требуется производить пленки нитрида кремния не только высокого качества, но и получать параметры получаемых пленок в диапазонах, которые ранее не требовались.

Нитрид кремния с высоким показателем преломления обладает высокими нелинейными характеристиками [1]. Кроме того, устройства, совместимые с комплементарным металл-

оксидным полупроводником технологией (КМОП) легко интегрируются с интегральными схемами, что обеспечивает широкий масштаб применения.

Нитрид кремния обогащенный кремнием может иметь коэффициент преломления в широком диапазоне, оптические линейные и нелинейные свойства будут зависеть от стехиометрического состава получаемого нитрида кремния от Si_3N_4 (низкий коэффициент преломления) до Si (высокий коэффициент преломления).[2]

Исторически первым методом получения нитрида кремния является химическое осаждение из газовой фазы (chemical vapor deposition – CVD метод). Так как полученные данным методом пленки близки к стехиометрическим, в них практически невозможно изменить показатели преломления, в отличие от плазмохимического осаждения (Plasma enhanced CVD – PECVD метод). Первоначально этот вариант процесса развивали для уменьшения температуры нанесения диэлектрических слоев. Данный метод не строго химический, а состав зависит от множества факторов таких как: температура, плотность ВЧ мощности, состава газовой смеси и т.д. Особо следует обратить внимание, что пленки полученные методом PECVD имеют содержание суммарной концентрации $[\text{H}]$ до 40 ат. %, ухудшая плотность пленок. Такие пленки в литературе обозначаются $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$, слои получаются не стехиометрические, что требуется для получения нитрида кремния с высоким показателем преломления. Коэффициент преломления такого нитрида кремния будет пропорционально зависеть от содержания кремния в матрице Si-N . Кроме того при разработке технологических процессов на PECVD требуется обратить внимание на конформность пленок. [3]

Примесь водорода в пленках нитрида кремния образует зоны поглощения сигнала [4], для уменьшения количества водорода в пленках, нитрид кремния наносился без содержания аммиака в газовой смеси. Таким образом газохимический режим состоял из трех газов: разбавленный аргон до 5% моносилан, азот, аргон. Сделано пять образцов с изменяющимся потоком чистого моносилана 1, 2, 4, 8, 10 sccm соответственно, при этом суммарный поток азота и аргона оставался постоянным. В качестве подложки использовался $\text{GaAs}[100]$ толщиной 625 мкм, выбранный для уменьшения влияния подложки при проведении рентгеноспектрального анализа. Осаждение нитрида кремния происходило при температуре 400 °C, давлении 126Па, ВЧ мощности 26Вт в течении 10 минут.

В результате проведения рентгеновского микроанализа удалось получить данные об интенсивности пиков кремния и азота. После нормировки полученных результатов было выявлено, что при потоке моносилана в 10sccm содержание кремния в образце превысило содержание азота более чем в 2 раза.

Следующим этапом стала оценка толщины выращенных пленок, для этого был выбран сканирующий электронный микроскоп как средство оценки толщины полученных пленок. Выяснено, что содержание азота в смеси газов избыточное для выбранного режима осаждения, так как имеются ограничения по подаче моносилана в 10sccm, при котором скорость роста пленки максимальна в данном эксперименте, примерно 32 нм/мин. А выйти на избыток моносилана не оказалось возможным.

Необходимые параметры слоя диэлектрика для получены как для СВЧ технологии (скорость осаждения более 5 нм/мин, разброс толщины пленки на пластине 100мм менее $\pm 3\%$, показателя преломления 1.97-2.05), так и для оптических устройств с нелинейными характеристиками (в матрице диэлектрика кремния в два раза больше, чем азота).

Список литературы

1. K. Ooi, D. Ng, T. Wang, A. Chee, S. Ng, Q. Wang, L. Ang, A. Agarwal, L. Kimerling, D. Tan, *Nat. Commun.* 2017, 8, 13878.
2. Blumenthal, D. J., Heideman, R., Geuzebroek, D., Leinse, A. & Roeloffzen, C. Silicon nitride in silicon photonics. *Proc. IEEE* **106**, 2209–2231 (2018).
3. Васильев, В. Ю. Технология получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Ч. 3. Плазмоактивированные процессы в проточных реакторах // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20, № 9. С. 542-554.
4. Ay F., Aydinli A. Comparative investigation of hydrogen bonding in silicon based PECVD grown dielectrics for optical waveguides. *Optical materials*. 2004 Jun; 26(1): 33–46.

Динамика лазерных пучков в массиве углеродных нанотрубок под действием механической нагрузки

Трофимов Р. Р.¹, Конобеева Н.Н.¹

¹ВолГУ

e-mail: r.trofimov@volsu.ru

Целью настоящей работы является исследование влияния поля напряжений, возникающего под действием механической нагрузки в массиве углеродных нанотрубок, на характеристики лазерных пучков, распространяющихся в такой среде.

Как известно, многие свойства углеродных нанотрубок [1] используются в различных прикладных областях для улучшения характеристик материалов, при разработке новых устройств, а в сфере нелинейной оптики позволяют управлять параметрами лазерных импульсов, способствуя их бездифракционному распространению [2]. В последнем случае важно учитывать не только особенности самой среды, но и воздействие внешних полей, в том числе и акустического.

Учет акустического поля проводится при помощи калибровочной теории, и вызывает появление поля напряжений [3], которое приводит к поправке к полю лазерного пучка:

$$A' = a \cdot u \quad (1)$$

где a коэффициент пропорциональности, определяемый электронным параметром Грюнайзена, коэффициентом Пуассона и невозмущенным интегралом перескока электронов в УНТ, u – поле деформаций.

С использованием метода медленно меняющихся амплитуд и фаз [4] получено уравнение на интенсивность электромагнитного пучка $|\Phi|^2$:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} + 2i\kappa \frac{\partial \Phi}{\partial \tau} - \Phi \sum_{q=1}^{\infty} \sum_{s=1}^m b_{s,q} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(-1)^r q^{2r+1} |\Phi|^{2r}}{2^{2r+1} r!(r+1)!} = 0 \quad (2)$$

здесь (ξ, τ) – координаты, κ – волновой вектор, $b_{s,q}$ – коэффициенты, получающиеся при вычислении скорости электронов на основе закона дисперсии для углеродных нанотрубок типа zig-zag $(m, 0)$.

Уравнение (2) аналогично нелинейному уравнению Шрёдингера, которое решалось с помощью разностной схемы Бессе[5].

В результате проведенного исследования выявлено, что поле напряжений оказывает существенное влияние на динамику лазерных пучков, проявляющееся в основном в изменении их ширины.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ) (грант № 23-71-00016, <https://rscf.ru/project/23-71-00016/>). Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P.C. Eklund. Science of fullerenes and carbon nanotubes. New York: Academic Press, 1996, 965 p.
2. N.N. Konobeeva, E.G. Fedorov, N.N. Rosanov, A.V. Zhukov, R. Bouffanais, M.B. Belonenko. Journal of Applied Physics, V. 126, P. 203103 (2019).
3. M.A.H. Vozmediano, M.I. Katsnelson, F. Guinea. Physics Reports, V. 496, P. 109-148 (2010).
4. Н.Н. Ахмедиев, А. Анкевич. Солитоны. Нелинейные импульсы и пучки. М.: Физматлит, 2003, 304 с.
5. A. Besse. SIAM Journal on Numerical Analysis, V. 42. no. 3. P. 934-952 (2004).

Особенности диэлектрических спектров пленок йодида серебра, легированных медью

Тимофеева И. О.¹, А.В. Ильинский², Р.А. Кастро¹, А.В. Климов², А.А. Кононов¹, С.В. Сенкевич^{1,2}, Е.Б. Шадрин²

¹РГПУ им. А.И. Герцена

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: timof-ira@yandex.ru

Твердотельные ионные проводники, в частности, AgI, активно изучаются в связи с перспективностью их практического применения. В частности, для создания энергоемких

электрических аккумуляторов, а также конденсаторов с большой удельной электроемкостью [1-2].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния легирования Cu на механизм фазового перехода (ФП) пленок AgI из гексагональной β -фазы в кубическую объёмно-центрированную α -фазу и продолжает исследования, начатые в работе [3].

Исследованные пленки AgI и AgI:Cu представляли собой тонкие (0,2-0,8 мкм) поликристаллические пленки, синтезированные методом испарения в вакууме слоя Ag (или смеси Ag и 5 объемных % Cu) на подложках из оптической слюды толщиной 40 мкм. После синтеза нагретая до 150 °С пленка Ag помещалась на 45 мин. в атмосферу паров иода, создаваемых возгонкой кристаллического I при температуре порядка 110 °С. В результате возгонки возникали монослойные нанокристаллические пленки AgI (или AgI:Cu). Монослойность подтверждалась АФМ - контролем топографии поверхности пленок, проводившимся в Центре коллективного пользования АФМ - микроскопии и вакуумного напыления РГПУ им. А. И. Герцена. Измерения диэлектрических спектров (ДС) выполнялись в интервале температур 40 – 190 °С в частотном диапазоне ($10^{-1} \div 10^7$) Гц на спектрометре Novocontrol концепт 41 Центра коллективного использования РГПУ им. А. И. Герцена. Известно, что в нелегированной пленке AgI ФП происходит вблизи $T_c = 147$ °С и является комплексным мотт-пайерлсовским ФП полупроводник – суперионник [4-5].

Диэлектрические спектры пленок демонстрировали следующие особенности: в высокочастотной области ($10^6 \div 10^7$) Гц максимум на частотной зависимости мнимой части $\varepsilon''(f)$ и ступенька на частотной зависимости вещественной части $\varepsilon'(f)$ комплексной диэлектрической проницаемости смещались с ростом температуры в сторону высоких частот.

В работе установлены также следующие различия физических параметров нелегированных и легированных Cu пленок AgI:

- легирование медью приводит к укрупнению зерен пленки от 0,240 мкм (для нелегированного AgI) до 0,7 мкм (для легированного);
- температура ФП у легированных пленок AgI:Cu на 5°С выше, чем у нелегированных, и составляет $T_c=155$ °С;
- при легировании уменьшается резонансная частота особенностей ДС, но возрастает амплитуда этих особенностей. Данный факт свидетельствует о некотором уменьшении удельной проводимости материала при легировании Cu при одновременном росте концентрации свободных равновесных электронов. С большой долей вероятности можно утверждать, что уменьшение проводимости, сопровождаемое ростом концентрации свободных электронов, обусловлены падением подвижности равновесных электронов при увеличении температуры образца.

Список литературы

1. Н.В. Никоноров, А.И. Сидоров, В.А. Цехомский. Оптический журн., 75 (12), 61 (2008).

2. R. Khaton, S. Kashiwagi, T. Iimori, N. Ohta. Appl. Phys. Lett., 93 (23), 234102 (2008).
3. А.В. Ильинский, Р.А. Кастро, В.А. Климов, А.А. Кононов, И.О. Попова, Е.Б. Шадрин. ФТП, 66 (12), 2092 (2024).
4. А.В. Ильинский, Р.А. Кастро, В.А. Климов, М.Э. Пашкевич, И.О. Попова, Е.Б. Шадрин. ФТП, 57 (8), 624 (2023).
5. Т.Ю. Вергентьев, Е.Ю. Королева, Д.А. Курдюков, А.А. Набережнов, А.В. Филимонов. ФТТ, 55 (1), 157 (2013).

Экспериментально-теоретическое исследование формирования наночастиц с помощью лазерной абляции в водной среде для биомедицинских приложений

Лукашенко С.Ю.^{1,2}, Фроня А.А.¹, Григорьева М.С.¹, Маврешко Е.И.¹, Иванов Д.С.¹.

¹ФИАН РАН, ²ИАП РАН

e-mail: lukashenko13@mail.ru

Исследование режимов и механизмов формирования наночастиц методом лазерной абляции тонких плёнок в воде представляет значительный интерес для современной науки и технологий. Актуальность данной работы обусловлена растущим спросом на наночастицы с контролируемыми свойствами для применения в медицине, катализе, электронике и ряде других областей [1]. Лазерная абляция в жидкости является перспективным методом, обеспечивающим высокую чистоту получаемых наночастиц, что особенно важно для биомедицинских приложений [2]. Основная задача синтеза заключается в получении наночастиц с нанометровым размером (10–15 нм) и узким распределением (2 нм). Для решения этой задачи используется комплекс экспериментальных и теоретических методов. Экспериментальные методы включают в себя сканирующую зондовую микроскопию, просвечивающую электронную микроскопию и анализ размерного распределения методом динамического светового рассеяния, что даёт возможность установить оптимальные режимы лазерного воздействия и механизмы формирования наночастиц [3]. Теоретическое исследование основано на численном моделировании с использованием метода молекулярной динамики (МД).

Результаты моделирования фемтосекундной лазерной абляции тонких серебряных плёнок в воде указывают на формирование двух распределений наночастиц с размерами ~8–10 нм и ~30–40 нм, что объясняется разными механизмами их образования [4]. Первый механизм связан с быстрой конденсацией металлического пара, полученного вследствие абляции через механизм фазового взрыва. Второй механизм – с распадом гидродинамических неустойчивостей Рэлея–Гейлора на границе металл–вода, возникающих вследствие извлечения материала через механизм спалляции, – приводит к формированию более крупных наночастиц (~30–50 нм) [4–6].

Цель настоящей работы — исследовать взаимодействие пико- и наносекундных лазерных импульсов с золотыми наноплёнками (10–40 нм), а также определить оптимальные

параметры лазерного импульса и режимы облучения мишени (длина волны, длительность импульса, энергия импульса, частота повторения), при которых формируются наночастицы диаметром ~ 10 нм с узким распределением по размерам.

Моделирование формирования наночастиц под воздействием лазерного импульса производилось методом МД. Численные эксперименты выполнялись с использованием параллельного вычислительного кода, позволяющего моделировать объем материала, достаточного для эквивалентных измерений в эксперименте. Размеры вычислительной области составляют $100 \text{ нм} \times 100 \text{ нм} \times 1000 \text{ нм}$ (толщина пленки золота 20 нм, слой воды 200 нм), что позволяет проводить прямое сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

Проведённые расчёты позволили установить пороговые значения флюенса, необходимые для получения наночастиц требуемых свойств, и выявить механизмы их формирования. Показано, что при длительности лазерного импульса 1 пс и поглощенной энергии (0,5–2,0) Дж/см² золото может переходить в различные фазовые состояния — от расплавленного до сверхкритической жидкости и газовой фазы, в зависимости от величины поглощенной энергии, что существенно влияет на размеры и морфологию формирующихся наночастиц. Экспериментальные результаты, полученные методом динамического светорассеяния, подтвердили образование коллоидных растворов с наночастицами, размеры которых соответствуют результатам моделирования. Результаты исследования имеют важное значение для биомедицинских применений.

Список литературы

1. Zavestovskaya I. N., Kolobov A. V., Ryabov V. A. Current status and development of nuclear physics methods of proton therapy at the Lebedev Physical Institute // *Physics–Uspekhi* 67(9), 866–887 (2024).
2. Pastukhov A. I., Belyaev I. B., Bulmahn J. C., Zelepukin I. V., Popov A. A., Zavestovskaya I. N., Klimentov S. M., Deyev S. M., Prasad P. N., Kabashin A. V. Laser-ablative aqueous synthesis and characterization of elemental boron nanoparticles for biomedical applications // *Sci. Rep.* 12, 9129 (2022).
3. Bonse J., Baudach S., Krüger J., Kautek W., Lenzner M. Femtosecond laser ablation of silicon – modification thresholds and morphology // *Appl. Phys. A* 74(1), 19–25 (2002).
4. Shih C.-Y., Wu C., Shugaev M. V., Zhigilei L. V. Atomistic modeling of nanoparticle generation in short pulse laser ablation of thin metal films in water // *J. Colloid Interface Sci.* 489, 3–17 (2017).
5. Sylvestre J.-P., Kabashin A. V., Sacher E., Meunier M., Luong J. H. T. Femtosecond laser ablation of gold in water: influence of the laser-produced plasma on the nanoparticle size distribution // *Appl. Phys. A* 80(4), 753–758 (2005).
6. Kutlubulatova I. A., Grigoryeva M. S., Dimitreva V. A., Lukashenko S. Yu., Kanavin A. P., Timoshenko V. Yu., Ivanov D. S. Molecular dynamics modeling of pulsed laser fragmentation of solid and porous silicon nanoparticles in liquid media // *Int. J. Mol. Sci.* 24(19), 14461 (2023).

Тонкая структура диэлектрических спектров пленок VO₂

Шадрин Е. Б.¹, А.В. Ильинский¹, А.А. Кононов¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: shadr.solid@mail.ioffe.ru

Целью настоящего доклада является демонстрация эксклюзивных возможностей диэлектрической спектроскопии как метода исследования природы фазовых превращений (ФП). Подобного рода новые возможности основаны на уникальном преимуществе данного метода, которое базируется на том факте, что параметры ФП, недоступные исследованию другими экспериментальными методами, непосредственно проявляются в диэлектрических спектрах (ДС) и могут быть детально изучены.

В докладе проанализированы особенности экспериментально измеренных ДС нелегированных тонких пленок диоксида ванадия. Данные спектры интересны тем, что в области температуры совершения ФП полупроводник-металл (50-70°C) при изменении температуры образца наблюдается не только термический сдвиг резонансной частоты расположения максимумов особенностей ДС, но и изменение величины спектральных особенностей в максимуме, а также и форма этих особенностей. А именно, имеет место не наблюдавшаяся ранее тонкая структура особенностей ДС.

Численные расчеты, хорошо согласующиеся с результатами измерений, демонстрируя характер температурных изменений тонкой структуры ДС, обусловленных изменением соотношения между суммарными площадями, занимаемые **двумя различными** типами нанокристаллитов пленки VO₂ с моноклинной (I) и тетрагональной (II) симметрией решётки. Установлено, что с ростом температуры электронный ФП Мотта увеличивает удельную проводимость нанокристаллитов пленки на **три порядка** и стимулирует структурный ФП Пайерлса. В то же время структурный ФП скачком увеличивает удельную проводимость нанокристаллита лишь на **порядок**. Таким образом, впервые показано, что электронный ФП Мотта экспериментально проявляется в сильном и плавном увеличении при росте температуры частотных положений особенностей ДС, тогда как структурный ФП Пайерлса – в перераспределении интенсивностей между максимумами I и II в ДС.

Молекулы 2-метилбензимидазолперхлората $C_8H_8N_2 \cdot HClO_4$ в нанопорах боратных стекол: рентгеновские и диэлектрические исследования

Левин А. А.¹, Фокин А.В.¹, Балашова Е.В.¹, Кричевцов Б.Б.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: aleksandr.a.levin@mail.ioffe.ru

В настоящее время интенсивно проводятся поиск и исследования наноматериалов, к основным типам которых относятся тонкие пленки, жидкие суспензии, пористые материалы и нанокомпозиты типа наполнитель/матрица [1]. В этой связи особый интерес представляют наполнители, имеющие фазы ионного жидкого кристалла (ИЖК) или ионной жидкости (ИЖ), поскольку их переход из кристаллического состояния в фазу ИЖК или ИЖ сопровождается очень сильными изменениями проводимости. Целью данной работы явилось получение наноструктурированных материалов, образующихся при заполнении нанопор боратных стекол молекулами 2-метилбензимидазолперхлората $C_8H_8N_2 \cdot HClO_4$ ($MBI \cdot HClO_4$), изучение их кристаллической структуры и диэлектрических свойств.

В работе [2] было показано, что при комнатной температуре ионные кристаллы $MBI \cdot HClO_4$ образованы катионами $MBI \cdot H^+$ и анионами ClO_4^- . При повышении температуры происходит переход из фазы ионного кристалла в фазу ИЖК, а при расплавлении образуется ИЖ, состоящая из указанных выше катионов и анионов.

Введение молекул $MBI \cdot HClO_4$ в нанопоры боратных стекол с диаметрами пор $\varnothing \sim 3$ nm (образцы '3nm-70' и '3nm-80' с заполнением пор на 70 % и 80 % соответственно) и 7 nm (образец '7nm' со степенью заполнения 70–80%) осуществлялось помещением незаполненных стекол в расплав $MBI \cdot HClO_4$. Исследование кристаллической структуры проводилось методом рентгеновской дифракции (РД) с использованием дифрактометра D2 Phaser (Bruker AXS, Германия). Диэлектрические исследования проводились в температурном интервале 295 – 450 К и частотном диапазоне 25 – 10^6 Hz с помощью измерителя иммитанса E7-20 или LCR meter MIT 9216A.

Все наблюдаемые РД рефлексы от исследованных образцов отнесены к решетке $MBI \cdot HClO_4$. Анализ профилей рефлексов и количественный Ритвельдовский анализ РД картин свидетельствуют о наличии в образцах нанокристаллитов $MBI \cdot HClO_4$ разного размера D с близкими параметрами элементарной ячейки (фазы p1, p2 и p3 с наибольшим, средним и наименьшим размером кристаллитов соответственно).

Аналогично боратым стеклам, заполненным MBI [3], наибольшее количество кристаллитов $MBI \cdot HClO_4$ имеет размер D , близкий к диаметру пор (93.1 wt.%, 85.3 wt.% и 62.4 wt.% фазы p3 для образцов '3nm-70', '3nm-80' и '7nm' соответственно). В образцах '3nm-70', '3nm-80' и '7nm' кристаллиты фазы p1 с наибольшими размерами $D \approx 235$ nm, 68 nm и 53 nm показывают наименьшее содержание 2.1 wt.%, 2.6 wt.% и 3.2 wt.% соответственно. Содержание фазы p2 с промежуточным $D \approx 93$ nm, 40 nm и 24 nm в этих образцах составляет 4.8 wt.%, 12.1 wt.% и 34.4 wt.% соответственно.

Методы РД дают информацию о среднем размере D кристаллитов в направлении перпендикулярном поверхности пластины, на которую падают рентгеновские лучи. В пористых стеклах реализуется случайное расположение пор, в результате чего некоторые участки пор идут перпендикулярно или почти перпендикулярно поверхности стекла или под углом относительно нее, в то время как другие располагаются параллельно ей (соответственно участки '1', '2' и '3'). Вероятно, фаза p1 с наибольшим размером кристаллитов формируется на перпендикулярных участках '1', фаза p2 с промежуточными D – на наклонных участках '2', а фаза p3 с $D \approx \emptyset$ – на параллельных участках '3'. Возможно, также какая-то часть фазы p2 образуется и на участках '1', а часть фазы p3 – и на участках '1' и '2'.

При увеличении температуры от комнатной до соответствующей переходу наполнителя в фазу ИЖ происходит постепенное увеличение емкости C структуры на 2 порядка и проводимости s на 3–4 порядка. Во всем интервале измерительных частот наблюдается сильная частотная зависимость s по переменному току, при этом в отличие от кристаллов и пленок $\text{MBI} \cdot \text{HClO}_4$, проводимость по постоянному току в наноструктурах не проявляется. Это свидетельствует о том, что сквозных каналов проводимости не возникает. Сильные температурные изменения емкости при относительно небольших потерях делают такие наноструктуры перспективными для разработки датчиков температуры.

Список литературы

1. Y. Kumzerov, S. Vakhrushev. Nanostructures within porous materials. In Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, ed. H. S. Nalwa, American Sci. Publ.: Los Angeles, CA, USA, 2004 Vol. 3, p. 811–849.
2. E. Balashova, A. Zolotarev, A. A. Levin, V. Davydov, S. Pavlov, A. Smirnov, A. Starukhin, B. Krichevstov, H. Zhang, F. Li, H. Luo, H. Ke, Materials, 2023, 16(5), 1994. <https://doi.org/10.3390/ma16051994>
3. E. Balashova, A.A. Levin, A. Smirnov, V. Davydov, S. Pavlov, A. Starukhin, A. Fokin, D. Kurdyukov, D. Eurov, B. Krichevstov, Int. J. Mol. Sci., 2023, 24(18), 13740, <http://dx.doi.org/10.3390/ijms241813740>

Анизотропия оптических свойств опалоподобных фотонных кристаллов, синтезированных из композитных полимерных частиц типа ядро/оболочка

Селькин А. В.¹, Нещерет В.И.², Шевченко Н.Н.³, Якобсон О.Д.³

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Санкт-Петербургский государственный университет

³филиал ФГБУ «Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» –Институт высокомолекулярных соединений

e-mail: alexander.selkin@mail.ioffe.ru

Успехи в изучении и применении фотонных кристаллов (ФК) [1] неразрывно связаны с уровнем технологии изготовления ФК, обладающих наиболее совершенной трехмерной

кристаллической структурой. В этой связи в качестве многообещающих элементов структуры ФК выступают полимерные частицы, синтезированные на основе стирола и/или его сополимеров с акрилатными сомономерами. При этом считается, что синтез композитных частиц со структурой ядро/оболочка открывает новые возможности для формирования низкодефектных полимерных ФК с большой полезной рабочей площадью [2,3].

В настоящей работе проведены комплексные исследования спектров брэгговского отражения и пропускания света полимерными пленками опалоподобных ФК. Пленки получены в результате седиментации монодисперсных частиц ядро/оболочка, синтезированных методами эмульсионной полимеризации. В качестве затравочных ядер использованы частицы на основе сополимера стирола с метилметакрилатом и метакриловой кислотой [3]. Формирование оболочки, содержащей звенья метилметакрилата и бутилакрилата, осуществлялось непрерывным способом сразу же после синтеза ядра. Установлено, что в таких условиях образуются частицы ядро/оболочка сферической формы (в виде глобул) с минимальным разбросом по диаметру.

Измерения спектров выполнены в поляризованном свете при разных углах падения θ и азимутальных ориентациях φ образцов. В спектрах отражения обнаружены интенсивные структурированные полосы брэгговской дифракции, которые детально сопоставлены со спектральными кривыми пропускания. Построены зависимости от углов θ и φ положений спектральных особенностей в отражении и пропускании, которые проанализированы с помощью теоретических расчетов, выполненных в рамках модифицированного кинематического подхода [4] (учитывающего эффекты многоволновой дифракции). В результате сопоставления спектральных экспериментальных и теоретических данных установлены численные значения основных ФК-параметров исследованных пленок: периоды кристаллической решетки, латеральное расстояние a_{00} между ближайшими глобулами на поверхности образца, средняя (фоновая) диэлектрическая проницаемость и толщина пленки. Данные растровой электронной микроскопии (РЭМ) позволили напрямую оценить среднее расстояние a_{00} , между частицами, морфологию поверхности и степень структурного совершенства двумерной решетки наружного слоя частиц. Оказалось, что значения a_{00} , определенные двумя разными методами (с помощью РЭМ и в результате теоретической обработки спектров), различаются между собой не более чем на 1.5%. Этот факт подтверждает обоснованность использованного теоретического подхода.

Экспериментальные спектры демонстрируют рекордное ФК-качество полученных полимерных пленок (по сравнению с ранее исследованными пленками, изготовленными с применением других технологических приемов). Это обстоятельство позволило нам провести особо тщательные измерения смещений резких особенностей спектров в зависимости от значений θ и φ . Азимутальное (при изменении φ) поведение спектров при фиксированных значениях θ в условиях наклонного падения света ($30^\circ < \theta \leq 80^\circ$) демонстрирует симметрию спектров относительно поворота образца вокруг нормали [111] к поверхности (шестого порядка для отражения и третьего порядка в случае пропускания). Различие между свойствами оптической симметрии в пропускании и в отражении объясняется

неравнозначным вкладом в регистрируемый сигнал двух типов доменов, содержащих разные (типа ABC... и типа CBA...) последовательности упаковки кристаллических слоев в направлении нормали к поверхности. Наблюдаемые особенности поведения спектров, связанные с симметрией относительно азимутальных поворотов ФК, обсуждаются с точки зрения общих соображений, диктуемых свойствами симметрии к обращению времени.

Список литературы

1. Lv X, Zhong B., Huang Y. et al. // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2023. 36:39. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00836-2>.
2. Li H., Wu P., Zhao G., Guo J., Wang C. // Journal of Colloid and Interface Science. 2021. V. 584. P. 145. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.09.084.
3. Shevchenko N.N., Iakobson O.D., Ivan'kova E.M., and Sel'kin A.V. // Polymer Science, Series B. 2024. V. 66, No.1, P. 79. DOI: 10.1134/S1560090424600335.
4. Ukleev T. A., Yurasova D. I., Shevchenko N. N., Sel'kin A. V. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 769. P. 012051.

Исследование влияния температуры на параметры решетки и фазовую сегрегацию твердого раствора $\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{F}_2$ на $\text{Si}(001)$ с эпитаксиальным подслоем CaF_2

Алексеев Е. А.¹, Кавеев А.К.²

¹СПБАУ РАН

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alexugor@gmail.com

Одним из представителей класса топологических изоляторов, представляющих собой перспективные материалы [1] спинтроники, является соединение $\text{Pb}_{1-y}\text{Sn}_y\text{Te}$ (PST) при значениях $y > 0.35$ [2]. Однако процесс выращивания данного материала с использованием технологии молекулярно-пучковой эпитаксии все еще сопряжен с рядом трудностей, связанных с недостаточной гладкостью получаемых слоев, что необходимо для снижения рассеяния носителей заряда. В связи с этим одной из ключевых задач для практического применения материалов данного класса является разработка методов получения пленок с низким уровнем дислокаций несоответствия на интерфейсах. Рост PST на $\text{Si}(111)$ с применением метаморфного буферного слоя $\text{BaF}_2/\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{F}_2/\text{CaF}_2$ ранее исследовался в работе [3]. В данной работе для обеспечения более плавного перехода по постоянной решетки в комбинированный буферный слой $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$ была дополнительно внедрена прослойка твердого раствора (ТР) $\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{F}_2$. В силу отличия топологических свойств поверхностей PST с различными кристаллографическими ориентациями, рост PST на $\text{Si}(001)$ также представляет интерес. С этой целью необходимо создание и изучение на таких подложках метаморфных буферных слоев, позволяющих в дальнейшем осуществить рост PST с минимальной дефектностью интерфейсов. Кроме того, благодаря возможности управления составом ТР $\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{F}_2$, а также достаточно большому интервалу между значениями параметров решетки объемных кристаллов ($5.462 \text{ \AA}$ для CaF_2 и 6.200

А для BaF_2), метаморфные буферные слои на основе вышеупомянутых фторидов также можно будет использовать при росте целого ряда соединений группы A_3B_5 .

В настоящей работе методом молекулярно-пучковой эпитаксии было выращено семейство гетероструктур на основе системы $\text{Ca}_{0.625}\text{Ba}_{0.375}\text{F}_2/\text{CaF}_2(T_3=650^\circ\text{C})/\text{CaF}_2(T_3=250^\circ\text{C})/\text{CaF}_2(T_3=350^\circ\text{C})/\text{Si}(001)$. Морфология поверхности исследовалась методом атомно-силовой микроскопии, а структурные характеристики - методом рентгенодифракционного анализа (РДА). В работе [4] был описан двухстадийный рост буферного слоя CaF_2 . Для уменьшения количества поверхностных дефектов нами был сделан переход к трехстадийному росту, благодаря которому удалось снизить количество дефектов на 20%.

Для всех образцов, содержащих прослойку CaF_2 , характерно растяжение этой прослойки в латеральном направлении, и сжатие в ортогональном. Было показано, что увеличение температуры роста ТР приводит к уменьшению его параметра решетки, а также, начиная с некоторой пороговой температуры, меняется величина стехиометрического параметра x , т.е. выявлена сегрегация ТР с выделением эпитаксиального BaF_2 . Последнее было показано путем анализа карт распределения интенсивности дифракционных рефлексов РДА, где были обнаружены четко разделимые рефлексы ТР и BaF_2 . Были вычислены значения параметров решетки всех указанных компонент и проанализированы их температурные зависимости.

Список литературы

1. Hsieh T. et al, Topological crystalline insulators in the SnTe material class // Nature Commun., 2012, V.3, №. 982.
2. Xu S. et al, Observation of a topological crystalline insulator phase and topological phase transition in $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ // Nature Commun., 2012, V.3, №.1192.
- А. К. Kaveev et al, Epitaxial synthesis of hybrid heterostructures based on calcium-barium fluoride solid solutions on silicon substrates and X-ray diffraction studies of their lattice parameters // CrystEngComm, 2025, doi: 10.1039/D4CE00967C
3. S. M. Suturin et al, An advanced three-dimensional RHEED mapping approach to the diffraction study of $\text{Co/MnF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}(001)$ epitaxial heterostructures // J. Appl. Crystallogr., 2016, V.30, p. 1532-1543

Моделирование гетероструктуры графен-фосфорен-графен методом классической молекулярной динамики с использованием потенциала межатомного взаимодействия, полученного методами глубокого обучения

Завьялов Д.В.¹, Конченков В. И.^{1,2}, Полянский Е. О.¹, Шеин Д.В.¹

¹Волгоградский государственный технический университет

²Волгоградский государственный социально-педагогический университет

e-mail: kontchenkov@yandex.ru

Вертикальные гетероструктуры, формируемые из образцов двумерных материалов (графен, фосфорен, силицен и др.) представляют интерес как потенциальная основа для создания аккумуляторов [1], детекторов газов, нанопористых фильтров. Кроме того, свойства двумерного материала в плоскости образца меняются под действием соседних слоев, часто структура становится более стабильной, возрастают электро- и теплопроводность. Для теоретического исследования вертикальных ван-дер-ваальсовых структур широкое применение находят методы квантовой и классической молекулярной динамики (МД). Так, в работах [2, 3] с использованием классической молекулярной динамики исследована теплопроводность гетероструктур, состоящих из слоев графена и фосфорена. Для описания взаимодействия между атомами фосфора использовался параметризованный в работе [4] потенциал Стиллингера-Вебера, для описания взаимодействия между атомами в пределах листа графена используется потенциал AIREBO, для описания взаимодействия между слоями графена и фосфорена - потенциал Леннард-Джонса. В [2, 3] вычисляется теплопроводность фосфорена, исследуется влияние параметров используемых потенциалов на результаты расчета.

В последние годы набирает популярность подход, когда потенциал межатомного взаимодействия вычисляется нейронной сетью, обученной на данных квантовохимических расчетов некоторого фрагмента исследуемой структуры. Такой потенциал в принципе позволяет достичь точности, сравнимой с точностью методов теории функционала плотности, при рассмотрении структур, содержащих десятки и сотни тысяч атомов, на временах порядка наносекунд при использовании метода классической молекулярной динамики. В работе [5] с использованием полносвязной нейронной сети, входящей в пакет DeePMD, обученной на данных моделирования фрагмента кристалла фосфорена методом квантовой МД Кара-Парринелло (CPMD), получено силовое поле, которое использовалось в дальнейшем для моделирования теплопроводности черного фосфорена методом классической МД в пакете LAMMPS. Исследуется устойчивость полученной модели материала. Полученные в [5] значения теплопроводности коррелируют с известными результатами расчетов, полученными другими методами, и со значениями, полученными в эксперименте.

При использовании нейросетевого подхода не приходится вводить подгоночных параметров в выражения для потенциала межатомного взаимодействия, учет взаимного расположения атомов происходит при формировании дескриптора, поступающего на вход

нейронной сети, и заложен в структуре связей между искусственными нейронами в нейронной сети выбранной архитектуры.

В настоящей работе предпринята попытка исследовать тепловые свойства гетероструктуры, состоящих из двух листов графена, между которыми помещен лист черного фосфорена, подобную изученной в [2], методом классической молекулярной динамики с использованием потенциала межатомного взаимодействия, вычисляемого нейронной сетью. Обучающая выборка строится путем моделирования методом CPMD в пакете Quantum ESPRESSO фрагмента структуры графен - фосфорен - графен (С-Р-С), содержащего в слоях графена по 32 атома углерода и в слое фосфорена 24 атома фосфора. Стартовые параметры моделирования берутся в соответствии с данными [1], затем структура проходит этап минимизации энергии, релаксации электронной и ионной частей. Собственно молекулярная динамика длится 1 пс модельного времени (100000 шагов). В ходе выполнения молекулярной динамики выявлено сохранение кристаллической структуры образца. Моделирование методом CPMD рассматриваемой гетероструктуры проводилось при температуре 300 К. Полученные кадры, содержащие координаты атомов, силы, действующие на каждый из атомов, общую энергию системы, формируют обучающую выборку для нейронной сети. В настоящий момент выполняется этап обучения нейронной сети пакета DeePMD с использованием методики, применяемой в [5], после чего планируется исследовать теплопроводность и скорость звука в фосфорене, входящем в С-Р-С гетероструктуру, методом классической МД с использованием вычисляемого нейронной сетью потенциала межатомного взаимодействия, и сравнить в результатами работ [2, 3], полученными с использованием комбинации модельных потенциалов межатомного взаимодействия.

Список литературы

1. Ozdemir, B. Black Phosphorus and Phosphorene/Graphene Heterostructure as Alkali metal (Li, Na, and K) Ion Battery, arXiv:2007.10308, 2020
2. Pei Q.-X., Zhang X., Ding Zh., Zhang Y.-Y., Zhang Y.-W. Thermal stability and thermal conductivity of phosphorene in phosphorene/graphene van der Waals heterostructures, Phys. Chem. Chem. Phys., V.19, 17180-17186, 2017
3. Liang T., Zhang P., Yuan P., Zhai S. In-plane thermal transport in black phosphorene/graphene layered heterostructures: a molecular dynamic study, Phys. Chem. Chem. Phys., V. 20, 21151-21162, 2018
4. Jiang J.W. Parametrization of Stillinger-Weber potential based on valence force field model: application to single layer MoS2 and black phosphorous, Nanotechnology, V. 26, 315706, 2015
5. Shein D., Zav'yalov D.V. Calculating thermal properties of phosphorene using a deep learning force field, Eur. Phys. J. Plus, V. 139, 863, 2024

Магнеторезистивные характеристики гетероструктуры $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$

Константиян К. И.¹, Ульянов Г.Д.^{1,2}, Москаль И.Е.¹, Овсянников Г.А.¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

e-mail: karen@hitech.cplire.ru

При эпитаксиальном росте оксидных пленок появляется возможность создания границы раздела с функциональными характеристиками, кардинально отличающимися от свойств контактирующих материалов. Так, на гетероструктуре $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (SrIrO_3 - парамагнетик с сильным спин-орбитальным взаимодействием, $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ магнитный полуметалл) за счет обратного спинового эффекта Холла был зарегистрирован спиновый ток. Экспериментально полученный спиновый угол Холла θ_{SH} (коэффициент конверсии спинового тока в электрический сигнал) в данной системе существенно превосходит значения, характерные для традиционных гетероструктур с платиной [1, 2].

В данном сообщении будут приведены результаты измерений магнетосопротивления и холловского сопротивления пленок $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ и SrIrO_3 , а также гетероструктур $\text{SrIrO}_3/\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$, выращенных на подложке NdGaO_3 . Измерения проводились при охлаждении до температуры $T=2$ К и магнитных полях до $H=7$ Т в холловской конфигурации. В области высоких температур $T=50-200$ К, температурная зависимость сопротивления $R(T)$ $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ описывалась степенной зависимостью $R(T) \sim T^{5/2}$ [3], которая шунтирует сопротивление SrIrO_3 пленки в гетероструктуре. При более низких температурах на $R(T)$ $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ пленки и гетероструктуры наблюдался перегиб с минимумом при $T \sim 10$ К и рост, описываемый механизмом слабой локализацией [4]. Заметим, такой рост сопротивления затушевывается внешним магнитным полем и собственной намагниченностью слоя $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ [5].

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00010.

Список литературы

1. G.A. Ovsyannikov, K.Y. Constantinian, V.A. Shmakov, et al., Phys. Rev. **B 107**, 144419 (2023).
2. Г.А. Овсянников, К.И. Константиян, Г.Д. Ульянов, И.Е. Москаль. Письма в ЖЭТФ, **121**, 402 (2025).
3. Г.А. Овсянников, А.М. Петржик, И.В. Борисенко и др. ЖЭТФ, **135**, 56 (2009).
4. W. Niu, M. Gao, X. Wang, et al., Sci. Reports, **6**:26081 (2016).
5. L.E. Calvet, G. Agnus, P. Lecoeur. J. Vac. Sci. Technol., **A 37**, 031504 (2019).

Исследование влияния условий спекания на прочность прекурсоров, получаемых из реакторных порошков СВМПЭ, синтезированных на разных катализаторах

Шидловский Т. Д.¹, М.М. Цыганков¹, Л.П. Мясникова¹, Ю.М. Бойко¹, А.К.Борисов¹,
А.О. Поздняков¹, Е.М. Иванькова²

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

² Институт высокомолекулярных соединений

e-mail: timofeysh15@gmail.com

В последнее время активно ведутся работы по развитию твердофазного метода переработки продуктов синтеза сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), т.н. реакторных порошков (РП), в сверхпрочные высококомодульные пленочные нити.

Первым этапом твердофазной переработки является монолитизация РП СВМПЭ. Она осуществляется по принципу порошковой металлургии и состоит из двух стадий: компактирования (уплотнения) РП при комнатной температуре для обеспечения более плотного контакта между частицами и изгнания «пойманного воздуха» между ними, и спекания полученного компакта под давлением при температуре ниже температуры плавления с целью создания между частицами когезионных связей, обеспечивающих механическую прочность прекурсора - механически целостной пленки для последующего ориентационного упрочнения.

От деформационно-прочностных свойств прекурсора зависит возможность достижения предельных значений ориентационных удлинений, что обеспечивает высокие механические характеристики ориентированного полимера. Важную роль в этом процессе играет морфология РП, формирующаяся при синтезе полимера.

Целью данной работы было исследование влияния условий компактирования/спекания РП СВМПЭ, полученных в разном синтезе, на структуру и прочность получаемых из них прекурсоров, и выяснение их пригодности для последующего ориентационного упрочнения.

В качестве объектов исследования были выбраны РП СВМПЭ, синтезированные на принципиально различных каталитических системах: О4838, полученный в суспензионном синтезе в толуоле на одноцентровом металлоценовом катализаторе ($M\eta = 4,4$ млн, кдж/моль, насыпная плотность $\rho = 0,083$ г/см³) в ИСПМ РАН и М3659, синтезированный на нанесенном модифицированном титан-магниевом катализаторе циглеровского типа (ТМК) ($M\eta = 3,5$ млн кдж/моль, насыпная плотность $\rho = 0,158$ г/см³) в ИК СО РАН.

Структура и свойства РП и получаемых из них прекурсоров исследовалась при использовании методов дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и метода плазмохимической термолуминесценции (ПИТЛ), впервые использованного для оценки молекулярной подвижности в приповерхностных нанослоях полимера.

Найдено, что морфология исследуемых РП заметно различается: образцы О4838 имеют слоистую ламеллярную структуру, а М3659 глобулярную. При использовании ПИТЛ выявлена разница в молекулярной подвижности РП в области γ -релаксации, соответствующей размораживанию торсионных колебаний участков цепей в масштабе двух-трех мономерных единиц, локализованных вблизи дефектов в кристаллитах или в неупорядоченных областях РП СВМПЭ. Вклад γ -пика в общую светимость РП М3659 заметно больше, чем у РП О4838. Обсуждается вопрос о роли γ -релаксации в процессе компактирования РП.

Спекание РП СВМПЭ осуществлялось в закрытой прессформе при разных давлениях (50 и 100 МПа) и температурах (127, 130, 135 °С). Последние были выбраны на основе анализа термограмм, и соответствуют размораживанию подвижности в неупорядоченных областях, в мелких кристаллитах и в дефектных кристаллитах, соответственно.

Прочность прекурсоров измеряли на разрывной машине Shimadzu (Япония).

Прекурсоры, спеченные при 127 °С оказались хрупкими. Наилучшие прочностные свойства 34,5 МПа демонстрировали РП М3659, спеченные при 130 °С и $P = 100$ МПа, что на 35% выше, чем у О4838, изготовленных в тех же условиях. Обсуждаются механизмы спекания в зависимости от морфологии РП и температурно-силовых условий переработки.

Список литературы

1. Reactor Powder Morphology ed. by P. Lemstra and L. Myasnikova. Nova Sci. Publ (USA) 2011

Влияние механизмов неоднородной деформации кристаллической решетки на полярные свойства сферолитовых тонких пленок цирконата-титаната свинца

Валеева А. Р.¹, Старицын М.В.², Пронин В.П.³, Немов С.А.⁴, Каптелов Е.Ю.¹, Сенкевич С.В.^{1,3}, Пронин И.П.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург,

³РГПУ им. А.И. Герцена

⁴СПбПУ,

e-mail: ravilka834@gmail.com

Сферолитовые тонкие пленки, полученные кристаллизацией из аморфной фазы, относятся к типу ротационных (или трансротационных) кристаллов [1-2]. В нанослоях таких кристаллов как гематит (Fe_2O_3), оксид индия, легированный кремнием (InSiO), цирконат-титанат свинца, легированный лантаном (ЦТСЛ) (толщиной 10-30 нм) наблюдаются высокие скорости разворота кристаллической решетки, достигающие 100 град/мкм и более [1-3]. В более толстых пленках субмикронной или микронной толщины, представляющие собой островковую кварцевую структуру (SiO_2 , GeO_2) или перовскитовую структуру (ЦТС), скорость разворота решетки не превышала 1-1.5 град/мкм [4-6]. Согласно [1-6]

причиной разворота кристаллической решетки в тонких сферолитовых пленках является действие латеральных механических напряжений, вызванных изменением плотности материала при формировании кристаллической фазы из аморфной. Конкретным механизмом разворота считается последовательное образование краевых дислокаций [6-7]. Согласно [1] разворот решетки происходит по направлению к центру, в то время как авторы [3] наблюдали разворот решетки от центра сферолитового островка к периферии. Однако причины, по которым наблюдается тот или иной разворот, в работах до настоящего времени как не обсуждались, так и не исследовались. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование разворота решетки в сферолитовых тонких пленках ЦТС, сформированных при вариации технологических параметров их приготовления и выявление физических механизмов, отвечающих за эти развороты.

Плёнки ЦТС осаждались на платинированные подложки ситалла СТ-50 ($\text{Pt/TiO}_2/\text{ситалл}$) и кремния ($\text{Pt/TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$) двухстадийным методом высокочастотного магнетронного распыления. Состав распыляемой керамической мишени соответствовал области морфотропной фазовой границы и отвечал элементному соотношению атомов циркония и титана $\text{Zr/Ti} = 54/46$. Для получения двухфазной структуры в виде отдельных перовскитовых островков с диаметральными размерами в пределах 30–40 мкм, окруженных матрицей низкотемпературной фазы пироклора, осажденные аморфные пленки подвергались отжигу при температуре 530 °C на ситалловой подложке и при 550 °C на кремниевой подложке. Толщина пленок ЦТС составляла 900 и 500 нм, соответственно.

Кристаллическая структура и фазовое состояние пленок контролировались методом рентгеноструктурного анализа (Rigaku Ultima IV). Микроизображения сферолитовых островков получали с помощью растрового электронного микроскопа (Tescan Lyra 3), оснащенного детектором регистрации картин дифракции отраженных электронов. Обработка картин дифракции позволяет поточечно формировать ориентационные карты сферолитовых островков с данными о кристаллографических ориентациях (полюсные фигуры) и на их основе строить карты распределения углов разориентации в пределах каждого островка (GROD – grain reference orientation deviation).

Рост сферолитов в тонких пленках ЦТС сопровождался радиально-линейной зависимостью угла разворота решетки, при этом скорость разворота в пленках, осажденных на кремниевой подложке, составляла 0.4–0.8 град/мкм и 1.4–1.5 град/мкм - в пленках, осажденных на подложке ситалла, то есть, отличалась более чем в два раза. Микроструктура образцов существенно различалась: сферолитовые островки, сформированные на кремниевой подложке, характеризовались радиально-лучистой микроструктурой, в то время как, согласно GROD-картам, сферолиты на подложке ситалла отличались радиально однородным разворотом решетки без явно видимых радиальных границ. Сравнение полюсных фигур и GROD-карт образцов показало, что в первом случае разворот кристаллической решетки при радиальном разрастании происходил от периферии в сторону центра островков, а во втором случае – от центра островков в сторону периферии. На основании анализа полученных результатов и данных литературы в работе обсуждаются различные механизмы зарождения и роста сферолитовых островков, следствием которых является

различие в полярных свойствах, таких как величина и ориентация внутреннего поля и самопроизвольной поляризации [8].

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-22-00631

Список литературы

1. Kolosov V.Yu., Tholen A.R., Transmission electron microscopy studies of the specific structure of crystals formed by phase transition in iron oxide amorphous films, *Acta Materialia*, Vol. 48, 1829-1840, 2000.
2. Lutjes N.R., Zhou S., Antoja-Lleonart J., Noheda B., Ocelik V., Spherulitic and rotational crystal growth of Quartz thin films, *Scientific Reports*, Vol. 11, Art. № 14888, 2021.
3. Da B., Cheng L., Liu X., Shigeto K., Tsukagoshi K., Nabatame T., Ding Z., Sun Y., Hu J., Liu J., Tang D., Zhang H., Gao Z., Guo H., Yoshikawa H., Tanuma S., Cylindrically symmetric rotating crystals observed in crystallization process of InSiO film, *Science and Technology of Advanced Materials: Methods*, Vol. 3, Art. № 2230870, 2023.
4. Musterman E.J., Dierolf V., Jain H., Curved lattices of crystals formed in glass, *International Journal of Applied Glass Science*, Vol. 13, 402-419, 2022.
5. Жигалина О.М., Хмеленин Д.Н., Валиева Ю.А., Колосов В.Ю., Бокуняева А.О., Кузнецов Г.Б., Воротилов К.А., Сигов А.С., Структурные особенности пленок ЦТСЛ, *Кристаллография*, Том 63, № 4, 620-629, 2018.
6. Старицын М.В., Пронин В.П., Хинич И.И., Сенкевич С.В., Каптелов Е. Ю., Пронин И.П., Елшин А.С., Мишина Е.Д., Микроструктура сферолитовых тонких пленок цирконата-титаната свинца, *Физика твердого тела*, Том 65, № 8, С. 1368-1374, 2023.
7. Старицын М.В., Пронин В.П., Хинич И.И., Крушельницкий А.Н., Сенкевич С.В., Каптелов Е.Ю., Пронин И.П., Эффект каналирования электронов в кристаллической решетке лучистых сферолитов, *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*, Вып. 16, 289-300, 2024.
8. Осипов В.В., Киселев Д.А., Каптелов Е.Ю., Сенкевич С.В., Пронин И.П., Внутреннее поле и самополяризация в тонких пленках цирконата-титаната свинца, *Физика твердого тела*, Том. 57, № 9, 1748-1754, 2015.

Самокаталитический рост GaInP наноструктур на подложках кремния из паровой фазы: выбор состава источника и каталитических капель.

Карлина Л. Б.¹, А.С. Власов, Р.В.Левин, И.П. Сошников

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: karlin@mail.ioffe.ru

Представлены исследования самокаталитического роста наноструктур GaInP на подложках кремния ориентации (111) из насыщенных паров фосфора и индия в квазизамкнутом объеме, направленные на изучение способов управления составом получаемых структур. Исследование является продолжением серии наших работ по каталитическому росту соединений АЗВ5 на подложках арсенида галлия и кремния из паровой фазы [1,2].

Особенностью разработанного нами метода роста является простота оборудования и, соответственно, экономическая эффективность получения наноструктур.

В качестве источников паров фосфора и индия были использованы растворы-расплавы In-InP и Sn-InP, находящиеся непосредственно в ростовой камере. Изменение состава раствора-расплава позволяет изменять соотношение V/III в паровой фазе.

Предварительно подложки кремния ориентации (111) подвергались стандартной предростовой процедуре очистки и удаления дефектного слоя травлением в буферизованном растворе плавиковой кислоты с последующей промывкой и сушкой. Пленка галлия (Ga) наносилась методом резистивного испарения в вакууме. Для получения плёнки сложного состава “индий-галлий” осуществлялось их последовательное напыление. Каталитические капли формировались двумя способами: либо непосредственно в ростовой камере в процессе подъёма температуры, либо с предварительным отжигом в отдельной установке при температуре 400 °С. Рост наноструктур осуществлялся в атмосфере водорода при температуре 560 °С в течение 30 минут.

Методом растровой электронной микроскопии изучены морфология и состав полученных структур. Показано, что в зависимости от состава источника и материала каталитической капли, на поверхности подложек образуются нанокристаллиты и/или нитевидные нанокристаллы различного состава, имеющие форму вытянутых призм и/или конусов с шестигранным основанием с характерными размерами 50-100 нм в поперечном и 2000 нм и более в продольном направлениях. Характерная форма нанокристаллитов определяется их огранкой по плоскостям 110 при размерах 50-250 нм.

Исследования спектров микрофотолуминесценции проводились с пространственным разрешением не хуже 2 мкм. Измерения показали, что изменение условий роста позволяет получать наноструктуры, излучающие в диапазоне от 1,37 до 1,9 эВ. Обнаружено, что в спектрах излучения одиночных наноструктур наблюдаются резонансные модуляции интенсивности [3]. Исследование спектров рамановского рассеяния позволило оценить состав наноструктур. Было обнаружено наличие фазового расслоения и одновременное присутствие фаз разного состава в спектрах рассеяния. Такое поведение вызвано наличием зоны несмешиваемости твердого раствора и приводит к одновременному росту структур прямозонного и непрямозонного составов.

Таким образом, было установлено, что выбором оптимальной комбинации источников, капель и условием их формирования, можно успешно управлять составом нитевидных наноструктур при росте из насыщенных паров фосфора и индия на подложках кремния.

Список литературы

1. A.S. Vlasov, L.B. Karlina, B.Ya. Ber, N.A. Bert, M.E. Boiko, D.Y. Kazantsev, A.A. Levin, A.B. Smirnov, I.P. Smirnova, I.P. Soshnikov, *Mat. Today Comm.*, **31**, 103232 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103232>.
2. Л.Б. Карлина, А.С. Власов, И.В. Илькив, А.В. Вершинин, И.П. Сошников *Физика и техника полупроводников*, 2023, том 57, вып. 7

3. B.I. Soshnikov, V.V. Lysak, K.P. Kotlyar and I.P. Soshnikov, J. Phys. Conf. Ser. 2016. **741** 012154

Пленки на основе наноструктур полтораокси ванадия для лент высокотемпературных сверхпроводников

Березина О. Я.¹, Игнахин В.С., Секирин И.В., Козорез Д.Р., Яковлев Д.А.

¹ПетрГУ

e-mail: berezina@petsu.ru

Ленты на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) используются для создания сверхпроводящих магнитных систем токамаков, магниторезонансных томографов, установок ЯМР-спектроскопических исследований.

Однако при работе сверхпроводящей магнитной системы возможен непредсказуемый переход участка сверхпроводника из сверхпроводящего в нормальное состояние, объясняемый случайными тепловыми возмущениями, которые принято считать неустраняемыми [1]. Переход в нормальное состояние может приводить к локальному разогреву сверхпроводника и выходу из строя магнитной системы. Для работы на переменном токе важна межвитковая изоляция, но для устранения случайного локального разогрева полезным было бы отсутствие изоляции, ведущее к автоматическому обходу током горячих пятен [2]. Таким образом имеет смысл размещать между витками лент ВТСП слой, ведущий себя как изолятор при рабочей низкой температуре, но становящийся проводящим при локальном разогреве.

Для эффективного шунтирования тока в случае появления нормальной зоны предлагается между слоями ВТСП-ленты разместить медную фольгу, покрытую пленкой из материала, испытывающего фазовый переход металл/диэлектрик (ФПМД): при температурах $T < 10\text{K}$ пленка обладает свойствами диэлектрика и играет роль изолятора между витками ленты ВТСП, что позволяет использовать обмотку на переменном токе; при температурах $T > 160\text{K}$ пленка проявляет металлические свойства и шунтирует ток при терромагнитных возмущениях. Таким образом тепло не будет выделяться на участке ВТСП, и он останется невредимым.

Подходящая температура фазового перехода (140 K) наблюдается у полтораокси ванадия V_2O_3 [3]. Причем у пленок V_2O_3 , нанесенных на сапфир методом импульсного лазерного осаждения, наблюдается большой скачок сопротивления при переходе: 4 – 7 порядков [4].

Целью нашей работы является получение тонких пленок на основе микро-наночастиц V_2O_3 на медной ленте с хорошей адгезией и скачком сопротивления при ФПМД 2 -3 порядка.

Процесс изготовления пленок состоял из нескольких этапов: синтез нанонитей пентаоксида ванадия методом электроспиннинга; двухэтапный отжиг нитей V_2O_5 для получения

нитей V_2O_3 ; изготовление дисперсионного раствора нанонитей V_2O_3 в этиловом спирте с добавкой полимерного связующего; нанесение раствора на медную подложку; сушка.

Контроль механических свойств осуществлялся проверкой устойчивости пленки V_2O_3 на медной ленте при изгибе до и после десятиминутной выдержки в парах азота ($\sim 170K$). Радиус изгиба 5,5 см. Пленка не осыпается и не отслаивается.

Рентгенофазовый анализ нанонитей показал наличие одной фазы - V_2O_3 . Анализ морфологии поверхности и толщины пленки проводился с помощью СЭМ Hitachi SU1510. Средняя толщина пленки 10 – 12 мкм, её можно менять при необходимости.

Изменение сопротивления пленок при охлаждении от 293K до 120 K составляет 2 – 3 порядка.

Для увеличения величины изменения сопротивления планируется проведение исследований с применением других полимерных связующих.

Список литературы

1. Уилсон М., Сверхпроводящие магниты. М.: Мир, 1985. — 405 с.
2. <https://eng.snu.ac.kr/snu-Eng/bbs/BMSR00005/view.do?boardId=2597&menuNo=200152>. Дата обращения 28.02.2025.
3. А.В. Ильинский, Е.Б. Шадрин. Закономерности формирования электропроводящих свойств окислов ряда Магнели. Физика твердого тела. 2023, том 65, вып. 3. DOI: 10.21883/FTT.2023.03.54746.536
4. B. S. Allimi, S. P. Alpay, C. K. Xie, B. O. Wells, J. I. Budnick, D. M. Pease; Resistivity of thin films deposited on -plane (110) and -plane (001) sapphire by pulsed laser deposition. Appl. Phys. Lett. 19 May 2008; 92 (20): 202105. <https://doi.org/10.1063/1.2921787>

Оценка ориентировки структуры разупорядоченного sp^2 углерода с помощью просвечивающей микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света

Голубев Е. А.¹, Антонец И.В.², Устюгов В.А.²

¹Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ²СГУ им. Питирима Сорокина

e-mail: yevgenyGolubev74@mail.ru

Ориентировка атомарной структуры вещества определяет пространственное распределение физических и химических свойств и несет информацию об условиях формирования. Если для кристаллов определение кристаллографической ориентировки является рутинной задачей, то в слабоупорядоченных веществах ориентировка проявляется не так явно, а её оценка затруднена отсутствием дальнего порядка. Тем не менее, элементы ориентировки (анизотропности) также влияют на свойства таких веществ и определяются условиями их образования. Особенно важно иметь представление об ориентировке структуры у

слабоупорядоченных углеродных веществ, таких, как сажа, пироуглерод, углеситалл, активированный уголь, синтетический и природный стеклоуглерод, так как механические, электрические, химические свойства sp^2 углерода критично зависят от ориентации графеновых плоскостей, например, проводимости вдоль и поперек этих плоскостей различаются на несколько порядков.

Среди методов определения ориентировки структуры выделяются высокоразрешающая электронная микроскопия (ВРЭМ) [1,2] и поляризованная спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света [3,4]. ВРЭМ показывает структуру атомарных рядов напрямую, что делает ее эффективнейшим методом высокоразрешающих исследований, однако достигается это за счет высокой локальности, т.е. малого исследуемого объема. КР спектроскопия помимо определения ориентировки позволяет косвенно оценивать структурные особенности в гораздо большем объеме. Сочетание этих методов способствует детальному установлению структуры и оценке её ориентировки. Цель работы – отработка алгоритмов, создание программного обеспечения и определение структурных критериев для оценки ориентировки структуры разупорядоченных материалов методами ВРЭМ и КР спектроскопии на примере природных углеродных веществ.

Для анализа ВРЭМ изображений был разработан алгоритм, позволяющий получить угловую зависимость концентрации заполненных непрерывно расположенными пикселями горизонтальных строк оцифрованного снимка. Процедура анализа ВРЭМ изображений основана на четырех основных алгоритмических шагах: (i) фильтрация оцифрованного изображения; (ii) пикселизация полос, отвечающих атомарной решетке углерода; (III) последовательный поворот изображения на углы до 180° ; (IV) оценка количества горизонтальных полос для каждого угла и составление концентрационной угловой зависимости. Локальные максимумы данной зависимости соответствуют преимущественным направлениям структурных элементов на изображении, а их угловая ширина и величина превышения над фоном служат оценочными критериями уровня ориентировки.

Алгоритм был апробирован на четырех образцах природного разупорядоченного углерода (шунгита), структурно подобного синтетическому низкотемпературному стеклоуглероду [5], отобранного из протяженных трещин (ShSh1, ShM1) и изотропных полостей (пор) (ShN1, Columb) в горных породах. Заполнение трещин углеродом происходит при направленном течении исходного жидкого углеводородного вещества, а формирование в порах – при пространственно равномерной его конденсации. Такие различия условий должны сказаться на наличии и степени ориентировки структуры углерода даже при слабой упорядоченности.

Поляризованные спектры КР были измерены при пошаговом вращении (с шагом 15°) направления поляризации рассеянного излучения на 180° . Получены круговые зависимости КР интенсивности, вид которых определяется ориентировкой структуры образца. КР спектроскопия позволяет не только определить наличие ориентировки, но и качественно оценить ее уровень (низкий, средний, высокий).

Сравнительные результаты оценки уровня ориентировки структуры по данным ВРЭМ и поляризованной КР совпали для трех образцов – двух образцов с выявленным обоими методами высоким уровнем ориентировки (ShSh1 и ShM1), проявляющегося в малоугловом распределении выделенного направления и его значительным превышением фона, и одного образца с низким уровнем ориентировки (Columb). Образец ShN1 показывает низкий уровень ориентировки по данным КР спектроскопии и средний уровень ориентировки по данным ВРЭМ, проявляющийся в очень широком угловом распределении слабо выделенного направления структуры. Такое различие в результатах двух методов для ShN1 наиболее вероятно связано с локальностью ВРЭМ исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина» от 17.01.2024 № 075-03-2024-162.

Список литературы

1. Farbos, B., Weisbecker, P., Fischer, H. E., Da Costa, J.-P., Lalanne, M., Chollon, G., Germain, C., Vignoles, G. L., Leyssale, J.-M. Nanoscale structure and texture of highly anisotropic pyrocarbons revisited with transmission electron microscopy, image processing, neutron diffraction and atomistic modeling. *Carbon*. 2014. V. 80. P. 472–489.
2. J.P. Da Costa, P. Weisbecker, B. Farbos, J.-M. Leyssale, G.L. Vignoles, C. Germain, Investigating carbon materials nanostructure using image orientation statistics. *Carbon*. 2015. V. 84. P. 160–173.
3. Bo Xu, Nannan Mao, Yan Zhao, Lianming Tong, Jin Zhang Polarized Raman Spectroscopy for Determining Crystallographic Orientation of Low-Dimensional Materials. *J Phys Chem Lett*. 2021. V. 12. P. 7442–7452.
4. Le KC, Henriksson J, Bengtsson P-E. Polarization effects in Raman spectroscopy of light-absorbing carbon. *J Raman Spectrosc*. 2021. V. 52. P. 1115–1122.
5. Golubev Ye. A., Antonets I. V., Electrophysical Properties and Structure of Natural Disordered sp^2 Carbon. *Nanomaterials*. 2022. V. 12. P. 3797.

Экспериментальное исследование самоорганизации коллоидных наночастиц в электрическом поле

Гордеева А. Б.¹, Анкудинов А. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: anastasiya.gordeeva@mail.ioffe.ru

Искусственно созданные материалы на основе органических наночастиц привлекают особое внимание в последние годы благодаря широкому спектру применений в промышленности и в медицине. Свойства таких материалов кардинальным образом зависят от их структуры. Поэтому важно разработать методы воздействия на наночастицы в процессе роста материалов на их основе. С этой целью широко применяются магнитные и электрические поля, создаваемые в области формирования наноструктуры.

В настоящей работе в качестве модельных наночастиц мы использовали частицы углерода (сажи), размеры которых составляли порядка 100 нм. Частицы были растворены в воде. В

присутствии электрического поля они осаждались на поверхность термически приготовленного оксида кремния толщиной 0.5 мкм. Для создания электрического поля на поверхность были нанесены золотые контакты в виде встречно-штырьевой структуры. Расстояние между контактами составляло 5 мкм. К контактам прикладывалось переменное напряжение 15 В с частотой 1 МГц. Таким образом, создавалось однонаправленное электрическое поле максимальной напряженности которого составляла 30 кВ/см.

Контролирование процесса роста материала из наночастиц в растворе *in situ* является сложной задачей. С этой целью в работе мы использовали поверхностно-чувствительную оптическую методику анизотропного отражения света [1]. Эта методика позволяет выделять слабые сигналы от объектов, обладающих анизотропией из общего изотропного оптического отклика. Она измеряет при нормальном падении нормированную разность коэффициентов отражения света, линейно поляризованного в двух взаимно перпендикулярных направлениях

Направление оптической анизотропии исходной поверхности задается направлением золотых контактов. В спектрах анизотропного отражения доминировала интерференция в слое окисла. Записываемые в процессе роста спектры анизотропного отражения показывали постепенное изменение фазы сигнала анизотропии на 180 градусов. Это соответствует изменению исходного направления анизотропии поверхности на перпендикулярное. Спустя 3 часа, когда изменение спектров остановилось, электрическое поле было выключено.

Записанная по окончании эксперимента с помощью атомно-силового микроскопа топография поверхности показала, что в области между контактами сформировались вытянутые кристаллиты, состоящие из отдельных частиц сажи. Направление их перпендикулярно направлению золотых контактов.

Таким образом, нами была доказана эффективность использования однородного электрического поля для управления структурой материалов из наночастиц в процессе роста. При этом важно, чтобы частицы были из проводящего материала. Ранее, аналогичный эксперимент, проведенный с использованием биомолекул, показал отсутствие влияния электрического поля на процесс роста. В работе показано, что для контроля процесса формирования наноструктуры в водном растворе *in situ* эффективно использование оптической методики – спектроскопии анизотропного отражения.

Список литературы

1. P Weightman, DS Martin, RJ Cole, T Farrell Reflection anisotropy spectroscopy// Reports on Progress in Physics 68 (2005) 1251

Функционализация углеродных нанотрубок в азотной плазме для электрохимических применений

Князев Е. В.^{1,2}, Несов С.Н.^{1,2}, Болотов В.В.¹, Поворожнюк С.Н.^{1,2}, Ивлев К.Е.¹,
Матюшенко С.А.¹, Закранцов А.Р.¹

¹Омский научный центр СО РАН

²Омский государственный технический университет

e-mail: knyazevyegor@mail.ru

Развитие микроэлектроники, электрического транспорта и портативной электроники вызывает необходимость разработки устройств хранения и преобразования энергии, таких как суперконденсаторы и топливные элементы [1]. Электродные материалы для этих устройств должны обладать высокими электропроводностью, удельной площадью поверхности и электрохимической активностью. Углеродные нанотрубки (УНТ) в качестве носителей частиц электрокатализатора, являются весьма перспективным материалом для электродов электрохимических устройств. Известно, что азот в составе углеродных нанотрубок в электроактивном состоянии в виде дефектов в пиридиновой и пиррольной конфигурациях способствует повышению каталитической активности металлов платиновой группы и вносит вклад в электрическую проводимость слоев УНТ [2]. Наиболее распространенным методом постсинтезного легирования углеродных нанотрубок азотом является химическая обработка, однако он может сопровождаться формированием нежелательных нитридных соединений на поверхности нанотрубок. К перспективным способам легирования УНТ относятся ионно-плазменные обработки, поскольку позволяют контролировать степень легирования и состав функциональных групп на поверхности углеродных материалов [3]. В работе исследуются морфология, элементный и химический состав слоев углеродных нанотрубок, прошедших обработку в азотной плазме.

Коммерческие УНТ марки МУНТ-2 производства ИК СО РАН. УНТ диспергировались в изопропиловом спирте ультразвуком и аэрозольным методом наносились на подложку из монокристаллического кремния. Легирование углеродных нанотрубок азотом осуществлялось в азотной плазме с применением ускорителя газо-металлических ионных пучков (ОНЦ СО РАН). Мощность плазмы составляла 50 Вт, длительность обработки 10 и 20 мин. Исследование морфологии слоёв УНТ проводилось на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Jeol JSM 6610-LV с энергодисперсионным анализатором Inca X-Act. Исследование химического состояния углеродных нанотрубок до и после плазменных обработок осуществлялось с применением рентгеновского фотоэлектронного спектрометра LAS-3000 и Фурье ИК-спектрометре BRUKER Vertex 70.

Анализ РЭМ изображений свидетельствует об изменении морфологии нанотрубок после плазменных обработок. На поверхности нанотрубок видны частицы, предположительно углерода, образовавшиеся в результате разрушения УНТ. По данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) после обработок в азотной плазме в составе исследуемых образцов фиксируется азот в количестве 7,6 ат.%, а также наблюдается рост концентрации кислорода с 3,4 ат.% до 17,6 ат.%. В ИК-спектрах образцов после плазменных

обработок присутствуют полосы поглощения, соответствующие колебаниям C=N, C-N и N-O связей, что в совокупности с данными C1S и N1S РФЭС спектров свидетельствует о встраивании азота в структуру графеновых слоев с образованием преимущественно пиридиновых и пиррольных связей. Измерения удельной проводимости слоев функционализированных УНТ показали, что введение азотных дефектов не приводит к деградации электропроводности.

Работа выполнена в рамках регионального гранта Российского научного фонда №24-29-20110. В работе было использовано оборудование Омского регионального центра коллективного пользования СО РАН.

Список литературы

1. Н.В. Глебова, А.А. Нечитайлов, А.О. Краснова, А.А. Томасов, Н.К. Зеленина, Журнал технической физики, 89, 1978 (2019). DOI:10.21883/JTF.2019.12.48499.451-18
2. А. С. Пушкарев, И. В. Пушкарева, М. В. Козлова, М. А. Соловьев, С. И. Бутрим, Цз. Гэ, В. Син, В. Н. Фатеев, Электрохимия 58, 325 (2022). DOI: 10.31857/S0424857022070118
3. S.N. Nesov, V.V. Bolotov, E.V. Knyazev, S.N. Povoroznyk, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 525, 20 (2022). DOI:10.1016/j.nimb.2022.06.006

Исследование тонких перовскитных слоёв FAPbI_3 методами сканирующей зондовой микроскопии.

Дунаевский М. С.^{1,2}, Алексеев П.А.^{1,2}, Фурасова А.Д.², Саранин Д.С.^{2,3}, Теруков Е.И.^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН

²Университет ИТМО

³Университет МИСИС, Москв

e-mail: Mike.Dunaeffsky@mail.ioffe.ru

Тонкие перовскитные слои нанесённые на ИТО применяются в перспективных устройствах солнечной фотовольтаики с КПД около 25%. Актуальной проблемой является существенное снижение коэффициента фотовольтаического преобразования перовскитных солнечных элементов со временем под действием различных факторов. В связи с этим, важной задачей является стабилизация структурных и фотовольтаических свойств данных материалов.

В данной работе методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) применялись для исследования структурных и фотовольтаических свойств перовскитных слоёв $\text{Cs}(\text{FA})\text{PbI}_3\text{Cl}$. Методом Кельвин-зонд микроскопии (КЗМ) был исследован потенциал поверхности перовскитных плёнок “в темноте” и “при освещении” для определения пространственной неоднородности фото-ЭДС. Кроме того, с помощью метода КЗМ были исследованы процессы перераспределения зарядов между структурными неоднородностями в образцах. Установлено, что перовскитные образцы представляют собой зернистые

плёнки. Характерный латеральный размер зёрен в плёнках CsFAPbI₃ составляет 200 нм, а в пленках CsFAPbI₃+AVA₂FAPb₂I₇ размер зёрен составляет 190 нм. Показано, что в плёнках CsFAPbI₃ возникают дендритные структурные неоднородности (свидетельствующие о распаде исходной плёнки на фазы), в то время как в плёнках CsFAPbI₃+AVA₂FAPb₂I₇ эти неоднородности отсутствуют. То есть, добавление AVA₂FAPb₂I₇ позволяет стабилизировать перовскитные плёнки.

Исследование механических свойств интерфейса нитевидный нанокристалл InAs - ростовая подложка методом атомно-силовой микроскопии

Шаров В.А.^{1,2}, Малыш М.А.^{1,2}, Федоров В.В.², Мухин И.С.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбАУ им. Ж.И. Алферова

e-mail: vl_sharov@mail.ru

Нитевидные нанокристаллы (ННК) АЗВ5 считаются перспективным классом наноструктур для реализации ряда полупроводниковых приборов нового поколения. Одним из ключевых преимуществ геометрии ННК по сравнению с планарной является возможность синтеза бездефектных прямозонных АЗВ5, таких как GaAs, InAs и GaN, непосредственно на кремниевых подложках за счет релаксации индуцированных решеточным рассогласованием деформаций на боковых стенках [1]. Однако, несмотря на многолетнее совершенствование роста ННК по всему миру, солнечные элементы [2], фотодетекторы и светодиоды [3] на их основе все еще уступают планарным аналогам. Одной из причин может являться недостаточное внимание, уделяемое структурным свойствам ростового интерфейса ННК-подложка. Несмотря на хорошее кристаллическое качество самих ННК, ростовой интерфейс может характеризоваться высоким уровнем упругих напряжений и высокой плотностью дефектов, которые ухудшают электрические свойства устройств за счет снижения подвижности носителей, пьезо- и тензоэлектрического эффекта, эффекта кулоновской блокады [4, 5micromachines, 10.1021/nl904053j].

В данной работе экспериментально исследуются свойства ростового контакта вертикальных ННК InAs, выращенных на подложках (111) Si методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Эксперимент опирается на атомно-силовую микроскопию (АСМ). Сначала регистрируется топография некоторой области, из которой определяются координаты ННК. Затем путем латерального смещения зонда АСМ на половине высоты ННК происходит их деформация с последующим изломом. Во время деформации с помощью оптической системы регистрации положения зонда АСМ происходит регистрация сигнала латерального изгиба кантилевера, из которого может быть оценена действующая на него сила упругости. Таким образом возможно исследовать механическую прочность контакта ННК-подложка.

Было исследовано 3 образца: ННК InAs, выращенные непосредственно на Si; ННК InAs, выращенные путем ван дер Ваальсовой эпитаксии на буфере из графена и ННК GaP, выращенные на Si. Было показано, что ННК InAs, выращенные на графеновом буфере, обладают меньшей силой связи с подложкой по сравнению с ННК InAs на Si, что может являться свидетельством успешной ван дер Ваальсовой эпитаксии. При этом оба образца ННК InAs отделялись от подложек, не оставляя следов, что свидетельствует о высоком уровне дефектности интерфейса ННК/подложка ввиду сильного решеточного рассогласования. В то же время, ННК GaP напротив при отделении от подложки оставляли «пеньки», что говорит о высокой прочности эпитаксиального интерфейса ввиду низкого решеточного рассогласования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке министерства образования и науки в рамках гранта FSRM-2023-0007.

Список литературы

1. Mårtensson T. et al. Epitaxial III– V nanowires on silicon //Nano letters. – 2004. – Т. 4. – №. 10. – С. 1987-1990.
2. Åberg I. et al. A GaAs nanowire array solar cell with 15.3% efficiency at 1 sun //IEEE Journal of photovoltaics. – 2015. – Т. 6. – №. 1. – С. 185-190.
3. Pan X. et al. Red InGaN nanowire LED with bulk active region directly grown on p-Si (111) //Optics Express. – 2023. – Т. 31. – №. 10. – С. 15772-15778.
4. Alekseev P. A. et al. Effect of the uniaxial compression on the GaAs nanowire solar cell //Micromachines. – 2020. – Т. 11. – №. 6. – С. 581.
5. Schroer M. D., Petta J. R. Correlating the nanostructure and electronic properties of InAs nanowires //Nano letters. – 2010. – Т. 10. – №. 5. – С. 1618-1622.

Исследование чувствительности сенсоров на основе пленок La-SnO₂ к парам этанола

Петров В. В.¹, Толстяк Г.В.¹, Баян Е.М.¹, Давиденко В.А.¹

¹ЮФУ

e-mail: vvpetrov@sfedu.ru

Пленки композитных материалов на основе оксидов лантана и олова (La-SnO₂) обладают уникальными свойствами, что делает их перспективными материалами для применения в функциональных элементах «прозрачной» сенсорики. В работе [1] синтезированы прекурсоры и на их основе получены пленки La-SnO₂ с содержанием 1, 3 и 5 % La³⁺. Кроме этого, пленка SnO₂ с 3% La³⁺ обладает наибольшими значениями энергии активации, шероховатости и поверхностного потенциала. Целью данной работы было исследование газочувствительных свойств сенсоров на основе La-SnO₂ пленок к парам этанола с концентрацией 100 ppm при рабочих температурах 300 и 400 °С.

В качестве исходных веществ для синтеза пленки La-SnO₂ с содержанием 1, 3 и 5 мол.% La³⁺ были выбраны необходимые количества солей SnCl₄·5H₂O, La₂(CO₃)₃ и C₂₀H₃₀O₂ (все

х.ч.). Вначале проводили синтез продуктов методом окислительного пиролиза по методике, описанной в [1]. Полученные органические соли олова(IV) и лантана(III) растворяли в диоксане. Далее прекурсор наносили на встречно-штыревые платиновые электроды с расстоянием между ними 100 мкм, сформированные на сенсорной платформе на основе оксида алюминия, разваренной в стандартный корпус ТО-5. После нанесения прекурсора он был отожжен при 600 °С в течение 2 ч с помощью нагревателя также находящегося на сенсорной платформе. Таким образом были получены пленки оксида олова(IV), содержащего 1, 3 или 5 мол.% La^{3+} . Толщина пленок La-SnO_2 после отжига составляла 100+20 нм.

Исследование чувствительности сенсоров к парам этанола проводилось с помощью стенда для измерения параметров сенсоров газов [2]. Сенсоры на основе пленок La-SnO_2 помещались в измерительную камеру и нагревались до рабочей температуры 300 °С или 400 °С. Затем осуществлялась последовательная продувка камеры потоком синтетического воздуха или смесью воздуха с парами этанола концентрацией 100 ppm с расходом 200-400 мл/мин. Воздействие паров этанола на сенсор на основе пленок La-SnO_2 , с содержанием 1, 3 и 5 мол.% La^{3+} при температуре 400°С приводило к снижению его сопротивления. Время отклика сенсоров на уровне 0,9 ($t_{\text{откл}0,9}$) составляло 110+10 с, что указывает на хорошее быстродействие сенсора. Время восстановления сенсора на уровне 0,1 ($t_{\text{вост}0,1}$) было 600+20 с.

Отклик сенсора (S) рассчитывался как отношение сопротивления сенсора при подаче воздуха (R_0) к сопротивлению сенсора при подаче смеси воздуха и газа при достижении выхлопывания (R_g). Отклик при рабочей температуре 400 °С для сенсора на основе La-SnO_2 пленки с содержанием 1, 3 и 5 мол. % La равен 10.9, 13.9 и 6.6, соответственно. При рабочей температуре 300 °С чувствительность сенсоров резко снижается, соответственно, до 3.3, 3.7 и 2.9. Сенсоры на основе пленок La-SnO_2 с концентрацией лантана 3 мол. % также имеют максимальную чувствительность. Минимальная чувствительность наблюдается для сенсоров на основе пленок La-SnO_2 с содержанием лантана 5 мол. %.

Сравнение результатов, полученных в данном исследовании с результатами работы [1] показывают, что пленка La-SnO_2 с концентрацией лантана 3 мол. %, имеющая наибольшие значения энергии активации проводимости, величины шероховатости и поверхностного потенциала, обладает также и высокими значениями отклика к парам этанола. Последнее свидетельствует о значительном влиянии электрофизических и поверхностных свойств композитных пленок оксидов металлов на их газочувствительные характеристики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 24-29-00203 (<https://rscf.ru/project/24-29-00203/>) в Южном федеральном университете.

Список литературы

1. Старникова А.П., Петров В.В., Толстяк Г.В., Гуляева И.А., Баян Е.М. Оптические и электрофизические свойства пленок La-SnO_2 // ФТТ. – 2024. – Т. 66. №12. – С. 2105-2107.

2. Kolomytsev K.V., Petrov V.V. Multifunctional stand for measuring the parameters of sensors based on nanocomposite films // 2024 International Conference on «Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications» (PHENMA 2024, Indore, India, November 6-11, 2024): Abstracts and Schedule; Southern Federal University – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2024. – P. 176.

Влияние морфологии на фотокаталитические свойства оксида цинка

Гриценко Л. В.^{1,2}, Калкозова Ж.К.², Абдуллин Х.А.^{2,3}

¹Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

²ТОО Институт прикладных наук и информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

³Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа при КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

e-mail: l.gritsenko@satbayev.university

Отходы предприятий пищевой, полиграфической и текстильной промышленности являются источниками активного загрязнения водоёмов. Очистка сточных вод осуществляется такими методами, как ультрафильтрация, адсорбция, озонирование, коагуляция и др. Большинство этих методов обладают существенными недостатками, такими как высокая стоимость, образование токсичных побочных продуктов, ограниченная рекуперация и высокое потребление энергии. Фотокатализ привлекает значительное внимание исследователей как альтернативный способ разложения органических загрязнений [1, 2]. К преимуществам этого метода можно отнести отсутствие необходимости создания специальных условий, низкую стоимость и полную минерализацию. Разложение органических красителей с использованием полупроводникового фотокатализатора является эффективным и экологичным методом очистки сточных вод, так как он позволяет получать безвредные конечные продукты, такие как H_2O , CO_2 и неорганические соли, в результате разложения загрязняющих веществ [3, 4].

В последние десятилетия оксидные полупроводники привлекают большое внимание в качестве фотокатализаторов для фотодегradации органических загрязняющих веществ ввиду их высокой доступности, хорошей термической и химической стабильности, низкой токсичности [2-4]. Оксид цинка (ZnO) широко используется в качестве эффективного и недорогого полупроводникового фотокатализатора для разложения большинства органических химикатов [5-7]. Высокая эффективность обусловлена тем, что ZnO обладает высокой энергией связи экситона при комнатной температуре и высокой электропроводностью. Размер кристаллитов за счёт изменения удельной площади поверхности оказывает большое влияние на фотокаталитическую активность ZnO. Наноструктурированные материалы, обладающие высокой удельной поверхностью, имеют большое количество активных центров, что способствует активной деградации органических молекул.

В данной работе порошки ZnO в виде пластин и стержней были синтезированы такими экологичными методами, как химическое осаждение из раствора и прямое термическое

разложение соответственно. Химическое осаждение осуществлялось при капальном добавлении водного раствора гидроксида натрия NaOH в водный раствор дигидрата ацетата цинка $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}$ при комнатной температуре. Затем полученные образцы ZnO были тщательно промыты дистиллированной водой центрифугированием и высушены при 100°C. Синтезированные порошки были подвергнуты термической обработке на воздухе при 450°C в течение одного часа. При термическом разложении дешёвый дигидрат ацетата цинка был прокален в муфельной печи на воздухе при 400°C и 700°C.

Исследование методом электронной микроскопии показало, что низкотемпературным методом химического осаждения можно получить ZnO в форме пластин. Показано, что увеличение концентрации NaOH приводит к увеличению толщины пластин. Было отмечено, что уменьшение температуры прокаливания ацетата цинка позволяет получать стержни меньшего поперечного сечения. Следовательно, параметры синтеза оказывают основное влияние на морфологию наностержней ZnO.

Измерения XRD были выполнены для лучшего понимания кристаллической структуры всех образцов ZnO. Как показали результаты исследования, все пики дифракционных спектров соответствуют ZnO (JCPDS 01-075-0576) и не содержат пиков, связанных с примесями.

Спектры оптической плотности при разложении RhB в растворах с различными образцами ZnO показали, что с увеличением продолжительности освещения УФ-видимым светом интенсивность поглощения раствора RhB уменьшается, что указывает на соответствующее уменьшение концентрации RhB в растворе. Также было отмечено, что интенсивность поглощения раствора RhB заметно уменьшается в течение первых 30 минут воздействия. Затем скорость уменьшения значительно падает и достигает почти нуля после 150 минут освещения. Было показано, что изменение морфологии, позволяющее увеличивать удельную поверхность синтезированных образцов за счёт управления параметрами используемых методов синтеза, влечёт увеличение их фотокаталитической активности. Полученные фотокаталитически активные образцы перспективны для разложения органических красителей, а также в качестве основы электрохимических биосенсоров.

Благодарность. Данное исследование было профинансировано Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан, грант №AP26103537.

Список литературы

1. Vinay Kumar, E.; Harini, R.; Anitha; Kumara Swamy, B.E.; Nagaraju, G. One step facile green synthesis of ZnFe2O4-ZnO Nanocomposite: Efficient photocatalytic activity towards organic dyes under visible light and photoluminescence applications. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* **2025**, 23, 101036.
2. Amrollahi, Rezvaneh. Comparison of photocatalytic activity of Cu/TiO2, Cu/NiO and Cu/ZnO nanocomposites for the degradation of organic dyes. *Applied Catalysis O: Open* **2024**, 195, 207010.
3. Mohan, N.S.; Arulraj, A.; Mangalaraja, R.V.; Anitha, R.; Vijayalakshmi, V. Investigating the effect of nickel concentration on the photocatalytic activity of ZnO photocatalysts for methylene blue dye degradation prepared via facile green synthesis method. *Desalination and Water Treatment* **2024**, 320, 100802.

4. Tran, Thi Ly; Na Vo, Thi Le; Vu, Hung-Anh Tran; Ho, Quoc Viet; Duong, Anh Tuan; V Nguyen, iet Huong; Nguyen, Huu Tuan. Enhanced photocatalytic activity of ZnO nanorods grown from atmospheric pressure spatial atomic layer deposition-derived seeds via chemical bath deposition synthesis. *Optical Materials* **2025**, 161, 116808.
5. AlMohamadi, H.; Awad, S.A.; Sharma, A.K.; Fayzullaev, N.; Távara-Aponte, A.; Chiguala-Contreras, L.; Amari, A.; Rodriguez-Benites, C.; Tahoona, M.A.; Esmaeili, H. Photocatalytic Activity of Metal- and Non-Metal-Anchored ZnO and TiO₂ Nanocatalysts for Advanced Photocatalysis: Comparative Study. *Catalysts* **2024**, 14, 420.
6. Na, Gyumi; Kang, Jun-Won. Green synthesis of ZnO/CQD nanocomposite using chestnut shell and evaluating its photocatalytic antimicrobial activity under visible light. *Food Research International* **2025**, 205, 115948.
7. Mahrsi, Mouna; Chouchene, Bilel; Gries, Thomas; Carré, Vincent; Medjahdi, Ghouti; Ayari, Fadila; Balan, Lavinia; Schneider, Raphaël. 0D/1D CuO-Cu₂O/ZnO p-n heterojunction with high photocatalytic activity for the degradation of dyes and Naproxen. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2024**, 12 (3), 113072.

Управление направлением роста планарных нитевидных нанокристаллов

Сибирев Н. В.¹, Штром И. В.^{1,2}

¹СПбГУ

²ИАП РАН

e-mail: NickSibirev@yandex.ru

Планарные полупроводниковые нитевидные нанокристаллы III-V (п-ННК) всё чаще рассматриваются в качестве перспективных элементов для современных оптоэлектронных и наноэлектронных устройств [1–3]. Управление направлением роста и легированием п-ННК на нанометровом уровне во время формирования наноструктур является одной из главных задач при изготовлении таких устройств [1–3].

В данном исследовании рассмотрено управление ростом п-ННК по механизму Пар-Жидкость-Кристалл (ПЖК), меняя состав капли катализатора. Основное внимание уделено следующим аспектам: повороту ННК в плоскости подложки и отрыву ННК от подложки. Отдельно рассмотрено, как изменение состава капли влияет на процессы легирования ННК. Теоретическая модель основана на предположении, что скорость роста определяется кристаллизацией на границе раздела "капля-кристалл", а не транспортом материала в каплю из газовой среды. То есть рост п-ННК происходит в нуклеационно-лимитированном режиме [2,4].

Основные выводы нашего исследования сводятся к следующему: поворот и отрыв ННК обусловлены изменением поверхностной энергии и объема каталитической капли. Для планарного роста ННК требуется, чтобы капля смачивала поверхность подложки [1]. Поэтому отрыва ННК проще всего добиться уменьшением размера капли, то есть уменьшением поступления элемента III группы или увеличением потока V группы. Аналогично можно описать процесс поворота п-ННК в плоскости подложки. Направление роста ННК

определяется взаимодействием капли с барьерами или эшелонами ступеней на поверхности ННК. При встрече п-ННК с высоким эшелоном ступеней, возможны четыре принципиально разные ситуации п-ННК растет вдоль ступени, отражается от ступени, продолжает рост прямо. Выбор конкретного сценария определяется поверхностной энергией [5]. Поверхностной энергией капли проще всего управлять меняя концентрацию элемента третьей группы. Поверхностная энергия жидкого галлия или индия заметно меньше, чем поверхностные энергии благородных металлов [1,6], которые чаще всего используются при росте п-ННК. Но меньше поверхностной энергии некоторых экзотических катализаторов, например олова [7]. Олово хорошо растворяет, как элементы III так и V группой. Поэтому для роста с оловянным катализатором условие поворота п-ННК в плоскости подложки, часто можно переформулировать в совсем простой форме. П-ННК с каплей катализатора богатой III группой предпочитают расти вдоль ступеней, а п-ННК с каплей катализатора богатой V группой растут поперёк.

Простейший способ изменение состава капли будет одновременно приводить, к изменению уровня легирования, даже при не измененной скорости роста и потоку легирующей примеси. Снижение концентрации элемента третьей группы будет приводить к тому, что легирующая добавка р-типа будет хуже встраиваться, а п-типа лучше [7]. В предельном случае тип легирования ННК амфотерной примесью, например кремнием будет меняться с р-типа на п-тип. Одновременно будет меняться и диаметр ННК [1]. Поэтому при росте легированных ННК, надо одновременно менять и поток легирующего элемента.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 129360164.

Список литературы

1. Borodin B.R., Alekseev P.A., Khayrudinov V., Ubyivovk E., Berdnikov Y., Sibirev N., Lipsanen H. // 2023. CrystEngComm V. 25. Iss.9. P. 1374–1382.
2. Berdnikov Y., Sibirev N. V., Khayrudinov V., Lipsanen H., Bouravleuv A., Alaferdov A., Moshkalev S., Ubyivovk E. V., Bouravleuv A., Lipsanen H., Bouravleuv A.D., Alaferdov A. V., Moshkalev S., Ubyivovk E. V. // 2019. CrystEngComm V. 21. Iss.41. P. 6165–6172.
3. Zhang C., Miao X., Chabak K.D., Li X. // 2017. J. Phys. D. Appl. Phys. V. 50. Iss.39. P. 393001.
4. Dubrovskii V.G., Sibirev N. V., Cirilin G.E., Harmand J.C., Ustinov V.M. // 2006. Phys. Rev. E V. 73. Iss.2. P. 021603.
5. Zavarize M., Sibirev N. V., Berdnikov Y., Moreira M., Obata H.T., Rodrigues V., Dubrovskii V.G., Cotta M.A. // 2023. Cryst. Growth Des. V. 23. Iss.9. P. 6623–6630.
6. Сибирёв Н.В., Тимофеева М.А., Большаков А.Д., Назаренко М.В., Дубровский В.Г. // 2010. Физика твердого тела V. 52. Iss.7. P. 1428–1434.
7. Shtrom I. V., Sibirev N. V., Soshnikov I.P., Ilkiv I. V., Ubyivovk E. V., Reznik R.R., Cirilin G.E. // 2024. Nanomaterials V. 14. Iss.23. P. 1860.

Импедансная спектроскопия углеродных наноматериалов при высоких давлениях

Соколовский Д. Н.^{1,2}, Волкова Я.Ю.¹, Бабушкин А.Н.¹

¹УрФУ

²УГМУ

e-mail: dmitry91sokol@gmail.com

Как известно, физические свойства углеродных нанотрубок определяются их геометрией [1], и могут быть изменены воздействием давления или напряжения. Электрические свойства многих композитов, содержащих наноструктуры, также сильно зависят от давления, что обусловлено не только строением самих наноструктур, но и контактами между соседними частицами, и образованием связей при определённых условиях. Подобные зависимости могут быть использованы при создании различных электромеханических устройств и преобразователей [2]. Например, существует ряд теоретических моделей, согласно которым в жгутах углеродных нанотрубок могут возникать связи между соседними нанотрубками, так называемый процесс полимеризации нанотрубок [3]. Исследование процессов, происходящих в подобных композитах, при высоких давлениях представляет значительный интерес.

В данной работе представлены результаты импедансной спектроскопии одностенных и двустенных углеродных нанотрубок, а также фуллерена C₇₀ при давлениях до 30 ГПа.

Исследования проводились с использованием камер высокого давления типа “закругленный конус – плоскость” с проводящими алмазными наковальнями. Размер образца в такой камере составлял около 200 мкм, а толщина слоя порядка 20–30 мкм. Для получения частотных спектров импеданса использовались измерители импеданса Solartron FRA-1172 и Solartron SI1260.

В случае одностенных углеродных нанотрубок импеданс имеет наибольшую ёмкостную составляющую при давлении 23 ГПа. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее проведенными исследованиями влияния высокого давления на термоэлектрические характеристики нанотрубок [4]. Так, наблюдаемые особенности при давлении около 23 ГПа могут свидетельствовать о фазовых переходах второго рода, обусловленных формированием двумерных или трехмерных структур на основе нанотрубок, а также процессами разрушения структуры нанотрубок наибольших диаметров.

Годографы импеданса ячейки с образцом фуллерена C₇₀ представляют собой часть дуги полуокружности и аппроксимируются эквивалентной схемой параллельной RC-цепи. Из годографов импеданса были рассчитаны параметры схемы, и построены их барические зависимости. В данных зависимостях наблюдается ряд особенностей в диапазоне 14–20 ГПа, вероятно, обусловленных процессами аморфизации фуллерена C₇₀.

Барические зависимости энергии активации также имеют ряд особенностей в диапазоне 20–30 ГПа, что хорошо согласуется с ранее проведенными исследованиями влияния

высокого давления на термоэлектрические характеристики углеродных нанотрубок и фуллерена C₇₀ [4].

Список литературы

1. Елецкий А.В. Успехи физических наук. 2009. Т. 179, №3. С.225–242.
2. Lee J., Kim J. et al. Composites Part B: Engineering. 2019. V 177. – 107364.
3. Hu M., Zhao Z. et al. Scientific Reports. 2013. V 3. P. 1331.
4. D.N. Sokolovsky, Ya.Yu. Volkova, and A.N. Babushkin, Nanobiotechnology Reports. 2022. V 17, P. 484.

Mapping the chemistry of boron-nitride molecules

Федяева М. А.^{1, 2}, Лепешкин С.В.^{1, 3}, Оганов А.Р.¹

¹СколТех

²ГЕОХИ РАН

³ФИАН

e-mail: Maria.Fedyaeva@skoltech.ru

Наноразмерные бор-азотные объекты — кластеры, нанопроволоки, нанотрубки, тонкие плёнки и другие структуры — в последние годы вызывают всё больший интерес благодаря их уникальным физическим и химическим свойствам. Эти материалы перспективны для применения в целом ряде областей: от создания электронных устройств, наноточек и высокопрочных волокон до разработки эффективных систем хранения водорода.^{1–3}

Теоретические исследования бор-азотных нанокластеров позволяют глубже понять их структурные характеристики и заложить основы для целенаправленного синтеза. Однако до настоящего времени большинство подобных исследований ограничивалось изучением частиц с небольшим числом атомов или соотношением B/N = 1, что не позволяло сформировать полную картину структурного разнообразия.

В данной работе мы провели систематический анализ молекул вида B_nN_m (0 ≤ n, m ≤ 10) с помощью эволюционного алгоритма USPEX⁴ и методов теории функционала плотности (DFT). Результаты показали наличие широкого набора структурных мотивов, определяемых размерами молекул и соотношением B/N. При этом были выявлены так называемые «магические» молекулы, обладающие повышенной стабильностью (согласно энергетическим критериям и значению HOMO-LUMO-разности). Они могут служить потенциальными строительными блоками и промежуточными продуктами в процессах синтеза B-N материалов. Кроме того, некоторые молекулы, обогащенные азотом могут выделять существенное количество энергии при распаде, что указывает на их возможное применение в качестве высокоэнергетических материалов (HEDMs)⁵.

Таким образом, проведённое исследование расширяет представления о структурном многообразии бор-азотных объектов и открывает пути для целенаправленной разработки перспективных материалов с заданными свойствами — как в высокопрочных наноструктурах, так и в высокоэнергетических соединениях.

Список литературы

1. D. V. Shtansky, A. T. Matveev, E. S. Permyakova, D. V. Leybo, A. S. Konopatsky and P. B. Sorokin, *Nanomaterials (Basel)*, DOI:10.3390/nano12162810.
2. K. Nejati, A. Hosseini, E. Vessally, A. Bekhradnia and L. Edjlali, *Appl. Surf. Sci.*, 2017, **422**, 763–768.
3. L. Zhang, X. Cheng, X.-H. Li, J.-H. Chen and W.-M. Sun, *J. Mol. Liq.*, 2022, **360**, 119388.
4. A. R. Oganov and C. W. Glass, *J. Chem. Phys.*, 2006, **124**, 244704.
5. L. P. Cheng, Y. Q. Xu, G. L. Wang and H. H. He, *J Mol Model*, 2012, **18**, 1927–1934.

Синтез колончатых микрокристаллов GaN комбинированным РА-MBE/HVPE методом

Корякин А.А.¹, Гридчин В.О.¹, Шарофидинов Ш.Ш.², Дворецкая Л.Н.¹, Штром И.В.³,
Цырлин Г.Э.¹

¹СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³СПбГУ

e-mail: koryakinaa@spbau.ru

Колончатые микрокристаллы нитрида галлия, широкозонного полупроводника с высокой термической и химической стабильностью, являются перспективным материалом для создания электронных и оптоэлектронных устройств. В частности, на основе колончатых микрокристаллов GaN возможно создание светоизлучающих диодов, путем формирования многослойной гетероструктуры InGaN типа «ядро-оболочка» [1]. Другим применением одиночных колончатых микрокристаллов GaN является использование их в качестве активной области оптических микрорезонаторов с модами типа «шепчущей галереи» [2]. Кроме того, для создания приборных приложений на основе нитрида галлия синтез колончатых микрокристаллов имеет ряд преимуществ по сравнению с ростом тонких пленок. Во-первых, низкая плотность дефектов и отсутствие трещин из-за малой площади контакта с подложкой. Как результат, колончатые микрокристаллы GaN возможно синтезировать на подложках с большим рассогласованием решеток и, в частности, на кремнии, что позволяет реализовать монолитную интеграцию с кремниевой элементной базой. Во-вторых, уменьшенные эффекты спонтанной поляризации, так как боковые стороны колончатых микрокристаллов GaN, имеющих структуру вюрцита и формирующихся преимущественно в направлении [0001] или [000-1], образованы неполярными ({1-100}, {11-20}) или полуполярными гранями (например, {1-101}).

В данной работе колончатые микрокристаллы GaN синтезированы на кремниевых подложках новым комбинированным РА-MBE/HVPE методом. На первом этапе на подложках Si(111) методом микросферной литографии формировалась маска из оксида кремния с отверстиями. Затем методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (РА-MBE) производился рост упорядоченного массива нитевидных кристаллов GaN субмикронного размера [3]. На втором этапе осуществлялся рост колончатых

микрокристаллов GaN путем заращивания массива нитевидных кристаллов методом хлоридной газофазной эпитаксии (HVPE). Следует отметить, что при селективном росте колончатых микрокристаллов GaN методом МОС-гидридной эпитаксии основной проблемой является получение большого отношения высоты кристаллов h к их диаметру d . Рост GaN на кристаллических затравках с большим отношением h/d , а также возможность достижения большой анизотропии роста кристаллов в методе HVPE позволяет эффективно решить данную проблему.

Морфология и кристаллографическая ориентация полученных структур контролировались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Была продемонстрирована возможность контроля размера колончатых микрокристаллов GaN. В рамках теоретической модели [4] изучен механизм роста кристаллов GaN при комбинированном методе синтеза. Так наблюдаемое уменьшение диаметра от основания к вершине у кристаллов GaN в методе РА-МВЕ связано с формированием эшелона ступеней на боковых поверхностях кристаллов, перемещающихся от основания к вершине. При росте кристаллов GaN в реакторе HVPE происходит заращивание сформированных ранее ступеней, после которого нуклеация новых ступеней возможна на всей площади боковых граней кристаллов GaN. Таким образом реализуется послойный рост боковых граней микрокристаллов GaN, что подтверждается РЭМ исследованием, показывавшим, что большинство микрокристаллов GaN имеет форму шестигранной призмы. Для определения степени кристаллического совершенства полученных структур GaN проводились измерения методом низкотемпературной фотолюминесценции при 5 К. Типичные значения положения пика D^0X равнялись 3.478 эВ при величине FWHM 8 мэВ, что указывает на хорошее кристаллическое качество колончатых микрокристаллов GaN и отсутствие механических напряжений [5].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00761, <https://rscf.ru/project/25-29-00761/>.

Список литературы

1. J. Meier, G. Bacher, Progress and challenges of InGaN/GaN-based core-shell microrod LEDs, *Materials*, 15, 1626 (2022).
2. H. Chen, J. Li, G. Yu, H. Zong, R. Lang, M. Lei, S. Li et al., Room-temperature polariton lasing in GaN microrods with large Rabi splitting, *Optics Express*, 30, 16794 (2022).
3. V.O. Gridchin, L.N. Dvoretckiaia, K.P. Kotlyar, R.R. Reznik, A.V. Parfeneva, A.S. Dragunova, N.V. Kryzhanovskaya, V.G. Dubrovskii, G.E. Cirlin, Selective area epitaxy of GaN nanowires on Si substrates using microsphere lithography: experiment and theory, *Nanomaterials*, 12, 2341 (2022).
4. S.N. Filimonov, Yu.Yu. Hervieu, Model of step propagation and step bunching at the sidewalls of nanowires, *J. Cryst. Growth*, 427, 60–66 (2015).
5. G. Avit, Y. Andre, C. Bougerol et al., GaN rods grown on Si by SAG-HVPE towards GaN HVPE/InGaN MOVPE core/shell structures, *Cryst. Growth Des.*, 16, 2509–2513 (2016).

Formation of a low-defect local area on the surface of silicon carbide by plasma etching

Климин В. С.¹

¹ЮФУ

e-mail: kliminvs@sfedu.ru

Карбид кремния является одним из наиболее перспективных полупроводниковых материалов для высоковольтных и высокочастотных приложений благодаря своим выдающимся электрическим свойствам. Однако наличие дефектов на поверхности SiC может значительно ухудшить характеристики устройств, таких как транзисторы и диоды. Создание бездефектной поверхности является критически важным для повышения производительности и надежности этих компонентов.

Плазменное травление представляет собой высокоэффективный метод обработки поверхности, позволяющий достигать высокой точности и контроля над процессом. Исследование методов плазменного травления для получения бездефектной поверхности SiC открывает новые горизонты в разработке и оптимизации технологий, что может привести к созданию более совершенных и конкурентоспособных устройств.

Особой областью исследования является интеграция карбида кремния в стандартные технологии микроэлектроники. С увеличением применения SiC в таких областях, как силовая электроника, возобновляемые источники энергии и системы хранения энергии, требования к качеству поверхности становятся все более строгими. Бездефектная поверхность SiC является необходимым условием для успешной интеграции этих технологий в массовое производство. Исследование методов плазменного травления не только способствует улучшению качества поверхности SiC, но и открывает новые научные горизонты в области взаимодействия плазмы с твердыми телами, что может привести к созданию новых материалов и технологий.

Таким образом, исследование получения бездефектной поверхности карбида кремния методами плазменного травления является актуальным и востребованным направлением, способствующим развитию современных технологий и повышению качества полупроводниковых устройств.

В данной работе проводились экспериментальные исследования по формированию малодефектной локальной области на поверхности карбида кремния, для дальнейшего формирования графеноподобного слоя. Для достижения такого результата проводилось двухстадийное плазмохимическое травление. Во время первой стадии удалялась кремниевая составляющая во фторидной плазме, в качестве реактивного газа использовался гексафторид серы. Во время второй стадии удалялась углеродная составляющая в кислородной плазме в качестве кислородсодержащего газа использовался оксид азота.

В отличие от одностадийного плазменного травления, где используется смесь газов и происходит объемное травление поверхности, данная методика позволяет контролировать процесс практически по атомарным слоям, что позволяет не учитывать толщину

стравливаемого слоя при проектировании устройств на поверхности карбида кремния, например широкополосной антенны с графеноподобным проводящим слоем. Данная технология может применяться как для изготовления устройств непосредственно на поверхности карбида кремния, так и для последующего формирования функциональных пленок на подложке.

Исследование выполнено в Южном федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00722, <https://rscf.ru/project/25-29-00722/>

Управление упругими напряжениями при росте гетероструктур (Al)GaN/SiC

Заварин Е. Е.^{1,2}, Родин С.Н.^{1,2}, Ключев Б.Ю.², Лундин В.В.¹, Николаев А.Е.¹,
Артеев Д. С.^{1,2}, Сахаров А. В.^{1,2}, Цацульников А.Ф.^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НТЦ Микроэлектроники РАН

e-mail: zavarin@yandex.ru

Полевые транзисторы на основе III-N соединений уже нашли практическое применение для силовых и высокочастотных применений. В настоящее время мощные СВЧ транзисторы изготавливают в основном на основе гетероструктур AlGaIn/GaN на подложках SiC, как обладающих максимальной теплопроводностью из коммерчески доступных вариантов (сапфир, кремний, карбид кремния). Эпитаксия на инородной подложке сталкивается с 2 проблемами: первая - рассогласование кристаллических параметров решеток, а вторая – разница в коэффициентах теплового расширения (КТР). Первая проблема решается выбором соответствующих условий роста начального слоя, а вторая является более сложной.

Для GaN и SiC КТР составляют 5.59 и $4.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, соответственно при охлаждении от типичной температуры эпитаксии в 1000°C до комнатной температуры это создает рассогласование $\sim 10^{-3}$ приводящее к изгибу структуры, и, в худшем случае, к образованию трещин. Переход к все более высоким рабочим частотам требует уменьшения топологических норм, что в свою очередь накладывает ограничения на изгиб готовой структуры при проведении литографии, что в сочетании с постоянно растущим диаметром подложек [1] приводит к необходимости управлять напряжениями при росте структур.

В работе представлены результаты систематического анализа по данным in-situ оптической рефлектометрии [2] упругих напряжений, возникающих при росте гетероструктур AlGaIn для полевых транзисторов на подложках SiC методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Продемонстрирована возможность управляемого создания напряжений сжатия при эпитаксии слоев III-N, компенсирующих напряжения растяжения, возникающие при охлаждении. Рассмотрены 2 подхода, связанные с использованием на начальной стадии роста слоев AlGaIn различного состава [3] и модификацией

режимов эпитаксии GaN буферного слоя. Исследовано влияние легирования глубокими примесями на моды роста и возникающие упругие напряжения. Определены режимы воспроизводимого получения структур с прогибом после эпитаксии менее 20 мкм для подложек диаметром до 3 дюймов.

Список литературы

1. https://compoundsemiconductor.net/article/121133/Infineon_starts_200mm_SiC_product-roll_out
2. Krost A. et al., GaN-based epitaxy on silicon: stress measurements, // Phys. Status Solidi A – 2003, 200(1) 26 doi 10.1002/pssa.200303428
3. Rudinsky M.E. et al. Stress-dislocation management in MOVPE of GaN on SiC wafers // Phys. Status Solidi A – 2016, 213 (10) 2759 / DOI 10.1002/pssa.201600210

Влияние состава композита (CoFeB+SiO₂) на температурные и частотные зависимости импеданса и тангенса угла потерь двухслойной планарной структуры: полимер – композит

М.В. Якимов¹, Л.Н. Котов¹, М.П. Ласёк¹, А.В. Ситников² Ю.Е. Калинин²

¹Сыктывкарский государственный университет

²Воронежский государственный технический университет

e-mail: taxcamper97@yandex.ru

Известно, что полимерные плёнки с покрытиями из композитных металл-диэлектрических плёнок могут проявлять необычные электрические, магнитные и импедансные свойства [1]. Эти свойства могут изменяться в широких пределах при варьировании толщины, концентрации металла и диэлектрика, а также при изменении параметров напыления [1]. На практике такие композитные плёнки могут использоваться при создании новых элементов микроэлектроники и в качестве магнитно-резистивных сенсоров для устройств магнитной записи и чтения данных, материалов спинтроники, а также в качестве элементов электромагнитного экранирования и нелинейных фильтров. Одним из способов создания новых материалов с уникальными свойствами является создание двухслойных планарных структур: полимер-композит, которые получаются при напылении композитного слоя на полимерную плёнку. Изучение свойств такой двухслойной структуры порождает интерес к исследованиям процессов поляризации и переноса электрических зарядов в полимерах, металл-диэлектрических композитах и в области интерфейса композит-полимер. Одним из методов исследования свойств полимеров с тонким композитным покрытием является метод импедансной спектроскопии, позволяющей получать спектры импеданса и тангенса угла потерь в широком диапазоне частот и в широком интервале температур [3]. В данной работе изучено влияние концентрации x металлического сплава $Co_{0.41}Fe_{0.39}B_{0.20}$ на температурные и частотные зависимости импеданса и тангенса угла потерь двухслойной планарной структуры: полимер-композит в интервале температур 120–420 К и в диапазоне частот 1Гц–10 МГц [1]. В качестве полимера выступала лавсановая

плёнка (полиэтилентерефталат, (ПЭТФ) толщиной 30 мкм. В качестве слоя композита использовалось композитное покрытие составов $[(\text{CoFeB})_x + (\text{SiO}_2)_{(1-x)}]$, где $x=0.45-0.85$ с толщинами слоя 0.54-0.90 мкм. Были построены температурные зависимости вещественной части импеданса $Z'(T)$ и тангенса угла потерь $\text{tg}\delta$ для разных концентраций металлического сплава $x=0.45-0.85$ на частотах: 10 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 10 МГц. Для композитных слоёв с концентрациями $x>0.55$ на зависимостях $Z'(T)$ наблюдается широкой максимум в интервале температур 230-370 К. Амплитуда этого максимума $Z'(T)$ растёт, а положение и ширина максимума уменьшается с увеличением x . Всё это свидетельствует о том, что с ростом концентрации x растёт вклад индуктивной составляющей в импеданс двухслойной планарной структуры: полимер-композит. На температурных зависимостях тангенса угла потерь $\text{tg}\delta$ для всех концентраций для диапазона низких и средних частот 10 Гц - 0.1 МГц наблюдаются максимумы потерь вблизи температур 200 и 360 К. Эти максимумы сдвигаются в сторону высоких температур при увеличении частоты переменного тока. Концентрация x оказывает значительное влияние на значение $\text{tg}\delta$ на частотах, больших 0.1 кГц во всём исследуемом интервале температур 120-420 К. Максимальные потери соответствуют двухслойной структуре с композитными слоями с гранулированной структурой на высоких частотах.

Выявлено, что для двухслойной структуры: полимер-композит с концентрациями металлического сплава $x>0.57$ в композитном слое наблюдается значительное изменение поведения температурных и частотных зависимостей импеданса и тангенса угла потерь. Определено, что поведение компонент диэлектрической проницаемости лавсановой плёнки с композитным гранулированным покрытием с концентрацией $x < 0.47$ при температурах до 380 К соответствует распределению Коула-Коула [3]. Поскольку магнитное поле оказывает значительное влияние на импеданс композитных плёнок $(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2)$ в диапазоне частот 0.1-3 ГГц [2], то с помощью магнитного поля можно управлять импедансными свойствами двухслойной планарной структуры: полимер-композит с помощью магнитного поля.

Исследования выполнены за счёт гранта РНФ (проект № 21-72-20048)

Список литературы

1. Ласёк М.П., Котов Л.Н., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Спектры импеданса и тангенса угла потерь в диапазоне частот 10 Гц-10 МГц и в интервале температур 120-420 К и магнитная структура композитных плёнок $(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2)$ // Физика твёрдого тела. 2024. Том 66, выпуск 12. С. 2129-2132. DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59577.6564PA
2. Leonid Kotov, Michail Lasek, Vladimir Vlasov, Yuri Kalinin, Alexander Sitnikov, Vasily Temnov, In IEEE International Conference on Next Generation Electronics (NEleX 2023) | 979-8-3503-1908-8/23/\$31.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.1109/NELEX59773.2023.10421632
3. E. Barsoukov, J.R. Macdonald. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey (2018). 595 p.

Разработка инструмента анализа экспериментальных вольт-амперных характеристик полупроводниковых полевых катодов в режиме реального времени

Нечаев М. С.^{1 2}, Соков С.А.^{1 2}, Колосько А.Г.¹, Филиппов С.В.¹, Попов Е.О.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: msnechaev@stud.etu.ru

Полупроводниковые полевые катоды являются одним из приоритетных направлений развития современной вакуумной электроники. Преимуществом данного вида катодов является совместимость технологии их изготовления с техпроцессами изготовления полупроводниковых структур микроэлектроники. Применение субмикронной ультрафиолетовой литографии позволяет достаточно точно контролировать и воспроизводить форму эмиттеров матрицы многоострийного катода [1]. Такие матрицы используются в разработках разного вида вакуумных приборов, например в микрофокусных рентгеновских аппаратах [2].

Измерение характеристик, анализ свойств и технологическая оптимизация полевых катодов в первую очередь основываются на регистрации вольт-амперных характеристик (ВАХ). Классическим подходом к получению параметров катода является анализ ВАХ в полулогарифмических координатах (т.н. координаты Фаулера-Нордгейма) [3]. Стандартными параметрами, которые извлекаются из ВАХ, являются эффективные значения коэффициента усиления поля (Υ) и площади эмиссии (A). Выбор координат неоднозначен, так как современная теория указывает на изменение степени напряжения в предэкспоненциальном множителе основного уравнения полевой эмиссии [4]. Отдельным усложнением можно считать влияние на ВАХ формы эмиттера, которое также может быть учтено изменением степени напряжения в основном уравнении, а также в полулогарифмических координатах [5].

В отличие от металлических и псевдометаллических (например, проводящие углеродные нанотрубки) полевых катодов полупроводниковые эмиттеры имеют более сложные уравнения для вычисления эмиссионного тока. Это сказывается на невозможности прямого применения полулогарифмических координат для анализа ВАХ.

Одним из основателей теории эмиссии из полупроводников является Страттон [6]. Выведенное им уравнение состоит из двух множителей, один из которых имеет структуру подобную уравнению Фаулера-Нордгейма, а второй описывает искажение энергетических зон на границе полупроводник – вакуум. Более комплексным подходом является учёт движение носителей заряда в зоне проводимости, которые в виду своей относительно низкой концентрации могут привести к эффекту насыщения уровня эмиссионного тока [7]. Решение данной системы представляется в виде нахождения общего корня для двух уравнений: уравнение полевой эмиссии на границе полупроводник – вакуум и решение

дифференциального уравнения Пуассона в приповерхностном слое полупроводника. Данное решение было представлено в работе [8] для нанокристаллических алмазных плёнок.

В работе, представленной данными тезисами, описана разработка инструмента анализа экспериментальных ВАХ полупроводниковых полевых катодов на базе численного решения уравнений полевой эмиссии с участием дифференциального уравнения Пуассона. Предложенный программный алгоритм позволяет оперативно рассчитать зависимость плотности тока от величины напряжённости поля на поверхности катода и использовать её в построении линии тренда к экспериментальной ВАХ.

Оперативность вычислений необходима для реализации обработки экспериментальных ВАХ в режиме реального времени. Такая обработка применяется в исследованиях полевых катодов, где экспериментатор может отслеживать изменение микроскопических характеристик катода за счёт быстрого периодического сканирования образца высоким напряжением с получением непрерывного потока реализаций ВАХ.

Разработанный инструмент анализа выполнен в среде программирования LabVIEW с целью его интеграции в программу, управляющую экспериментом компьютеризированного измерительного стенда [9].

Список литературы

1. Low-power field emission arrays with sharp emitters. S. Ghotbi, S. Mohammadi. In 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). IEEE. (2023), pp. 1 – 2. DOI: 10.1109/IVEC56627.2023.10157710.
2. Study of the dynamics of heating anode units in a maskless nanolithograph based on an array of microfocus X-ray tubes. P.Yu. Glagolev, G.D. Demin, N.A. Djuzhev, M.A. Makhboroda, N.A. Filippov. Tech. Phys. 92, 13 (2021), pp. 2025 – 2124. DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51372.132-21.
3. Work function of low index crystal facet of tungsten evaluated by the Seppen-Katamuki analysis. Y. Gotoh, K. Mukai, Y. Kawamura, H. Tsuji, J. Ishikawa. J. Vac. Sci. Technol. B. 25, 2 (2007), pp. 508 – 512. DOI: 10.1116/1.2433950
4. The pre-exponential voltage-exponent as a sensitive test parameter for field emission theories. R.G. Forbes, E.O. Popov, A.G. Kolosko, S.V. Filippov. R. Soc. Open Sci. 8, 3 (2021), pp. 201986-1 – 19. DOI: 10.1098/rsos.201986
5. Processing of experimental current-voltage characteristics of single tip emitters taking into account the functional dependence of the emission area on the applied voltage. Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G. J. Vac. Sci. Technol. B. 41, 1 (2023), pp. 012801-1 – 7. DOI: 10.1116/6.0002305 41, 012801
6. Theory of Field Emission from Semiconductors. R. Stratton. Phys. Rev. 125 (1962), pp. 67 – 82. DOI: 10.1103/PhysRev.125.67.
7. General features of field emission from semiconductors. L.M. Baskin, O.I. Lvov, G.N. Fursey. Phys. Status Sol. (b). 47, 1 (1971), pp. 49 – 62. DOI: 10.1002/pssb.2220470105.
8. Theoretical evaluation of electronic density-of-states and transport effects on field emission from n-type ultrananocrystalline diamond films. O. Chubenko, S.S. Baturin, S.V. Baryshev. Journal of Applied Physics. 125, 20 (2019), pp. 205303-1 – 15. DOI: 10.1063/1.5085679.
9. Comparison of macroscopic and microscopic emission characteristics of large area field emitters based on carbon nanotubes and graphene. E.O. Popov, A.G. Kolosko, S.V.

Filippov, E.I. Terukov, R.M. Ryazanov, E.P. Kitsyuk. J. Vac. Sci. Technol. B. 38, 4 (2020), pp. 043203-1 – 10. DOI: 10.1116/6.0000072.

Исследование характеристик графенового чипа в трехэлектродной схеме для биосенсорных применений

Смирнов А. Н.¹, Воробьев С.В.^{1,2}, Усиков А.С.^{1,3}, Шмидт Н.М.¹, Плеханов А.Ю.⁴,
Терновых И.К.^{1,2}, Роенков А.Д.³, Пузык М.В.⁵, Шабунина Е.И.¹, Гущина Е.В.¹,
Амельчук Д.Г.¹, Приображенский С.Ю.^{1,6}, Лебедев С.П.¹, Лебедев А.А.¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе

² НМИЦ им. В.А. Алмазова

³ ООО ГНК

⁴ НИИ гриппа им. А.А. Смородинцева

⁵ РГПУ им. А.И. Герцена

⁶ СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: alex.smirnov@mail.ioffe.ru

Изучение особенностей взаимодействия биомолекул с графеном и их детектирования представляет научный и практический интерес для развития биосенсорики на основе графена, в частности для диагностики маркеров болезни Альцгеймера (бета- и тау-белки).

В работе проводились исследования передаточных характеристик графенового чипа в трёхэлектродной схеме полевого транзистора в чистых физиологических растворах (Фосфатно-солевой буфер, PBS), позволяющие контролировать фундаментальные свойства графена. Были использованы чистые чипы, имеющие различные концентрационные зависимости, а также чипы с нанесенными непосредственно на графен тау- и бета-белками. Кроме того, были исследованы несколько чистых чипов с различными значениями среднеквадратичной шероховатости поверхности графена (RMS), которые ранее не участвовали в экспериментах по детектированию и не подвергались какой-либо обработке поверхности графена.

Эксперименты проводились с чипами на основе пленок графена, выращенных методом термического разложения подложек 4H-SiC. На чипы наносились два Au/Ti электрода, один из которых служил истоком, другой – стоком. Оба электрода были защищены лаком. Таким образом с раствором PBS взаимодействовала только поверхность графена в чипе размером около 1x1 мм. Раствор PBS являлся третьим электродом (затвором). Для электрического контакта в раствор PBS опускалась платиновая проволока.

Во время эксперимента чип инкубировали в растворе PBS, между стоком и истоком прикладывался стабилизированный потенциал 40 мВ, а потенциал затвора (V_G) сканировался в диапазоне напряжений от -1.4 В до $+1.4$ В в течение 30, 120 или 240 сек, при этом записывалась величина тока исток-сток (ISD). Полученные передаточные характеристики ($ISD=f(V_G)$) имели характерный V-образный вид с минимумом тока при определенном потенциале, который относят к потенциалу точки Дирака (DP). Установлено, что

потенциал D_p для чистых чипов (без нанесенных белков) имел более отрицательное значение, чем D_p для чипов с белками на поверхности графена. С другой стороны, величина D_p фактически не зависит от значений RMS поверхности графена чистого чипа, т.е. от загрязнений поверхности графена остатками резиста, а зависит от природы раствора-аналита, находящегося в контакте с графеном. Сдвиг величины D_p в сторону положительных напряжений при увеличении времени сканирования потенциала затвора от 30 до 240 сек, формально указывает на легирование графенового канала дырками. Таким образом чистый раствор PBS проявляет акцепторные свойства, приводя фактически к перетеканию электронов из графенового слоя. Этот факт может быть связан с тем что, увеличение времени сканирования потенциала улучшает условия стабилизации и формирования положительного зарядового слоя на границе графен–физиологический раствор PBS. В докладе также обсуждаются другие особенности передаточных характеристик, морфологии поверхности и свойств графена.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ.

Синтез и свойства ветвистых нитевидных нанокристаллов AlGaAs на кремнии.

Андреева А. С.¹, Резник Р. Р.¹⁻³, К. П. Котляр¹⁻³, А. И. Хребтов^{1,2}, И. П. Сошников^{1,4}, А. В. Сюй^{5,6}, А. Кузнецов^{1,5}, А. Д. Большаков^{1,5,7}, Г. Э. Цырлин¹⁻³, В. Г. Дубровский².

¹СПБАУ РАН

²СПбГУ

³ИАП РАН

⁴ФТИ им. Иоффе

⁵МФТИ

⁶Emerging Technologies Research Center, XPANCEO

⁷Laboratory of Advanced Functional Materials, Yerevan State University

e-mail: aa5991696@gmail.com

Наноструктуры из соединений III-V, в частности нитевидные нанокристаллы (ННК), в настоящее время являются перспективными компонентами для применения в оптоэлектронике, возобновляемой энергетике и квантовых вычислениях^[1,2]. Уникальные оптические, электрические и транспортные свойства ННК, а также возможность их роста на подложках с рассогласование параметров решетки^[3], делают их привлекательными для создания устройств. Ветвистые ННК, состоящие из первичных ННК (тело) и вторичных ННК (ветви), обладают большими функциональными возможностями благодаря увеличенной площади поверхности, улучшенному поглощению света и сниженному отражению. В данной работе мы сосредоточились на синтезе и характеристике структуры и состава разветвленных ННК AlGaAs, выращенных на подложках Si(111).

Рост ветвистых ННК AlGaAs проводился на установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber Compact 21T, оснащенной источниками Ga, Al, As и эффузионной ячейкой Au. В качестве подложек использовались полупроводниковые пластины Si(111). Перед ростом подложки обрабатывались в плавиковой кислоте для удаления естественного оксидного слоя, а затем нагревались до 850°C для устранения остаточных оксидов. Тонкий слой Au (~1 нм) осаждался при 550°C и выдерживался при той же температуре в течение 1 минуты для формирования капель Au. Затем температура снижалась до 150°C. Первичные ННК AlGaAs выращивались при 510°C в течение 25 минут. Для формирования ветвей первого поколения Au осаждался снова при 430°C. Ветви выращивались при 480°C в течение 20 минут. Ветви второго поколения формировались аналогично.

На изображениях, полученных с помощью метода растровой электронной микроскопии (РЭМ), есть три типа ветвей: (i) треугольные ветви, перпендикулярные телу ННК (ветви типа 1), (ii) мостики, образовавшиеся посредством срастания двух ветвей типа 1, и (iii) ветви второго поколения с более сложной структурой и различными направлениями роста. Средняя высота и диаметр первичных ННК составили 4 мкм и 130 нм соответственно, с поверхностной плотностью $1,3 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$. Анализ изображений просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и локальной дифракции электронов указывает на формирование тела ННК и ветвей первого типа в вюрцитной (WZ) кристаллической фазе. Ветви второго поколения обладают более сложной кристаллической структурой. Кроме того, основное тело ННК имеет структуру "ядро-оболочка" с долей AlAs 0,25-0,30 в ядре и 0,17-0,18 в оболочке, что уже ранее наблюдалось в таких системах^[4'5].

Исследование методом рамановской спектроскопии также подтвердило присутствие WZ-фазы в теле ННК и ветвях первого поколения, а в ветвях второго поколения наблюдался переход к структуре цинковой обманки (ZB). Рамановские спектры показали характерные моды WZ- и ZB-фаз, с наиболее выраженной WZ модой E^2_h на 255 см^{-1} ^[6]. Наличие обеих WZ- и ZB-фаз указывает на полиморфизм ветвей, что ранее наблюдалось в ПЭМ.

Мы продемонстрировали метод синтеза ветвистых ННК AlGaAs с использованием катализатора Au на подложках Si(111). Тело ННК и ветви первого поколения обладают практически чистой WZ кристаллической фазой, в то время как ветви второго поколения имеют полиморфную структуру с переходом к преимущественно ZB-фазе. Этот метод предлагает экономически выгодный подход для синтеза ветвистых AlGaAs структур, с потенциальными применениями в Si-интегрированной оптоэлектронике.

Список литературы

1. Konar A. et al., Carrier transport in high mobility InAs nanowire junctionless transistors, Nano letters. 15 (3) (2015) 1684 – 1690.
2. Joyce H. J. et al., III–V semiconductor nanowires for optoelectronic device applications, Progress in Quantum Electronics. 35 (2) (2011) 23 – 75.
3. Dubrovskii V. G., Cirlin G. E., Ustinov V. M., Semiconductor nanowhiskers: synthesis, properties, and applications, Semiconductors. 43 (2009) 1539 – 1584.
4. Leandro L. et al. Wurtzite AlGaAs nanowires, Scientific Reports. 10 (1) (2020) 735.

5. Dubrovskii V. G. et al. Origin of spontaneous core-shell AlGaAs nanowires grown by molecular beam epitaxy, *Crystal Growth & Design*. 16 (12) (2016) 7251 – 7255.
6. Zardo I. et al. Raman spectroscopy of wurtzite and zinc-blende GaAs nanowires: polarization dependence, selection rules, and strain effects, *Physical Review B*. 80 (24) (2009) 245324.

Исследование стабильности транспортных свойств чипов графен/SiC

Приображенский С.Ю.^{1,2}, Полоскин Д.С.¹, Оганесян Г.А.¹, Гущина Е.В.¹, Роенков А.Д.³, Лебедев С.П.¹, Лебедев А.А.¹, Смирнов А.Н.¹, Елисеев И.А.¹, Шабунина Е.И.¹, Воробьев А.А.⁴, Шмидт Н.М.¹, Усиков А.С.³

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе

² СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

³ ООО ГНК

⁴ СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

e-mail: sergei.prioby@mail.ioffe.ru

Известно, что низкоразмерные материалы, такие как графен и его производные обладают мемристорными и фотомемристорными состояниями, контролируемые поляризацией, окислительно-восстановительными процессами или фотоиндуцированными структурными переходами, и демонстрируют динамическое поведение, в частности изменение резистивных свойств на определенное время. Эти особенности позволяют разрабатывать приборы для обработки электрических сигналов в памяти запоминающих устройств и процессоров, но при использовании графена в биосенсорах эти эффекты могут быть нежелательными.

В работе проведены исследования стабильности транспортных свойств однослойного графена *n*- и *p*-типа проводимости, полученного методом термического разложения подложек 4H-SiC. Определены температурные зависимости проводимости и подвижности носителей заряда методом Ван-дер-Пау в чипах графен/SiC с размером 5х5 мм². При комнатной температуре подвижность электронов в *n*-типе графена составляла 600–1200 см²В⁻¹с⁻¹, а подвижность дырок в *p*-типе графена – 160–600 см²В⁻¹с⁻¹.

На части чипов с графеном *p*-типа проявилась неоднородность материала по значениям подвижности в два раза по парам контактов, а также нестабильность параметров при охлаждении от 300 до 77 К с выбросом значений при некоторых температурах по концентрации носителей в несколько раз. При этом, при обратном нагреве чипа от 77 до 300 К выбросов значений ни по концентрации, ни по подвижности не наблюдалось. На отдельных чипах с графеном *p*-типа, без нестабильности параметров при охлаждении, при температуре 300 К наблюдалась временная нестабильность параметров. При выдержке в темноте в измерительной установке в течении нескольких дней наблюдался рост концентрации носителей заряда на порядок со сменой типа проводимости на *n*-тип и с той же величиной

концентрации. При засветке белым светом (комнатное освещение) тип проводимости и концентрация возвращались к исходным значениям до выдержки.

Исследование морфологии графена методами атомно-силовой микроскопии не выявило однозначной связи возникновения *p*-типа проводимости и наблюдаемых нестабильностей с увеличением процентного содержания двухслойного графена. Наблюдалось небольшое влияние специфических дефектов подложки, в области которых не происходит рост графена, на появление *p*-типа. Однако для подтверждения этого необходимы более обширные статистические данные.

В настоящее время исследования чипов методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) в стандартных режимах не выявили особенностей, связанных с наличием *p*-типа проводимости слоев графена. Исследования методом КРС будут продолжены и их детальные результаты будут представлены наряду с данными низкочастотной спектроскопии, которые позволят выявить причины, приводящие к появлению *p*-типа проводимости и нестабильности его свойств.

В дальнейшем графен *p*-типа со стабильными параметрами может быть использован для детектирования бета-амилоидов – маркеров болезни Альцгеймера. На графене *n*-типа, вышеописанных нестабильностей не выявлено, что позволяет использовать его при разработке биосенсоров нейродегенеративных заболеваний.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ.

Н-образные вольт-амперные характеристики массива разупорядоченных углеродных нанотрубок

Моисеев С. Г.¹, Афанасьев С.А.¹, Зайцев В.А.¹, Санников Д.Г.¹, Сауров М.А.^{1,3}, Сыса А.В.^{1,3}, Шаман Ю.П.^{1,3}

¹Ульяновский государственный университет

²УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

³НПК «Технологический центр»

e-mail: *moiseev_s_g@mail.ru*

Развитие современной микроэлектроники требует разработки новых подходов, позволяющих повысить производительность и уменьшить энергопотребление создаваемых электронных устройств. Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование в комплементарной структуре «металл-оксид-полупроводник» углеродных нанотрубок (УНТ), обладающих полупроводниковым типом проводимости.

В рамках проведения исследований транзисторных структур на основе УНТ была проведена сепарация одностенных УНТ (ОУНТ) по типу проводимости методом гель-хроматографии, а осаждение ОУНТ осуществлялось на тестовые структуры спрей-методом через

металлическую маску. В качестве ОУНТ использовали нанотрубки торговой марки ОСУНТ-80 диаметром 1.3-1.7 нм. Тестовые структуры представляли собой кристалл высоколегированного кремния n-типа проводимости со сформированным на поверхности слоем оксида кремния толщиной 100 нм и осажденными золотыми (Au) или никелевыми (Ni) электродами. Расстояние между электродами составляло 8 мкм. В качестве управляющего электрода выступала подложка на тыльной стороне, на которой был сформирован слой алюминия для улучшения электрического контакта.

Проведенные измерения без подачи управляющего напряжения в диапазоне напряжений от -2 В до +2 В показали, что в случае электродов Au-Au наблюдается незначительная асимметрия вольт-амперной характеристики (ВАХ). Для тестовой структуры с Ni-Ni электродами на ВАХ наблюдается нелинейность вблизи 0 В. Измерения в триодном режиме при фиксированном напряжении между истоком и стоком в 1 В и подаче напряжения на управляющий электрод в диапазоне от -5 В до +5 В показывают наличие гистерезиса на ВАХ для тока в канале исток-сток, что объясняется наличием ловушек для электронов на стенках УНТ.

В триодных структурах Au/УНТ/Au, изготовленных с применением суспензии ОУНТ с добавлением позитивного фоторезиста s1813 с концентрацией 1 мкг/мл, ВАХ зависимости тока от приложенного напряжения между истоком и стоком при фиксированных значениях управляющего напряжения имеют участок с отрицательным изменением тока при увеличении напряжения в диапазоне от 1 В до 1.5 В. Уменьшение силы тока составляет 13% от максимального значения при постоянном отрицательном напряжении на управляющем электроде (-15В). Величина спада тока зависит от знака и величины приложенного напряжения на управляющем электроде. В случае постоянного положительного напряжения (+15В) на управляющем электроде происходит спрямление ВАХ.

Для подтверждения полученного результата были изготовлены структуры Ni/УНТ/Ni с добавлением в слой УНТ фоторезиста s1813 с концентрацией 1 мкг/мл. Проведенные циклические измерения ВАХ зависимости тока в канале исток-сток от приложенного напряжения (от 0 В до 3,5 В) при фиксированном напряжении на управляющем электроде (-15 В) показывают хорошую повторяемость результатов. При этом на ВАХ наблюдается гистерезис. При увеличении напряжения между истоком и стоком в диапазоне от 1.8 В до 2.7 В наблюдается уменьшение тока на 6%, что подтверждает наличие области отрицательного дифференциального сопротивления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00880).

Влияние высокоэнергетических ионов гелия на свойства n-GaN/GaN/c-Al₂O₃ контактных слоев, выращенных с помощью МПЭ ПА

Гайворонская А. А.¹, Середин П.В.¹, Голощапов Д.Л.¹, Костомаха Д.Е.¹, Пешков Я.А.¹, Буйлов Н.С.¹, Мизеров А.М.², Тимошнев С.Н.², Соболев М.С.², Нащекин А.В.³

¹ВГУ

²СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alisa.a.gaivoronskaya@gmail.com

Благодаря высокой теплопроводности и радиационной стойкости полупроводник GaN является перспективным материалом для использования в космических устройствах. Во время солнечных вспышек производятся большие потоки ионизирующих излучений, среди которых присутствуют тяжелые ионы переменного состава. Основной причиной изменения характеристик полупроводниковых устройств является разупорядочение решетки и различные структурные дефекты. Также важным является местоположение радиационных дефектов (в рабочем слое, на границе раздела или в области металлического контакта). Поэтому было изучено влияние высокоэнергетических ионов гелия He⁺ на структурные, оптические, морфологические и электрофизические свойства образцов.

Исследуемые образцы представляли собой дорасшиваемые методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (МПЭ ПА) контактные слои GaN, n-GaN и p⁺-GaN, сформированные технологией на темплейтах GaN/c-Al₂O₃, которые были предварительно выращены методом газовой фазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) [1]. С использованием установки электроннолучевого напыления металлов Kurt J. Lesker AXXIS на поверхности образцов n-GaN и p⁺-GaN были сформированы омические контакты Ti/Al (20/100 nm). Образцы были облучены ионами гелия с энергией 1,1 МэВ. He⁺ - ионы выбраны в качестве источника радиации из-за высокой химической стабильности, а также ввиду того, что они не вступают в реакцию с облученными материалами. Облучение при помощи электростатического ускорителя Ван-де-Граафа ЭГ-5 и исследования элементного состава структур проводились методом Резерфордского обратного рассеяния проводились в Лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка (ОИЯИ, г. Дубна, РФ).

После облучения He⁺ ионами в зоне воздействия наблюдается изменение морфологии и шероховатости поверхности контактного слоя за счет эффектов распыления материала. При этом регистрируются изменения в электрических свойствах контактных слоев – одновременно с увеличением Холловской концентрации происходит уменьшение подвижности электронов. С использованием методов рентгеновской дифракции и Рамановской микроспектроскопии показано, что несмотря на изменения в кристаллическом состоянии (увеличение концентрации дефектов, возникновение напряжений и структурный беспорядок), кристаллическая решетка буферного слоя GaN не подверглась серьезным

нарушениям. Оптические свойства и дисперсия показателя преломления для буферного слоя GaN носят тот же характер, что и до облучения, лишь незначительно изменяясь по абсолютной величине.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты № FZGU-2023-0006 и № FRSM-2023-0006).

Список литературы

1. Mizerov A.M., On the Specific Features of the Plasma-Assisted MBE Synthesis of n+-GaN Layers on GaN/c-Al₂O₃ Templates, Semiconductors, vol. 53, 1187–1191, 2019

Получение и исследование люминофоров состава Al₂O₃:Ln_xLn_{2-x}O₃ для визуализаторов лазерного ИК-излучения

Денисюк С. В.¹, Куданович О.Н.¹, Мухуров Н.И.¹, Ходин А.А.¹, Лугин В.Г.², Камлюк Т.В.²

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

e-mail: denicuk.sv@gmail.com

Аннотация. Синтезированы люминофоры состава Al₂O₃:Ln_xLn_{2-x}O₃ с использованием модифицированного метода Печини для создания визуализаторов ИК-излучения на основе микроперфорированных матриц из анодного оксида алюминия с диаметрами отверстий от 2 до 20 микрометров. Исследована морфология полученных порошков люминофоров и заполненных матриц.

Визуализаторы ИК-излучения представляют собой компактные устройства для преобразования излучения инфракрасной области спектра в видимый диапазон. Такие устройства используются для первоначальной юстировки, настройки хода лазерного луча и наладки станков лазерной резки и сварки, а также в качестве элемента безопасности при работе с источниками лазерного излучения. Конструкция визуализаторов ИК-излучения включает плоскую матрицу с нанесенным люминофором. В качестве люминофоров наиболее часто используются смешанные соединения на основе оксидов редкоземельных элементов (лантаноидов). В данной работе предлагается использовать в качестве матрицы для люминофора микроперфорированный анодный оксид алюминия толщиной 40 мкм и с диаметрами сквозных отверстий 2, 5, 10 и 20 мкм.

Образцы порошков люминофоров состава Al₂O₃:Ln_xLn_{2-x}O₃ были синтезированы с помощью модифицированного метода Печини. В качестве прекурсоров были использованы оксиды и нитраты лантаноидов Tm₂O₃, Eu₂O₃, Er₂O₃, Ho₂O₃ и Yb(NO₃)₃. Оксиды переводились в нитраты в азотной кислоте. Раствор нитратов алюминия и лантаноидов смешивали с насыщенным раствором лимонной кислоты и этиленгликолем. Реакция этерификации

проводилась в течении 8 часов при температуре 110 °С в присутствии катализатора до образования густого прозрачного геля. Остатки воды удалялись в сушильном шкафу при температуре 120 – 150 °С, после чего образцы отжигались в электропечи сопротивления при температуре 850 °С в течении 3 часов для удаления органических компонентов. Порошки люминофоров переводили в суспензию и осаждали в матрицу из анодного оксида алюминия с последующим отжигом при температуре 860 °С.

Полученные после синтеза люминофоры представляли собой порошок, состоящий из частиц со средним размером около 10 мкм согласно результатам анализа распределения частиц с использованием лазерного анализатора Analizette 22 MicroТес. Уменьшение размеров частиц порошков люминофоров достигалось методом коллоидного (мокрого) измельчения в планетарной мельнице POWTEQ BM6PRO, что позволило получить порошки люминофоров, состоящих из частиц размером порядка 1 мкм. Осаждение люминофора в отверстия матрицы анодного оксида алюминия осуществлялось капельным методом с использованием вакуумного разряжения. Образцы матриц с заполненными микроотверстиями исследовали методами растровой электронной микроскопии с помощью микроскопа JEOL JSM-6510LV. Как показали РЭМ-изображения поверхности матрицы и ее сколов, степень заполнения ее отверстий составляет порядка 90%.

Матрицы анодного оксида алюминия с осажденным люминофором состава $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Er}_{0,25}\text{Yb}_{1,75}\text{O}_3$ демонстрируют люминесценцию в диапазоне длин волн 650 – 750 нм при возбуждении излучением с длиной волны 980 нм.

Визуализаторы лазерного ИК-излучения могут быть получены путем осаждения в микроперфорированные матрицы анодного оксида алюминия люминофоров на основе смешанных оксидов редкоземельных металлов состава $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ln}_x\text{Ln}_{2-x}\text{O}_3$, синтезированных методом Печини.

Локальное селективное травление кремния фокусированным ионным пучком в сочетании с методами жидкостного травления

Коломийцев А. С.¹, Родригес Салазар Д.Х.¹, Милованов А.В.¹, Тарончик А.А.¹, Пяк М.А.¹, Якимов В.А.¹

¹ЮФУ

e-mail: askolomiytsev@sfedu.ru

Развитие современной микроэлектроники в значительной степени определяется процессами литографии, применяемыми при создании приборов. При этом существенным сдерживающим фактором являются высокая стоимость и ограниченная разрешающая способность оптической литографии. Альтернативные методы наноразмерного профилирования поверхности, такие как электронно-лучевая литография, нанопечатная литография или

травление фокусированным ионным пучком хоть и позволяют достичь разрешающей способности в единицы нанометров, но при этом характеризуются низкой производительностью и слабо пригодны для серийного производства. Перспективным направлением, позволяющим частично преодолеть недостатки традиционных и перспективных методов, является их интеграция в рамках одного технологического процесса, когда структуры с размерами от 1 мкм формируются по классической технологии, а наноразмерные и субмикронные элементы – методами локальной обработки. Так, сочетание локальной обработки кремния фокусированным ионным пучком и его жидкостного травления в растворе КОН позволяет не только управлять селективностью процесса [1], но и формировать наноразмерные объёмные структуры, которым могут применяться, например, в микромеханике или сенсорике [2]. Такой процесс хорошо совместим с МЭМС-технологией поверхностной микрообработки.

В ходе данной работы были проведены исследования, направленные на определение закономерностей анизотропного жидкостного травления кремния с ориентацией (100), поверхность которого была предварительно обработана фокусированным ионным пучком (ФИП) галлия с энергией от 5 до 30 кэВ и диаметром от 7 нм. При взаимодействии ФИП с кремнием происходит имплантация ионов в кремний, сопровождающаяся физическим распылением поверхности и возникновением разупорядоченной (аморфизированной) области в приповерхностном слое кристалла.

Помимо существенного влияния кристаллографической ориентации кремния на процесс жидкостного травления в 25% растворе КОН, которое хорошо описано в литературе [1], появление аморфизированных областей со значительной концентрацией имплантированного галлия существенно замедляет процесс травления, вплоть до полной остановки. Такие области могут рассматриваться как маскирующие слои для жидкостного травления в КОН, а их конфигурация (как топология, так и глубина аморфизированной области) будет определять профиль трехмерной структуры после травления.

Для оценки глубины аморфизированного слоя в кремнии, возникающего при бомбардировке ионами галлия, было проведено стохастическое моделирование на основе алгоритмов Монте-Карло. Было установлено, что глубина проникновения ионов галлия в кремний варьируется от 16 нм при энергии ионного пучка 5 кэВ до 55 нм при энергии 30 кэВ. Очевидно, что глубина проникновения ионов коррелирует с толщиной аморфизированной области, а соответственно с профилем маскирующего слоя на поверхности кремния.

Экспериментальные исследования, в которых образец кремния обрабатывался сперва ФИП галлия с энергией 10 кэВ, 20 кэВ и 30 кэВ по шаблонам, представляющим собой массивы прямоугольников с размерами от 5х5 мкм до 1х1 мкм, находящихся на расстоянии 5 мкм друг от друга, а затем в течение 50 сек в растворе 25% КОН при температуре 80°C, показали что обработанные области выполняют роль маскирующего покрытия, не деформируются в процессе травления и сохраняют прямоугольную форму даже при значительном подтраве под маской от 15% от ширины для прямоугольников размером 5х5 мкм до 89% для прямоугольников 1х1 мкм.

Таким образом, был обнаружен и исследован эффект, расширяющий возможности традиционной литографии, который может быть практически использован при разработке технологических процессов изготовления МЭМС-сенсоров, элементов микрофлюидики или микроэлектронных датчиков деформаций.

Список литературы

1. Gosálvez M.A., Zubel I., Viinikka E. Wet Etching of Silicon, Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies: Second Edition, Elsevier Inc., 470–502, 2015.
2. Villarroya M. et al. Fabrication of nanogaps for MEMS prototyping using focused ion beam as a lithographic tool and reactive ion etching pattern transfer, Microelectron Eng., Vol. 84, № 5–8, 1215–1218, 2007.

Проводимость и магнитосопротивление многонамослойных плёнок $[(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2)+\text{ZnO}]_{50}$ на ситалловой подложке в интервале температур 20–400 К и в магнитных полях 0–9 Тл

Котов Л. Н.¹, Уткин А. А.¹, Заговорич А. Д.¹, Ситников А. В.², Калинин Ю. Е.²

¹ Сыктывкарский государственный университет

² Воронежский государственный технический университет

e-mail: kotovln@mail.ru

Интенсивное развитие искусственного интеллекта в последнее время выдвигает определенные требования к разработке новой электронной компонентной базы. В этой связи одним из перспективных научных объектов исследования являются многослойные структуры и плёнки, в которых обнаружены эффекты значительного изменения сопротивления под действием магнитного и электрического полей [1]. Многослойные плёнки: магнитный композит-диэлектрик демонстрируют уникальные магнитные и проводящие свойства, что делает их перспективными для применения в спинтронике, сенсорах магнитного поля и энергоэффективных электронных устройствах [2]. Одним из ключевых вопросов, требующих детального изучения, является влияние температуры и магнитного поля на проводимость и магнитосопротивление многослойных плёнок, а также выявление механизмов, определяющих изменение магнитного упорядочения и электрических характеристик.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований проводимости и магнитосопротивления (МС) многослойных плёнок состава $[(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2)+\text{ZnO}]_{50}$ на ситалловой подложке в интервале температур 20–400 К и магнитных полей 0–9 Тл. Количество парных слоёв композита и диэлектрика составляло 50, а толщина нанослоев была равна 2–4 нм. В композитных нанослоях плёнки изменялась концентрация x металлического сплава CoFeB в интервале 0.35–0.82. Многослойные плёнки на ситалловой подложке были получены методом ионно-лучевым напыления в атмосфере аргона [2, 3]. Эксперименты по исследованию температурных и магнито-

полевых зависимостей электрического сопротивления многослойных плёнок на ситалловых подложках были проведены в Центре диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и нанoeлектроники Научного парка СПбГУ. Во всех экспериментах магнитное поле было направлено перпендикулярно плоскости плёнки.

Результаты проведённых экспериментов показали, что для всех многослойных плёнок наблюдается экспоненциальное уменьшение электрического сопротивления на 2-4 порядка с ростом температуры в интервале 20-400 К при разных магнитных полях из интервала 0-9 Тл. Наибольшее изменение сопротивления наблюдалось для многослойных плёнок с концентрацией $x=0.72$. Для плёнок с разными x наблюдается экспоненциальное уменьшение сопротивления с ростом индукции магнитного поля от 0 до 9 Тл при разных температурах из интервала 20-400 К. Для многослойной плёнки с $x=0.72$ наблюдался осцилляционный характер уменьшения сопротивления с ростом магнитного поля от 0 до 1.2 Тл при 300 К. Для большинства многослойных плёнок с разными x наблюдалось отрицательное магнитосопротивление (МС) во всём исследованном интервале температур при магнитных полях с индукцией $B = 0 - 9$ Тл. Величина относительного отрицательного МС для большинства плёнок уменьшается от -0.1 до -0.02 при увеличении температуры от 20 до 400 К. Резкое уменьшение отрицательного МС наблюдается при низких температурах 25-150 К. Наибольшая величина отрицательного МС равного -0.22, наблюдается для плёнки с концентрацией металлического сплава $x = 0.72$ в композитных слоях. Для плёнки с $x=0.72$ при магнитном поле 3Тл наблюдается широкий температурный максимум положительного МС при $T=80$ К, относительная величина которого на максимуме достигает 4. Для этой же плёнки, но при магнитном поле $B=1$ Тл, наблюдается отрицательное МС, равное -0.23, которое уменьшается до -0.1 в интервале температур 20-400 К. Таким образом, в данной работе были выявлены концентрации металлического сплава $x=0.70$ для многослойных плёнок $[(CoFeB+SiO_2)+ZnO]_{50}$, которые обладают максимальной величиной отрицательного (около -0.23) и положительного (до +4) магнитосопротивления. Эти многослойные плёнки с концентрацией $x=0.70$ на ситалловой подложке могут стать хорошими кандидатами для изготовления биосенсоров и датчиков электромагнитного поля.

Исследования были выполнены за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 21-72-20048

Список литературы

1. W. Huang, X. Xia, C. Zhu, P. Steichen, W. Quan, W. Mao, J. Yang, L. Chu, X. Li. Nano-Micro Lett., 13, 85 (2021). DOI: 10.1007/s40820-021-00618-2
2. Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, В.А. Макагонов, В.А. Фошин, М.Н. Волочаев. Прыжковая проводимость в многослойных наноструктурах $\{[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{34}(SiO_2)_{66}]/[ZnO]\}_n$ // Физика твердого тела, 2024, том 66, вып. 11. С.1941-1949. DOI: 10.61011/FTT.2024.11.59331.305
3. Котов Л.Н., Уткин А.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика, 15(4), 85-92 (2023).

Минимальный «якорь» в графеновом биосенсоре

Смирнов А. Н.¹, Плеханов А.Ю.², Пузык М.В.³, Воробьев С.В.^{1,4}, Усиков А.С.⁵,
Росенков А.Д.⁵, Лебедев С.П.¹, Лебедев А.А.¹, Шмидт Н.М.¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе

² НИИ гриппа им. А.А. Смородинцева

³ РГПУ им. А.И. Герцена

⁴ НМИЦ им. В.А. Алмазова

⁵ ООО ГНК

e-mail: smirnov_san@mail.ru

Биосенсоры на основе графена отличаются высокой чувствительностью и скоростью срабатывания при потенциально невысокой стоимости. При создании графенового биосенсора, на графене закрепляют специфические антитела, которые и распознают искомые биологические молекулы, позволяющие диагностировать заболевание.

Сам по себе графен за счёт гидрофобных взаимодействий способен адсорбировать относительно малое количество антител, и отклик биосенсора на основе исходного графена невелик: максимальное изменение величины относительного сопротивления сенсора, как правило, составляет не более 1–2%. Для закрепления на графене большего количества антител графен функционализируют молекулами, способными связать антитела ковалентно. Однако при этом отклик биосенсоров если и повышается, то незначительно. Отчасти такой парадокс можно объяснить тем, что используемые «якорные» молекулы имеют длину от четырех до шести углеродных атомов, что возвышает «заякоренное» (прикрепленное) антитело над слоем графена, и реакция антитела с антигеном происходит вне электронного облака графенового монослоя (тогда как без функционализации антитело сорбируется непосредственно на графене).

В настоящей работе слои графена были функционализированы плоскими молекулами флуоресцеина. Далее на карбоксигруппе флуоресцеина при помощи карбодимида напрямую закрепили антитело против бета-амилоида – маркера болезни Альцгеймера. Таким образом, длина «якоря» в нашем эксперименте была минимально возможной – один углеродный атом.

Исследования показали, что при минимализации длины «якоря» и, следовательно, при приближении антитела к поверхности графена типичный отклик биосенсора на бета-амилоид заметно изменяется: область более резкого изменения сопротивления графена увеличивается и смещается в зону больших, более физиологических концентраций аналита. Это важно для более точного определения концентрации бета-амилоида в крови и, следовательно, диагностики болезни Альцгеймера.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФ.

Спектральные исследования мультиэлементных высокоэнтропийных танталатов/ниобатов висмута со структурой пироклора, допированных атомами 3d-металлов

Некипелов С. В.^{1,2}, Жук Н.А.², Сивков В.Н.¹

¹ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ²Сыктывкарский государственный университет

e-mail: NekipelovSV@mail.ru

Мультиэлементные высокоэнтропийные пироклоры в зависимости от химического состава перспективны в качестве диэлектриков, смешанных и ионных проводников, фотокатализаторов процессов окисления. В частности, синтетические оксидные пироклоры на основе танталата/ниобата висмута обладают высокой диэлектрической проницаемостью и низкими диэлектрическими потерями, что делает их перспективным материалом для использования в многослойных керамических конденсаторах и перестраиваемых СВЧ-диэлектрических компонентах. При этом их физико-химические свойства существенно меняются при допировании 3d-атомами, в особенности при мультиэлементном допировании. Общий состав таких соединений выражается формулой $\text{Bi}_2\text{M}_x\text{Ta}(\text{Nb})_{2-x}\text{O}_{9\pm\delta}$, где в качестве допанта М используется все возможные комбинации от двух до шести атомов переходных 3d-элементов (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu) в эквимольных соотношениях.

В представленной работе рассматриваются спектральные исследования, впервые синтезированных по стандартной керамической технологии высокоэнтропийных кубических пироклоров $\text{Bi}_2\text{Cu}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}(\text{Nb/Ta})_2\text{O}_{9\pm\delta}$. Химическое состояние катионов переходных элементов в оксидных пироклорах охарактеризовано методом рентгеновской фотоэлектронной (XPS) и абсорбционной (NEXAFS) спектроскопии. XPS-спектры Nb 3d и Ta 4f синтезированных пироклоров демонстрируют характерный сдвиг в сторону меньших энергий на 0,65 эВ, что свидетельствует о том, что эффективный заряд катионов ниобия и тантала составляет +(5-δ). Сдвиг XPS-спектров Bi 4f на 0,25 эВ характерен только для ниобиевого пироклора. Показано, что NEXAFS Cu2p-спектры оксидной керамики по основным характеристикам спектра представляют собой суперпозицию спектров от катионов Cu(I) и Cu(II). На основе анализа относительной интенсивности пиков в XPS Cu2p-спектре для пироклоров оценено содержание катионов Cu(I,II). Соотношение катионов Cu(I) к Cu(II) в пироклоре ниобия выше, чем в пироклоре тантала, при этом катионов Cu(I)

примерно в два раза больше, чем Cu(II). Исследования рентгеновской спектроскопии показывают, что катионы Co и Ni присутствуют в валентном состоянии (II, III).

Исследование выполнено в рамках г/б темы 1022041400023-7-1.3.2.

Анализ чернил рукописи XV века методом спектроскопии комбинационного рассеяния

Деркачева О. Ю.^{1,3}, Неелова А.Д.^{1,2}, Лоцманова Е.М.¹, Быстрова Е.С.¹

¹Российская национальная библиотека,

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

³СПбГУПТД

e-mail: derkachevaou@rambler.ru

Разнообразные методы спектроскопии применяются при исследовании объектов культурно-исторического наследия. Повышенный интерес к спектральным методам связан с возможностью анализа материалов без деструктивного воздействия на их структуру. В настоящей работе метод спектроскопии комбинационного рассеяния (СКР) был применен при исследовании модельных железистых чернил и чернил древнерусского рукописного кодекса XV века из фондов ОР РНБ.

Запись КР-спектров образцов чернила осуществлялась с помощью Раман-микроскопа SOL instruments (Беларусь). Для возбуждения КРС использовался твердотельный лазер с длиной волны 785 нм. Из-за требований неразрушающего воздействия на материалы рукописи мощность лазера на образце чернил была около 1 мВт. При записи КР-спектров использовали объектив с 40-кратным увеличением. Время накопления однократного спектра составляло 10 секунд, число повторений составляло 5. КР-спектры были записаны с решеткой 600 штр/мм в диапазоне 100-1740 см⁻¹. В этом диапазоне частот проявляются основные полосы колебаний железистых чернил в спектрах комбинационного рассеяния. Для каждой страницы рукописи измерение чернил осуществлялось в нескольких местах как одной буквы, так и разных букв. КР-спектры модельных чернил, нанесенных на бумагу, также измерялись в нескольких местах.

Чернила рукописи XV века на шести страницах были исследованы с помощью метода комбинационного рассеяния света. КР-спектры образцов чернил данной рукописи показали присутствие следующих полос: около 1570, 1485, 1400, 1340, 1290 (узкая), 1180, 950, 705 (узкая), 645 (узкая) см⁻¹, составная в диапазоне 680-500 см⁻¹, около 400 и 230 см⁻¹. Несмотря на близость КР-спектров чернил рукописи, наблюдались и различия в относительной интенсивности основных полос и ряда слабых полос.

Для понимания и интерпретации молекулярных спектров чернил рукописи были измерены КР-спектры модельных чернил. Модельные чернила – чернила, изготовленные по древним рецептам и имеющие различные компоненты в своем составе [1]. Образцы

чернил были изготовлены на основе экстрактов танинов, выделенных из настоя галловых орешков и отвара коры ольховой. Для получения комплексов полифенолов с железом были использованы ржавое железо и/или железный купорос. В качестве связующего была добавлена вишневая камедь. Кроме перечисленных веществ также добавлялись другие компоненты, имеющиеся в рецептах древнерусских чернил. Отметим, что наиболее близко по набору полос и относительным интенсивностям к спектрам чернил рукописи были реплицированные чернила, изготовленные на основе танинов галловых орешков [2]. В литературе [3] имеется интерпретация ряда полос, в соответствии с которой полосы в области около 1570 и 1480 см^{-1} относятся к плоскостным колебаниям связей $\text{C}=\text{C}$ в бензольном кольце, полоса около 1330 см^{-1} связана с деформационными колебаниями CH -групп и валентными колебаниями связи $\text{C}-\text{O}$, полосы при 560 и 400 см^{-1} формируются в результате валентных колебаний связей $\text{Fe}-\text{O}$ в комплексах железа с танинами.

Результаты исследования позволяют сделать предположение о типе чернил древнерусского рукописного кодекса XV века.

Список литературы

1. Быстрова Е.С., Лоцманова Е.М., Ляховицкий Е.А., Сирро С.В. Комплексная оценка свойств железистых чернил на материале реплицированных образцов // Российские нанотехнологии, 2023 – 18(5) - с. 711-720.
2. Derkacheva O.Yu., Lotsmanova E.M., Bystrova E.S. Micro-Raman Spectroscopy of Replicated Iron Ink // Nanobiotechnology Reports, 2024 – 19(4) - с. 509–516.
3. Lee A.S., Mahon P.J., Creagh D.C. Raman analysis of iron-gall inks on parchment // Vibrational Spectroscopy, 2006 – 41 -с. 170-175.

Фотолюминесценция квантовых точек PbS в матрице неорганического стекла при возбуждении светодиодами: спектры и квантовый выход

Иванов А. Е.¹, А.В. Аладов¹, А.Л. Закгейм¹, А.А. Онущенко², А.Е. Черняков¹, М.З. Шварц³

¹ НТЦ микроэлектроники РАН

² АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

³ ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: a-e-ivano-v@yandex.ru

Оптические свойства полупроводниковых нанокристаллов, линейные размеры которых сравнимы с боровским радиусом экситона –квантовые точки (КТ), делают их перспективными для применения в светодиодах (СД), лазерных диодах (ЛД), солнечных батареях, дисплеях [1]. Благодаря широкому спектру поглощения, ограниченному в УФ области краем поглощения матричного стекла, фотолюминесценция КТ на основе PbS может быть возбуждена высокоэффективными СД в диапазоне длин волн 400-800 нм [2]. В этом случае возможна реализация конструктивно простого, компактного источника ближнего ИК-

излучения (1000-2000 нм). Эффективность работы такого излучателя в значительной степени определяется квантовым выходом фотолюминесценции (КВФ) PbS КТ, оценка которого и являлась задачей данной работы.

Измерение КВФ связано с трудностями корректного отдельного измерения полной мощности, поглощенного КТ возбуждающего света, и полной мощности фотолюминесценции КТ, лежащих в различных спектральных диапазонах (видимый и ИК) с последующим пересчетом в число квантов в соответствии с формой спектров в энергетических единицах.

Образцы стекол с PbS КТ изготавливались с использованием традиционной методики выращивания частиц кристаллической фазы в объеме стеклообразной матрицы в процессе диффузионного фазового распада пересыщенных твердых растворов [3]. Состав и процедура синтеза натриево-силикатных стекол с добавками оксида свинца и серы, также как и температурно-временные режимы выделения кристаллических частиц сульфида свинца в объеме стеклообразной матрицы, описаны в [4]. Образец, исследованный в настоящей работе, характеризуется сравнительно небольшой дисперсией КТ по размерам (стандартное отклонение $\Delta D/D$ в пределах 5-7 %). Средний размер выращенных КТ оценивался по положению максимума экситонной линии поглощения с использованием калибровочной кривой $E_{max} = f(D)$, полученной путем аппроксимации большого массива данных структурной характеристики стекол с PbS КТ методом малоуглового рентгеновского рассеяния [5].

Измерения спектров поглощения PbS КТ в стекле в диапазоне 400-800 нм проводились в установке OL770 LED Test and Measurement System (Optronic Lab, США), позволяющей оценить спектральную зависимость коэффициента поглощения в видимом диапазоне и полную (абсолютную) поглощенную мощность возбуждения от СД.

Измерения эффективности процесса фотолюминесценции (down conversion) проводилось в фотометрической сфере UPB-150-ART (Gigahertz-Optik, Германия). Исследуемый образец размерами 12 x 12 x 2.15 мм помещался в центр интегральной сферы перпендикулярно потоку коллимированного лазерного излучения (ЛИ) 460 нм вводимого через 0-градусный порт. Расходимость ЛИ обеспечивала прохождение луча к выходному (противоположному, 180-градусному) порту сферы, на который устанавливался термоэлектрический измеритель мощности XLP12-3S (Gentec Electro-Optics Inc.). К 90-градусному порту сферы по оптоволоконному кабелю подключался спектрорадиометр CAS-140 (Instrument systems, Германия) с оптически независимыми модулями UV-VIS (250-820 нм) и IR (780-1650 нм). Спектрорадиометр обеспечивал регистрацию спектра излучения и мощности в относительных единицах. Важным преимуществом такого спектрорадиометра при решении обсуждаемой экспериментальной задачи являлась оптическая независимость UV-VIS и IR модулей при регистрации параметров исходного ЛИ (460 нм) и люминесцентного излучения, инициируемого в образце. Это позволило оценивать уровень фотолюминесцентного излучения без влияния фонового излучения, возникающего в сфере при рассеянии и отражении образцом возбуждающего ЛИ.

Спектр поглощения имеет максимум первой полосы поглощения на $\lambda = 1040$ нм, а далее коэффициент поглощения монотонно возрастает при смещении в сторону коротких длин волн, достигая значений $\sim 30 \text{ см}^{-1}$ при 400-500 нм. Спектр люминесценции имеет максимум на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 1170$ нм, и ширину на половине максимума $\Delta\lambda_{0.5} \approx 170$ нм.

Расчет КВФ η производился на основе измерений поглощенной Φ_{abs} переизлученной мощности люминесценции и вычисления количества квантов, исходя из их средней энергии по спектру:

$$\eta = \frac{N_{\text{lum}}}{N_{\text{abs}}} = \frac{\Phi_{\text{lum}} / h\nu_{\text{lum}}}{\Phi_{\text{abs}} / h\nu_{\text{abs}}}$$

В эксперименте число поглощенных квантов света возбуждения от ЛИ с $\lambda = 460$ нм составило $2,73 \cdot 10^{17}$, число квантов фотолюминесценции $5,37 \cdot 10^{16}$. Полученную величину КВФ $\eta \gg 20\%$ следует считать приемлемой для практического применения с перспективой увеличения при развитии технологии PbS КТ в стеклах.

Список литературы

1. Efros A.L., Brus L.E. Nanocrystal Quantum Dots: From Discovery to Modern Development. // ACS Nano – 2021 – Т. 15(4) – С. 6192-210.
2. Na Han et al. Infrared photoluminescence from lead sulfide quantum dots in glasses enriched in sulfur. // Journal of Non-Crystalline Solids – 2014 – Т. 391 – С. 39-42.
3. Голубков В.В., Екимов А.И., Онущенко А.А., Цехомский В.А. Кинетика роста микрокристаллов CuCl в стеклообразной матрице. // Физика и химия стекла – 1981 – Т. 7(4) – С. 397-401.
4. Алексеева И.П., Атонен О.В., Голубков В.В., Онущенко А.А., Раабен Э.Л. Кинетические закономерности выделения нанокристаллов PbS в натриевосиликатном стекле. // Физ. и хим. Стекла – 2007 – Т. 33(1) – С. 3-11.
5. Poddubny A.N. et al. Role of Valley Anisotropy in Optical Absorption of Monodisperse PbS Nanocrystals. // J. Phys. Chem. C – 2017 – Т. 121 – С. 27766-73.

Лазерная абляция при создании тонких пленок гидроксиапатита

Дудник Ю. Д.¹, Васильев М.И.¹, Сафронов А.А.¹, Ширяев В.Н.¹, Васильева О.Б.¹

¹Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

e-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

Гидроксиапатит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ (далее — ГА) является перспективным материалом, так как является основным химическим компонентом костной ткани (70%). ГА широко может использоваться в качестве покрытия для стоматологических и ортопедических металлических имплантатов. В этой работе исследовались условия нанесения покрытия ГА на подложки Ti-6Al-4V путем лазерной абляции мишеней из ГА с помощью эксимерного лазера KrF. Осаждение проводилось в вакуумной камере при температуре окружающей

среды, при различных рабочих давлениях, которые варьировались от 10^{-4} до 10^{-1} Торр кислорода. Осажденные пленки были аморфными. Их отжигали при 290–310 °С на окружающем воздухе с целью восстановления кристаллической структуры ГА.

Морфология, состав и структура покрытий были подтверждены методами сканирующей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгеновской дифракции. Механические и адгезионные свойства были исследованы с помощью наноиндентирования и царапания соответственно. Стабильность покрытий ГА была проверена в имитируемых физиологических условиях.

В процессе абляции осуществлена запись спектров излучения плазменного факела двумя быстрыми спектрометрами высокого разрешения (HR 2000+, Ocean Optics Inc.) в диапазонах 268 — 486 нм и 472 — 674 нм со спектральным разрешением 0.08 нм и различным временем интегрирования. По результатам рассмотрения линий излучения Ca II 393.366 и 373.690 нм ($3p^64s-3p^64p$; $3p^64p-3p^65s$), а также линий 396.847 и 370.603 нм ($3p^64s-3p^64p$; $3p^64p-3p^65s$) определена электронная температура плазмы. Наблюдались линии Ca I 422.673 нм $3p^64s^2-3p^64s4p$; Ca I 487.813 нм $3p^63d4s-3p^64s4f$; Ca I 504.162 нм $3p^63d4s-3p^64s6p$; Ca I 526.171; 526.224; 526.424; 526.556; 527.027; 534.947 нм $3p^63d4s-3p^63d4p$; Ca I 558.197; 558.876; 559.012; 559.447; 559.849; 560.129; 560.285 нм $3p^63d4s-3p^63d4p$; Ca I 551.298; 585.745 нм; $3p^64s4p-3p^64p^2$; Ca I 610.272; 612.222; 616.217 нм $3p^64s4p-3p^64s5s$; Ca II 370.603 и 373.690 нм $3p^64p-3p^65s$.

Записаны цветные изображения лазерной абляции эксимерным лазером KrF мишеней ГА с помощью цифровой камеры Nikon D80. Проведена обработка полученных изображений в трех основных цветах RGB. Совместное рассмотрение спектров лазерной абляции и результатов обработки изображений плазменного факела подтверждают наличие пространственных областей грибовидной формы с повышенным излучением в красной области спектра и отсутствие таких областей в изображениях в синей части.

Рассмотрены гидродинамические уравнения Эйлера [1], выражающие сохранение плотности массы, импульса и энергии плазмы при расширении в вакууме в одномерном случае и с учетом влияния фонового газа для бинарной смеси (пары Ca и O₂). Свойства решений этих уравнений проиллюстрированы на RGB изображениях.

Это исследование показывает, что сочетание импульсного лазерного осаждения и отжига после осаждения при температуре 300 °С может обеспечить получение чистых, адгезионных, кристаллических покрытий ГА, которые не растворяются в имитируемой жидкости организма.

Список литературы

1. Z. Liu, Y. Tian, Y. Lu, J. Guo, Y. Li, W. Ye, R. Zheng. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **180** 106202, (2021) <https://doi.org/10.1016/j.sab.2021.106202>

Теоретический анализ дифракционного условия резонансной вудовской аномалии в оптических спектрах отражения и пропускания латеральных периодических структур

Воронов М. М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mikle.voronov@gmail.com

В последние годы в физике твердого тела большое внимание уделяется изучению эффектов возникающих благодаря наличию отдельного приповерхностного слоя многокомпонентных микро- и наноструктур, в частности, оптических резонансов, которые обусловлены периодичностью латеральной структуры, образующей квазиволноводный слой; при этом материал структуры может проявлять внутренние возбуждения, такие, например, как плазмоны. В результате, взаимодействие падающего излучения с материалом такой структуры приводит к большой величине интенсивности отраженного излучения в окрестности некоторой резонансной частоты, которая в отдельных случаях может быть приближенно найдена с помощью формулы выражающей соответствующее условие дифракции. Наиболее известными примерами такого рода оптических резонансов являются аномалии Рэлея-Вуда [1,2], резонансные вудовские аномалии (РВА) [1,2] и поверхностные плазмон-поляритонные резонансы [3], которые проявляются в оптических спектрах отражения в виде плавных горбов или острых пиков, положение и форма которых зависит как от угла падения и спектра падающего излучения так и от пространственной конфигурации структуры и диэлектрической проницаемости материалов из которых она состоит. Происхождение РВА связано с квазиволноводной модой, формирующейся преимущественно в приповерхностном слое.

В отличие от одномерной периодической структуры, в случае двух- и трехмерных периодических структур, как правило, не удастся получить точных аналитических выражений пригодных для формального анализа и поэтому при теоретическом описании приходится прибегать к введению эффективных параметров. Подобный подход, использующий эффективные параметры квазиволноводной моды, позволяет сформулировать дифракционное условие для резонансной вудовской аномалии, проявляющейся в оптических спектрах латеральных периодических диэлектрических структур [4]. В данном дифракционном условии учитывается единственный вектор дифракции (вектор обратной решетки) латеральной структуры, а также используются эффективные показатель преломления и поперечная компонента волнового вектора света в квазиволноводном слое, которые считаются постоянными и принимающими значения примерно равные их значениям на частоте света отвечающей пику вудовской аномалии. Данный подход был опробован на гибридной структуре на основе опала в эксперименте [4] и с помощью численного моделирования [5], где также теоретически исследовалась форма спектров отражения РВА, имеющих интерференционное происхождение.

В представленной работе развитие этой теории проводится в нескольких направлениях. Во-первых, проводится детальное сравнение данного подхода с хорошо известным методом численного расчета на основе матрицы рассеяния для одиночного плоского слоя [6]. Во-вторых, проводится анализ дифракционного условия РВА, позволяющий выяснить в каких случаях падающее на структуру излучение попадает в одну и ту же моду при разных углах падения и проводится сравнение этой ситуации со случаем когда на одной и той же резонансной частоте реализуется несколько квазиволноводных мод. Такой анализ, в принципе, позволяет выявить многие интересные ситуации в отношении дифракционной направленности отраженного излучения, возможные в случае различных латеральных периодических структур, которые для этого могут быть подобраны с помощью численного моделирования и затем изготовлены. В-третьих, учитывается частотная дисперсия поперечной компоненты волнового вектора света в квазиволноводном слое, характерная для латеральных периодических структур, а также объясняется связанный с ней экспериментально наблюдаемый эффект возникновения семейства РВА, проявляющийся в виде набора параллельно смещенных спектральных угловых зависимостей. В-четвертых, на основе формулы Друде-Лоренца учитываются плазменные возбуждения, возможные в латеральных периодических структурах с металлическими компонентами. Поскольку для формирования квазиволноводной моды достаточно всего несколько периодов структуры, то можно ожидать, что большая величина коэффициента поглощения света не сильно скажется на спектральном положении пика РВА, рассчитанном по полученной в данной работе формуле. Также, проводится формальное сравнение спектральных угловых зависимостей для РВА и поверхностных плазмон-поляритонных резонансов, позволяющее определить происхождение пиков в оптических спектрах отражения от таких структур.

Список литературы

2. A. Hessel and A.A. Oliner, A New Theory of Wood's Anomalies on Optical Gratings, Appl. Opt. 4, 1275 (1965).
3. D. Maestre, Theory of Wood's Anomalies, Ch. 2, (Springer Series in Optical Sciences), v. 167 (2012).
4. H. F. Ghaemi, T. Thio, D. E. Grupp et al, Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes, Phys. Rev. B 58, 6779 (1998).
5. M. M. Voronov, A. B. Pevtsov, S. A. Yakovlev et al, Diffraction anomalies in hybrid structures based on chalcogenide Ge₂Sb₂Te₅-coated opal photonic crystals, Phys. Rev. B 89, 045302 (2014).
6. S. A. Dyakov, N. A. Gippius, M. M. Voronov et al, Quasiguided modes of opaline photonic crystals covered by Ge₂Sb₂Te₅, Phys. Rev. B 96, 045426 (2017).
7. S. G. Tikhodeev, A. L. Yablonskii, E. A. Muljarov et al, Quasiguided modes and optical properties of photonic crystal slabs, Phys. Rev. B 66, 045102 (2002).

Энергетическая структура низших возбужденных состояний и дипольные моменты оптических переходов в бихромофорах в полярной среде

Антипов И.Ф.¹, Феськов С.В.¹, Иванов А.И.¹

¹ВолГУ

e-mail: antipov.ivan.f@gmail.com

Явления фотоиндуцированного внутримолекулярного переноса энергии и электрона лежат в основе механизмов преобразования солнечной энергии как в природных фотосистемах, так и в синтетических фотовольтаических устройствах [1-3]. Одним из перспективных материалов для таких устройств являются органические бихромофоры – молекулярные соединения, включающие в себя два светопоглощающих центра и демонстрирующие высокую эффективность фотохимического разделения зарядов [4-5]. Природным аналогом этих соединений является димер бактериохлорофилла, входящий в состав реакционных центров растений и бактерий и выступающий в качестве первичного донора электрона в цепочке фотоиндуцированных реакций [1-2].

Экспериментальные исследования фотопроцессов в бихромофорах традиционно основаны на использовании методов фемто- и пикосекундной лазерной спектроскопии [3-5]. Эти методы позволяют регистрировать динамику сверхбыстрых химических превращений и энергетику исследуемых систем, однако детальный анализ спектроскопических данных в большинстве случаев возможен только в рамках определенных моделей [6]. Данное исследование посвящено разработке теоретических подходов к описанию спектральных профилей поглощения бихромофора в полярном растворителе и интерпретации результатов соответствующих экспериментов. Применяемый подход основан на использовании функционала свободной энергии для системы «бихромофор + внешняя среда» [7], для описания взаимодействия молекулы с окружением используется приближение линейного отклика.

В работе проанализированы механизмы формирования спектрального профиля поглощения димера, влияние на него межхромоморфных взаимодействий, ответственных за перенос энергии и заряда. Показана ключевая роль цвиттерионных состояний молекулы в уширении спектра. Проанализировано влияние геометрических характеристик агрегата, в частности, взаимной ориентации компонентов димера, на положение центра масс спектра поглощения, интенсивность отдельных полос и их ширину. Показано, что в отсутствие механизмов внутримолекулярного переноса заряда разработанная модель воспроизводит результаты классической теории Каша, в которой спектральный профиль димера состоит из двух узких полос, соответствующих оптическим переходам в нижнее и верхнее экситонные (френкелевские) состояния.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 22-13-00180).

Список литературы

1. Machin A. et al. Artificial photosynthesis: current advancements and future prospects // Biomimetics. 2023, V. 8, №. 3, P. 298.
2. Cherepanov D.A. et al. Current state of the primary charge separation mechanism in photosystem I of cyanobacteria // Biophys. Rev. 2022, V. 14, №. 4, P. 805-820.
3. Zinth W., Wachtveitl J. The first picoseconds in bacterial photosynthesis - ultrafast electron transfer for the efficient conversion of light energy // ChemPhysChem. 2005, V. 6, №. 5, P. 871-880.
4. Alzola J. M. et al. Symmetry-breaking charge separation in phenylene-bridged perylenediimide dimers // J. Phys. Chem. A. 2021, V. 125, P. 7633-7643.
5. Young R. M., Wasielewski M.R. Mixed electronic states in molecular dimers: connecting singlet fission, excimer formation, and symmetry-breaking charge transfer // Acc. Chem. Res. 2020, V. 53, №. 9, P. 1957-1968.
6. Bialas A. L., Spano F. C. A Holstein–Peierls approach to excimer spectra: the evolution from vibronically structured to unstructured emission // J. Phys. Chem. C. 2022, V. 126, № 8, P. 4067-4081.
7. Antipov I. F., Ivanov A. I. Minimal model of excited-state symmetry breaking in symmetric dimers and covalently linked dyads // J. Chem. Phys. 2022, V. 157, 224104.

Поглощение и рассеяние ультракоротких лазерных импульсов в среде: описание с учетом эффектов распространения

Астапенко В. А.¹

¹МФТИ

Теоретически исследуются характеристические особенности поглощения и рассеяния ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) в оптически плотной среде с учетом их распространения и отражения от границы раздела. Описание проводится с помощью полного безразмерного коэффициента поглощения/рассеяния УКИ в слое однородного вещества за все время действия импульса на примере поглощения УКИ в твердых телах и резонансного рассеяния в плотной горячей плазме.

Получено универсальное выражение для полного коэффициента поглощения импульса излучения (ПКП) в слое однородного вещества в терминах комплексного показателя преломления среды с учетом отражения от границы среды [1]. Проанализированы различные предельные случаи этого выражения: для оптически толстого/тонкого слоя среды и для квазимонохроматического импульса.

С помощью полученного выражения рассчитаны и проанализированы зависимости ПКП от длительности и несущей частоты импульса для межзонного поглощения УКИ в слое GaAs различной толщины [2]. В частности, показано, что при несущих частотах больших частоты межзонного перехода ПКП как функция длительности импульса (τ) имеет минимум в субфемтосекундном диапазоне длительности импульса.

С помощью выражения для ПКП рассчитано и проанализировано возбуждение поперечных оптических фононов в слое GaAs различной толщины импульсами терагерцового излучения пикосекундной длительности для несущих частот внутри и вне фотонной запрещенной зоны. В частности, показано, что для УКИ с несущей частотой внутри фотонной запрещенной зоны зависимость ПКП от длительности импульса имеет максимум, положение которого смещается в область меньших длительностей с увеличением толщины образца GaAs.

Рассмотрено резонансное рассеяние ультракоротких рентгеновских импульсов в оптически плотной горячей плазме [3]. Получено выражение для полного коэффициента рассеяния (ПКР) через сечения рассеяния и экстинкции, а также оптическую толщину плазменного слоя, которое учитывает одновременное влияние на процесс рассеяния длительности УКИ и проникновения импульса в оптически плотную плазму. Проанализированы предельные случаи полученного выражения для оптически тонкой и оптически толстой плазмы.

Расчет зависимостей ПКР от параметров импульса и оптической толщины плазменного слоя проведен для типичных значений параметров горячей плазмы, характерных для экспериментов «накачки-зондирования». Рассматривалось резонансное рассеяние УКИ с гауссовской огибающей на переходе $1s-2p$ в водородоподобном ионе алюминия с учетом тонкого расщепления $2p$ -состояния и доплеровского уширения спектральной линии. Показано, что зависимость ПКР от длительности импульса для несущей частоты УКИ вблизи минимума спектральной зависимости сечения рассеяния имеет максимум при $\tau=1$ фс, положение которого практически не зависит от толщины плазменного слоя. В то же время данная зависимость является монотонно возрастающей для несущих частот УКИ вблизи максимума спектральной зависимости сечения рассеяния.

Список литературы

1. V.A. Astapenko, Absorption of ultrashort laser pulses in medium with account for propagation effects, J. Opt., V.26, 095402, 2024.
2. V.A. Astapenko, T.K. Bergaliyev, S.V. Sakhno, Excitation of phonons by electromagnetic pulses in view of propagation effects in the medium, Appl. Phys. B, 130:208, 2024.
3. F.B. Rosmej, V.A. Astapenko, V.S. Lisitsa, Scattering of ultrashort X-ray pulses in optically dense plasmas: Account for pulse duration and propagation effects, Phys. Plasmas, V.31, 113302, 2024.

Исследование преобразования сингулярных пучков Лагерра-Гаусса при отражении от шероховатой поверхности

Шостка Н. В.¹, Соколенко Б.В.¹, Егоров Ю.А.¹

¹Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского

e-mail: nataliya_shostka@mail.ru

Актуальность исследования

Лазерные сингулярные пучки с орбитальным угловым моментом находят применение в оптических ловушках, микрорезонаторах, волоконной акустооптике и измерительных системах. Оптические вихри, обладая спиральным потоком энергии и фазовой структурой от 0 до 2π , являются перспективным инструментом для научных и прикладных задач.

В последние десятилетия активно разрабатываются методы бесконтактного анализа микро- и наноструктур поверхностей, востребованные как в материаловедении, так и в биомедицинских исследованиях [1,2]. Оптические подходы, такие как интерферометрия, обеспечивают высокое пространственное разрешение и неразрушающий характер измерений [3]. Однако их точность ограничивается чувствительностью к вибрациям и спекл-шумом.

Альтернативные методы включают специализированные пучки Бесселя и Лагерра-Гаусса, характеризующиеся сингулярностями волнового фронта. В работах [4,5] исследованы свойства «двулепестковых полей», включая зависимость угла поворота распределения интенсивности от глубины фокуса, а также влияние амплитудных и фазовых искажений на формирование световых структур.

Современные разработки, такие как широкопольная топографическая микроскопия, использующая массив самоинтерферирующих оптических вихрей позволяют бесконтактно анализировать микронные смещения [6].

В данной работе предложен простой с точки зрения практической реализации метод анализа преобразования сингулярных пучков при отражении от шероховатой поверхности путем изучения интерференционной картины вихревого ЛГ пучка с гауссовым пучком.

Основные тезисы

Шероховатость исследуемой поверхности представим в виде амплитудно-фазового объекта с квазипериодической структурой, на которой управляемыми являются параметры масштаба неоднородности и их высоты, а также коэффициент отражения. Последний влияет лишь на интенсивность отраженного пучка и может корректироваться светофильтрами.

При отражении вихревого пучка от такой поверхности наблюдается изменение в распределении интенсивности и фазы. С увеличением высоты рельефа в распределении амплитуды появляются вторичные максимумы, а центральный порядок приобретает овальную

форму. При этом определено, что наибольшее влияние оказывает поверхность, высота рельефа которого создает геометрическую разность хода между «парциальными» вторичными волнами, приводящий к сужению центрального максимума. На фазовом портрете проявляются локальные сдвиги на π радиан, вызывая краевую дислокацию волнового фронта.

При детальном анализе дифракции пучка Лагерра-Гаусса ($l = 1$) на исследуемой шероховатой поверхности в окрестности оси пучка наблюдается локальный минимум, а фазовый портрет демонстрирует спиральную структуру, позволяющую «промаркировать» пучок. Ключевыми входными параметрами в данном случае являются радиус перетяжки пучка, расстояние до плоскости наблюдения z и геометрическая разность хода, изменяющаяся от 0 до 0,5 длины волны. Динамика фазовой спирали и появление вторичных сингулярностей указывают на то, что даже малые искажения высотой от 0,005 длины волны приводят к бифуркации эквивалентных линий. Увеличение неоднородности вызывает ветвление спирали и формирование вторичных вихревых пучков.

Эта особенность поведения амплитуды поля суперпозиции пучков и результирующей фазы является основой для метода извлечения информации о разности геометрических путей пучков с помощью последующей компьютерной обработки исключительно одного распределения интенсивности или его локального фрагмента, без извлечения фазового портрета численными методами, что существенно может снизить вычислительную нагрузку.

Список литературы

1. Sprague R. A., Surface Roughness Measurement Using White Light Speckle, Applied Optics, Vol. 11, 2816–2826, 1972.
2. Rubinsztein-Dunlop H. et al., Roadmap on structured light, Journal of Optics, Vol. 19, 1, 013001, 2017.
3. Popiołek-Masajada A., Internal scanning method as unique imaging method of optical vortex scanning microscope, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 105, 201–208, 2018.
4. Belyi V., Bessel beam based optical profilometry, Proc. SPIE, Vol. 5964, 59640L, 2005.
5. Vorontsov E. N., Study on generating light fields with the intensity patterns characterized by different rotational rates, Computer Optics, Vol. 40, 158–163, 2016.
6. Bouchal P., Vortex topographic microscopy for full-field reference-free imaging and testing, Opt. Express, Vol. 25, 21428–21443, 2017.

Высокоскоростная адаптивная система коррекции атмосферных флуктуаций фазы

Галактионов И.^{1'2'3}, Топоровский В.^{1'2}, Кудряшов А.³

¹ Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS

² Moscow Technical University of Communications and Informatics

³ Moscow Polytechnic University

e-mail: ilya.galaktionoff@gmail.com

Атмосферная турбулентность является причиной флуктуаций показателя преломления, которые, в свою очередь, вносят дополнительные искажения в волновой фронт распространяющегося излучения. Одним из возможных способов исследования влияния атмосферной турбулентности является воспроизведение фазовых аберраций с помощью корректора волнового фронта, измерение результирующей фазовой поверхности с помощью датчика Шака–Гартмана и коррекция измеренных аберраций с помощью второго корректора волнового фронта. В статье представлены результаты работы системы генерации турбулентных фазовых искажений, а также результаты коррекции полученных искажений с помощью адаптивной системы. Был собран экспериментальный образец оптической системы, включающей два контура – контур генерации турбулентных фазовых искажений и контур коррекции. В качестве генератора и корректора использовались два биморфных зеркала апертурой 60 мм с 92 управляющими электродами и два корректора наклонов.

Известно, что турбулентность приводит к флуктуациям показателя преломления, что, в свою очередь, приводит к дополнительным искажениям волнового фронта излучения, распространяющегося в атмосфере. Атмосферная турбулентность ограничивает разрешающую способность телескопов и снижает когерентность лазерного излучения [1,2]. В результате качество изображения объектов, наблюдаемых в телескопы, ухудшается. Другими задачами, на которые влияет турбулентность, являются беспроводная передача энергии и информации с помощью оптического излучения [3]. Это важно, в частности, для таких задач, как подзарядка аккумуляторов на удаленных объектах; организация оптических каналов связи в свободном пространстве [4]; беспроводная оптическая связь, беспроводная доставка энергии к летающим объектам и низкоорбитальным спутникам; обеспечение резервного электропитания и беспроводного электроснабжения бытовых и промышленных устройств; уничтожение беспилотных летательных аппаратов или космического мусора [5]; обеспечение связи с воздушными судами (с целью контроля за их состоянием и получения информации); фокусировка луча внутри отверстия с ограниченной апертурой для задач лазерной связи [6]; увеличение плотности мощности излучения на мишени (лазерная резка) и повышение точности позиционирования луча (оптическая запись информации на носителе).

Формально работу можно разделить на два этапа – численный и экспериментальный. На первом этапе выполняется численное моделирование влияния конкретных условий турбулентной атмосферы на волновой фронт лазерного излучения – в результате получается набор фазовых экранов. Для каждого фазового экрана вычисляются управляющие

напряжения, которые необходимо подать на электроды биморфного корректора и корректора наклонов для воспроизведения заданного фазового экрана. Вторым этапом является экспериментальное восстановление смоделированных фазовых экранов с помощью первого биморфного деформируемого зеркала и первого корректора (в данном случае – генератора) наклонов и одновременная коррекция фазовых экранов с помощью второго биморфного зеркала и второго корректора наклонов.

Разработанная в лаборатории адаптивная система функционирует следующим образом. Излучение из диодного лазера с длиной волны 0.532 мкм коллимируется ахроматической линзой с апертурой 3” и фокусом 400 мм для увеличения диаметра пучка до световой апертуры биморфного зеркала. Далее коллимированный лазерный пучок падает на 60-миллиметровое деформируемое биморфное зеркало с 92 управляющими электродами, размещённое в оправе, управляемой по наклонам. Этот корректор вводит фазовую задержку, имитирующую влияние атмосферной турбулентности. Искаженный пучок проходит через согласующий телескоп (2 линзы) и попадает на второй биморфный корректор. Далее пучок отражается, падает на корректор по наклонам и уходит в систему измерения (датчик Шака-Гартмана с ¼” сенсором и анализатор интенсивности).

Список литературы

1. Tatarsky, V.I. *Waves Propagation in Turbulent Atmosphere*; Nauka: Moscow, Russia, 1967.
2. Andrews, L.C.; Phillips, R.L. *Laser Beam Propagation Through Random Media*, 2nd ed.; SPIE Press: Bellingham, WA, USA, 2005
3. Lu, M.; Bagheri, M.; James, A.P.; Phung, T. Wireless Charging Techniques for UAVs: A Review, Reconceptualization, and Extension. *IEEE Access* **2018**, *6*, 29865–29884
4. Wang, R.; Wang, Y.; Jin, C.; Yin, X.; Wang, S.; Yang, C.; Cao, Z.; Mu, Q.; Gao, S.; Xuan, L. Demonstration of horizontal free-space laser communication with the effect of the bandwidth of adaptive optics system. *Opt. Commun.* **2018**, *431*, 167–173
5. Bennet, F.; Conan, R.; D’Orgeville, C.; Dawson, M.; Paulin, N.; Price, I.; Rigaut, F.; Ritchie, I.; Smith, C.; Uhlendorf, K. Adaptive optics for laser space debris removal. In *Proceedings of the Adaptive Optics Systems III*, Amsterdam, The Netherlands, 1–6 July 2012
6. Galaktionov, I.; Nikitin, A.; Sheldakova, J.; Toporovsky, V.; Kudryashov, A. Focusing of a Laser Beam Passed through a Moderately Scattering Medium Using Phase-Only Spatial Light Modulator. *Photonics* **2022**, *9*, 296

Исследование влияния ориентационной вытяжки на структурные и электроактивные свойства пленок ВДФ методом спектроскопии комбинационного рассеяния

Деримедведь Д. К.^{1,2,3}, Бурьянская Е.Л.², Мальцев А.А.⁴, Коновалова И. Б.^{2,5} Мареев Е. И.³, Михалев П. А.^{2,3}, Минаев Н. В.³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

²МГТУ им. Н.Э. Баумана

³Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, НИЦ «Курчатовский институт»

⁴Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской Академии наук

⁵Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук

e-mail: drmdvdd@gmail.com

Поливинилиденфторид (ПВДФ) и его сополимеры с тетрафторэтиленом (ТФЭ) являются перспективными сегнетоэлектрическими материалами для создания гибких микроустройств (датчики, скаффолды) [1]. Их преимущества перед пьезокерамикой включают в себя гибкость, биосовместимость и близость акустического импеданса к воде и биологической жидкости. Кристаллическая структура ПВДФ представлена тремя основными фазами: α , β и γ , где β -фаза отвечает за сегнетоэлектрические свойства, γ -фаза является переходной, в то время как α -фаза не обладает ими [2]. Для анализа фазового состава и структурных изменений винилиденфторида (ВДФ) применяется спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) [3]. Этот метод позволяет количественно оценить содержание фаз по интенсивности спектральных линий. Такие исследования важны для контроля конформационных изменений, вызванных внешними воздействиями (механическими, электрическими, температурными), и для оценки влияния добавок на электроактивные свойства материала.

Цель работы — исследование структурных изменений в пленках сегнетоэлектрических полимеров на основе ВДФ-ТФЭ при их ориентировании с использованием метода спектроскопии комбинационного рассеяния.

Исследовались два типа пленок: изотропная и ориентированная пленки, изготовленные из ВДФ-ТФЭ. Пленки были получены методом полива в чашки Петри, растворитель — этилацетат. Ориентированные пленки подвергались одноосной вытяжке при температуре 75°C, кратность вытяжки составила 300%. Для определения напряженности поля поляризации были измерены значения электрической прочности пленок при температуре поляризации $T_P=30^\circ\text{C}$. Измерения электрической прочности проводилось в ванночке с вазелиновым маслом для избежания протекания пробоя по воздуху с помощью блока высокого напряжения, способного подавать на образец до -30 кВ. Для каждого образца было получено 15 значений. Полученные значения ($E_{исх}=417\pm 7$ МВ/м и $E_{ор}=468\pm 3$ МВ/м) свидетельствуют об увеличении электрической прочности после ориентации. Это может быть связано с перекристаллизацией пленки в процессе вытяжки и увеличением доли кристаллической фазы.

В рамках исследования состава и структуры образцов использовался спектрометр комбинационного рассеяния Thermo Nicolet Almega с лазерным источником излучения: $\lambda=532$ нм, $P_{\text{ном}}=15$ мВт и с использованием микрофокусного объектива (M Plan, 50X, NA=0.75). Спектры КР формировались на основе усреднения данных 20 сканов по 10 с в диапазоне $200\text{--}3200\text{ см}^{-1}$. В силу флуоресценции образцов применялось фотообесцвечивание – потеря флуоресценции у среды при воздействии излучения вследствие фотохимической реакции. Время фотообесцвечивания составляло 10 мин. С помощью встроенного ПО спектрометра спектры корректировались на наличие оставшейся флуоресценции, сглаживались.

Полученные спектры КР имеют отличия для образцов. В спектре исходного образца в равной мере выражены пики, характерные γ - и β -фазам (811 и 839 см^{-1}). В меньшей степени выражен пик, характерный α -фазе (796 см^{-1}). Отношения интенсивностей этих пиков составили: $I_{\alpha}:I_{\gamma}:I_{\beta} = 24:39:37$. Предполагается, что такие образцы затруднительно поляризовать, в силу малого содержания сегнетоактивной фазы [4].

Спектр КР ориентированного образца имеет другое соотношение интенсивностей характерных пиков: $I_{\alpha}:I_{\gamma}:I_{\beta}=19:26:55$. Из него следует, что интенсивность β -фазы заметно увеличилась. Полученные данные подтверждают гипотезу о влиянии одноосной вытяжки на сегнетоэлектрические свойства пленок сополимеров ВДФ, и в том числе на величину электрической прочности материала. Увеличения доли сегнетоактивной β -фазы и сопутствующая увеличение электрической прочности позволит получать материал с высокими значениями пьезокоэффициентов (до 25 пКл/Н), которые в свою очередь могут быть использованы для создания устройств на их основе. Описанные изменения в спектре согласуются с более ранними работами [5].

В работе рассмотрено изменение структурно-конформационного состава в ходе ориентации пленки полимера ВДФ-ТФЭ с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. Показана эффективность используемого метода ориентации пленок за счет увеличения содержания сегнетоактивной фазы относительно неактивной: количество β -фазы возросло с 37% до 55% по отношению к сумме интенсивностей пиков трех конформаций. Полученные данные согласуются с результатами измерения электрической прочности образцов. Результаты будут использованы в дальнейшей работе по исследованию модификаций сополимеров винилиденфторида и создания устройств гибкой электроники на их основе.

Список литературы

1. Ghosh S.K., Mandal D. Envisioned strategy for an early intervention in virus-suspected patients through non-invasive piezo- and pyro-electric-based wearable sensors // J. Mater. Chem. A. 2021. Vol 9, № 4. Bl 1887–1909.
2. Корчевинский В.В. Структура и Свойства блочного поливинилиденфторидаи систем на его основе // Успехи химии. 1996. Vol 541, № 65. Bl 936–987.
3. Purushothaman S.M. et al. Quantifying the Crystalline Polymorphism in PVDF: Comparative Criteria Using DSC, WAXS, FT-IR, and Raman Spectroscopy // ACS Appl. Polym. Mater. 2024. Vol 6, № 14. Bl 8291–8305.

4. Buryanskaya E. et al. Development of Flexible Electronics Materials Based on Ferroelectric Copolymers of Vinylidene Fluoride with Tetrafluoroethylene Derived from Xerogel // 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). IEEE, 2024. B1 1–4.
5. Constantino C.J.L. et al. Phase Transition in Poly(Vinylidene Fluoride) Investigated with Micro-Raman Spectroscopy // Appl. Spectrosc. 2005. Vol 59, № 3. B1 275–279.

Пространственно-разрешенное исследование усиления в полупроводниковых оптических усилителях на основе квантовых яма-точек.

Харченко А. А.¹, Надточий А. М.², Корнышов Г. О.³, Паюсов А. С.³, Бекман А. А.³, Гордеев Н. Ю.³, Шерняков Ю. М.³, Симчук О.И.¹, Ткач Ю.С.¹, Максимов М. В.¹

¹СПБАУ РАН

²НИУ ВШЭ СПб

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: antoshkerrr@gmail.com

Полупроводниковые оптические усилители (ПОУ) в диапазоне 900–1100 нм являются ключевыми компонентами перестраиваемых лазеров, используемых в спектроскопии и оптической когерентной томографии [1].

Гетероструктуры с активной областью InGaAs/GaAs «квантовые яма-точки» хорошо себя зарекомендовали в качестве активной области в прототипах полупроводниковых оптических усилителей (ПОУ) с волноводом GaAs/AlGaAs [2]. Одним из направлений исследований и оптимизации данных приборов является реализация пространственно-однородного усиления излучения в активной области ПОУ [3]. Среди основных причин такой неоднородности можно выделить высокий темп поверхностной рекомбинации носителей заряда [4], что приводит к снижению заселенности приповерхностных областей активной области в приборах с травлением через активную область; наличие латерального градиента плотности тока накачки в активной области, инжектируемого из узкого полоскового р-контакта [5,6]; а также наличие вертикального градиента концентрации носителей заряда из-за особенностей их транспорта в многослойных активных областях [7].

В настоящей работе экспериментально определено пространственное распределение усиления в активной области ПОУ путем исследования областей, находящихся в состоянии прозрачности при различных инжекционных токах. За основу метода взята методика определения тока прозрачности по изменению знака фотонапряжения при варьировании инжекционного тока [8].

Модулированное излучение перестраиваемого лазера (990–1075 нм) фокусировалось на сколотую грань полупроводникового оптического усилителя микрообъективом (100/0.85). На частоте модуляции измерялось индуцированное излучением фотонапряжение на образце, который располагался на пьезоплатформе, обеспечивающей позиционирование с точностью до 100 нм в трех направлениях, а на сам образец подавался

постоянный регулируемый ток накачки. В результате были получены зависимости фотонапряжения от положения сфокусированного пятна при различных токах накачки и длинах волн. Положительное значение фотонапряжения соответствует режиму поглощения излучения, а отрицательное – режиму усиления. Значение тока накачки, при котором фотонапряжение равно нулю (переходит из положительного в отрицательное) соответствует току прозрачности [2,8]. Фокусировка излучения в различных областях торца волновода приводит к преимущественному возбуждению различных латеральных мод, что позволяет реализовать латеральное профилирование усиления активной области.

Были получены пространственные карты торца ПОУ с изолиниями усиления по уровню прозрачности при различных токах инжекции. Пространственное разрешение мы оцениваем как 1 мкм. Было обнаружено, что область волновода, в которой достигается прозрачность и переход в режим усиления расширяется с увеличением тока накачки из центра волновода к краям в поперечном направлении. Наблюдаемый эффект свидетельствует о наличии пространственной неоднородности усиления, связанной с неравномерным растеканием тока из узкого полоскового контакта.

Таким образом предложенная методика может помочь визуализировать пространственную (не)однородность усиления в полупроводниковых оптических усилителях и может быть важным инструментом при проектировании и оптимизации таких устройств.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00358. О. И. Симчук и Ю. С. Ткач благодарят Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2023-0010) за поддержку исследования качества зеркал оптических усилителей.

Список литературы

1. Лобинцов А А, Шраменко М В and Якубович С Д 2008 Полупроводниковые оптические усилители для спектрального диапазона 1000-1100 нм. *Квантовая электроника* **38** 661–4
2. Харченко А А, Надточий А М, Шерняков Ю М, Гордеев Н Ю, Паюсов А С, Бекман А А, Корнышов Г О, Симчук О И, Салий Ю А, Кулагина М М, Минтаиров, С.А. Калюжный Н А and Максимов М В 2024 Оптическое усиление в волноводных гетероструктурах спектрального диапазона 1010 – 1075 нм с активной областью на основе InGaAs квантовых яма-точек *Физика И Техника Полупроводников* **58** 313
3. Ban D and Sargent E H 2000 Influence of nonuniform carrier distribution on the polarization dependence of modal gain in multiquantum-well lasers and semiconductor optical amplifiers *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 1081–8
4. Cruz C, Caló C, Pommereau F, Wilk A, Delorme O, Vaissière N, Decobert J and Carrière H 2024 Versatile Global Model for Semiconductor Optical Amplifier Design 2024 *24th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* (IEEE) pp 1–5
5. Fricke J, Wenzel H, Maaßdorf A, Zink C, Matalla M, Unger R and Knigge A 2022 Ridge waveguide lasers with vertically stacked quantum wells and tunnel junctions *Semicond. Sci. Technol.* **37**

6. Паюсов А С, Митрофанов М И, Корнышов Г О, Серин А А, Вознюк Г В, Кулагина М М, Евтихийев В П, Гордеев Н Ю, Максимов М В and Breuer S 2021 Модификация Гребневых Волноводов Полупроводниковых Лазеров Фокусированным Ионным Пучком *Письма В Журнал Технической Физики* **47** 51
7. Rossetti M, Bardella P, Gioannini M and Montrosset I 2008 Carrier transport effects in multi layer quantum dot lasers and SLDs *ECIO'08 Eindhoven - Proc. 14th Eur. Conf. Integr. Opt. Tech. Exhib. Contrib. Invit. Pap.* 221–4
8. Andrekson P A, Olsson N A, Tanbun-Ek T, Logan R A, Coblenz D and Temkin H 1992 Novel technique for determining internal loss of individual semiconductor lasers *Electron. Lett.* **28** 171–2

Пространственно-периодические гибридные структуры на основе пленок опала, покрытых слоем $a\text{-Si:C:H}$: синтез и излучающие свойства

Грудинкин С. А.¹, Феоктистов Н. А.¹, Голубев В. Г.¹, Павлов С. И.¹, Дьяков С. А.², Певцов А. Б.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Сколковский институт науки и технологий, Москва

e-mail: Grudink@gvg.ioffe.ru

В течение последних лет активно ведутся работы по созданию новых фотонных структур, в которых реализуется эффективное резонансное взаимодействие излучения с активной средой [1]. В настоящей работе исследован оптический отклик гибридных структур, сформированных из синтетических плёнок опала, покрытых люминесцентным слоем аморфного гидрогенизированного сплава кремний-углерод ($a\text{-Si:C:H}$). Слой $a\text{-Si:C:H}$ и верхний монослой плотноупакованных в гексагональную решетку сферических частиц $a\text{-SiO}_2$ образуют двумерную пространственно–периодическую структуру, являющуюся двумерным фотонным кристаллом (2D ФК).

Пленки опала из плотноупакованных монослоев частиц $a\text{-SiO}_2$, диаметром ~ 510 нм, были выращены методом жидкофазной коллоидной эпитаксии на подложке плавленого кварца [2]. Ростовым слоям, параллельным поверхности подложки, соответствовала кристаллическая плоскость (111). Толщины пленок составляли 5–10 монослоев частиц $a\text{-SiO}_2$. Затем плёнки опала покрывались слоем $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{H}$ методом плазмохимического газозаполнения с использованием силан-метан-аргоновой газовой смеси. Соотношение газовых потоков углерод и кремний содержащих компонентов соответствовало составу пленки с $x = 0.58$. Максимум полосы фотолюминесценции (ФЛ) слоя $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{H}$ находился на длине волны ~ 700 нм, ширина полосы ФЛ на половине высоты составляла ~ 200 нм, показатель преломления ~ 2.2 . Толщина слоёв $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{H}$ варьировалась от 50 до 350 нм.

Спектрально-угловые зависимости коэффициента отражения и интенсивности ФЛ синтезированных 2D ФК были исследованы методом Фурье-спектроскопии (спектроскопии

задней фокальной плоскости) [3]. Освещение образца белым светом, а также регистрация сигнала отражения и ФЛ осуществлялась с помощью объектива Olympus PlanFL с числовой апертурой $N.A.=0.95$. Сигнал регистрировался в диапазоне длин волн 400–1100 нм. Для возбуждения ФЛ применялся лазерный диод с длиной волны 405 нм, излучения которого падало на образец со стороны подложки. Спектральное разрешение установки составляло 0.2 нм, угловое разрешение $\sim 0.4^\circ$.

В спектрах ФЛ в диапазоне длин волн 500–1000 нм наблюдались пики, спектральное положение которых зависело от угла выхода излучения. Анализ спектров ФЛ, измеренных в окрестности нулевого угла выхода излучения (вблизи Γ -точки зоны Бриллюэна ФК), позволил сделать вывод, что наблюдаемые линии ФЛ разной интенсивности и ширины возникают при взаимодействии излучения нанокластеров $a\text{-Si:C:H}$ [4] с волноводными модами 2D ФК разной природы. Расчеты зонной структуры 2D ФК показали, что в таких структурах возможно существование излучательных мод, расположенных внутри светового конуса и характеризующихся малой групповой скоростью [5], которые могут проявляться в спектрах ФЛ в виде сравнительно широких и интенсивных линий в выбранном диапазоне длин волн.

Список литературы

1. M. Pelton, Modified spontaneous emission in nanophotonic structures, *Nature Photonics*, Vol. 9, pp. 427–435, 2015.
2. P. Jiang, J. Bertone, K. Hwang, V. Colvin, Single-Crystal Colloidal Multilayers of Controlled Thickness, *Chem. Mater.*, Vol. 11, No. 8, pp. 2132–2140, 1999.
3. S.I Pavlov, I. M. Fradkin, S. A. Dyakov et al, Bound states in the continuum in a waveguide structure covered by a two-dimensional square array of gold nanodisks, *Phys. Rev., B*, Vol. 108, p. 205425, 2023.
4. В. А. Васильев, А. С. Волков, Е. Мусабеков, Е. И. Теруков, В. Е. Челноков, С. В. Чернышев, Ю. М. Шерняков, Фотолюминесценция аморфных пленок $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x$: Н, ФТП, Т. 24, В. 4, с. 710–716, 1990.
5. M. Fujita, S. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, S. Noda, Simultaneous inhibition and redistribution of spontaneous light emission in photonic crystals, *Science*, Vol. 308, pp. 1296–1298, 2005.

Оптические свойства в ТГц области перспективных халькогенидных стекол, разработанных для ИК диапазона

Каплунов И. А.¹, Кропотов Г.И.², Роголин В.Е.³, Сивов Н.В.², Шахмин А.А.²

¹ТвГУ, ²ООО «Тидекс», ³ИЭЭ РАН.

e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

Среди оптических материалов, прозрачных в атмосферном окне 8 – 12 мкм, безусловным лидером является германий (Ge) [1]. Этот полупроводниковый монокристалл после тщательной очистки от примесей до уровня 10^{-13} см⁻³ (по электроактивным примесям), оказался очень востребованным оптическим материалом для инфракрасной (ИК) области

спектра. Однако, германий рассеян в природе, получение его сложная техническая проблема. Кроме того, существуют ограничения его использования при повышенных температурах. Поэтому, несмотря на его отличные свойства в полупроводниковой сфере, его пришлось в значительной мере заменить на значительно более распространенный кремний и другие материалы, даже иногда в ущерб качеству. В настоящее время применение кристаллического Ge в промышленности сосредоточено, в основном, в ИК оптике. Однако сложность добычи и цена Ge вынуждает вести поиски альтернативных вариантов.

Одним из альтернативных материалов оказались халькогенидные стекла [2]. Они активно изучаются уже более 50 лет благодаря перспективам применения в ИК области. Так, например, покрытие из As_2S_3 оказалось великолепным материалом для просветления деталей из германия и уже давно активно применяется [3]. Значительный выбор халькогенидных стекол позволяет подобрать подходящий материал для покрытий в ИК области (показатель преломления, в зависимости от состава, может варьироваться от 1,5 до 9,0).

В последнее время появились около десятка халькогенидных стекол, которые уже начинают конкурировать на рынке с германием в плане изготовления деталей проходной оптики (линзы, стекла, фильтры и др.). Это стекла составов: $\text{As}_{27}\text{Se}_{61}\text{Sb}_6\text{Sn}_H$; $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$; $\text{Ge}_{10}\text{As}_{40}\text{Se}_{50}$; $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$; $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$; $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$; $\text{Ge}_{22}\text{As}_{20}\text{Se}_{58}$; $\text{Ge}_{16}\text{Se}_{10}\text{Te}_{74}$.

В настоящей работе оптические свойства стекол данных составов были тщательно исследованы на измерительном комплексе, подробно описанном в работе [4]. Для измерения спектральных характеристик были приготовлены образцы каждого состава. Для измерения пропускания были использованы полированные с обеих сторон образцы диаметром 25,4 мм и толщиной 2 мм; пропускание измерялось под нормальным углом. При измерениях отражения использовались образцы, полированные с лицевой стороны и матированные с обратной; измерение отражения производилось под углом падения, равным 8 градусам относительно нормали. В ходе исследования были произведены спектрофотометрические измерения в спектральном диапазоне от видимого до 3000 микрон.

Полученные результаты свидетельствуют, что исследованные стекла обладают заметным пропусканием в ТГц области, причем их прозрачность в области 1000-3000 мкм, а возможно и несколько далее, не уступает пропусканию в ИК диапазоне.

Список литературы

1. G. Kropotov, V. Rogalin and I. Kaplunov Germanium Single Crystals for Photonics // Crystals 2024. V. 14. Iss. 9. 796. <https://doi.org/10.3390/cryst14090796>.
2. С.В. Немилов. «Оптическое материаловедение: Оптические стекла». СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 175 стр.
3. Аполлонов В.В., Васильковский Ю.М., Жаворонков М.И., Прохоров А.М., Ровинский Р.Е., Роголин В.Е., Устинов Н.Д., Фирсов К.Н., Ценина И.С., Ямщиков В.А. Мощный электроразрядный CO_2 -лазер с добавками в смесь легкоионизируемых веществ // Квант. электроника. 1985. 12. №1. С. 5-9.
4. Кротов Г.И., Шахмин А.А., Каплунов И.А., Роголин В.Е. Применение спектральных приборов в оптическом производстве и научных исследованиях // Фотоника. 2023. Т. 17. № 5. С. 378-392.

Гребёнки резонансов Фано в рассеянии света на диэлектрическом разомкнутом кольцевом резонаторе

Бочкарев М. Э.¹, Солодовченко Н.С.¹, Самусев К.Б.^{1,2}, Лимонов М.Ф.^{1,2}

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mikhail.bochkarev@metalab.ifmo.ru

Резонансы в полностью диэлектрических суб-волновых структурах открывают новые горизонты в фундаментальных оптических исследованиях. В основе этого направления лежат резонансы Ми и Фабри-Перо, которые определяются оптическими и геометрическими свойствами структур. Последние обеспечивают впечатляющие эффекты, такие как сингулярная генерация и локализация света в атомном масштабе [1], усиление скорости распада излучения [2], суперрассеяние, управляемое связанными состояниями в континууме [3], подчеркивающие значимость свойств формы элементарных диэлектрических резонаторов. Более того, резонансы Ми и Фабри-Перо тесно связаны с общим волновым явлением – интерференцией Фано, которая проявляется в асимметрии спектральных сигнатур и описывается знаменитой формулой Фано [4]. Изучение резонансного рассеяния света в терминах интерференции Фано является эффективным способом исследования общих свойств электромагнитных систем, особенно в рамках недавно разработанной точной теории для данного явления [5].

Другой активно развивающейся тематикой в фотонике является получение резонансных гребенок в спектрах, однако в большинстве работ их получают с помощью различных интерференционных схем. Здесь нам представляется интересной задача замены таких схем на одиночный резонатор и, тем самым, объединение тематик резонансных гребенок и резонансного рассеяния на суб-волновых частицах. Насколько нам известно, только в работе [6] сообщается о множественных резонансных линиях Фано (гребенках Фано), полученных в спектрах рассеяния от взвешенных капель воды, но в шкале размеров капель, а не в частотных спектрах. Более ценные результаты могут быть получены для одной частицы с наборами состояний, образующих гребенки в частотных спектрах рассеяния. Роль таких состояний могут играть моды Фабри-Перо, которые представляют собой эквидистантные наборы резонансов с кратным числом колебаний вдоль длины резонатора.

Ранее, нами было обнаружено, что резонансы типа Фабри-Перо в диэлектрических разомкнутых кольцевых резонаторах с прямоугольным поперечным сечением обеспечивают формирование в спектрах рассеяния множества гребенок Фано [7,8], однако сами гребенки и их поведение в зависимости от параметров системы не были исследованы. В данной работе мы закрываем этот пробел, здесь аналитически (с помощью теории [5]) и экспериментально исследовано поведение данных гребенок резонансов. Каждый резонанс характеризуется тремя индексами (m, r, z) , которые определяют число волн, укладывающихся в оптическую длину L , ширину W и высоту h резонатора. В пределах одной гребенки (когда индексы (r, z) фиксированы) параметры асимметрии Фано и интенсивности резонансных линий непрерывно изменяются с порядком резонанса m и имеют сильную

зависимость от условий возбуждения (от угла падения) и кривизны резонатора. Более того, были обнаружены сингулярные точки для параметра Фано, которые возникают при строго определенных параметрах системы. Вблизи этих точек параметр Фано конкретной резонансной линии может принимать любое значение и быстро изменяется при появлении малых возмущений в системе (изменение угла падения, диэлектрической проницаемости или геометрических параметров резонатора). Такой эффект можно использовать для определения ориентации частицы относительно направления падающей волны с высокой точностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-12-00114.

Список литературы

1. Ouyang, Y.H. et al., Singular dielectric nanolaser with atomic-scale field localization. *Nature*, том. 632, 287–293, 2024.
2. Córdova-Castro et al. Single-emitter super-resolved imaging of radiative decay rate enhancement in dielectric gap nanoantennas. *Light Sci Appl*, том. 13, 7 (2024).
3. Canós Valero et al., Superscattering emerging from the physics of bound states in the continuum. *Nat Commun*, том. 14, 4689, 2023.
4. U. Fano, Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts, *Phys. Rev.*, том. 124, 1866–1878, 1961.
5. M. Bochkarev, N. Solodovchenko, K. Samusev, M. Limonov, T. Wu, and P. Lalanne, “Quasinormal mode as a foundational framework for all kinds of Fano resonances”, arXiv:2412.11099, 2024.
6. J. T. Marmolejo, A. Canales, D. Hanstorp, and R. M´endez-Fragoso, Fano Combs in the Directional Mie Scattering of a Water Droplet, *Phys. Rev. Lett.*, том. 130, 043804, 2023.
7. M. Bochkarev, N. Solodovchenko, K. Samusev, M. Limonov, Topology and curvature effects in the photonics of ring – split ring – cuboid transitions, *Materials Today*, том. 80, 179-186, 2024.
8. M. E. Bochkarev, N. S. Solodovchenko, K. B. Samusev and M. F. Limonov, Photonics of Topological Transition from Dielectric Ring to Split Ring, *2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, IEEE Xplore, том. 1-6, 2024.

Шестиволновое взаимодействие с удвоенным обращением волнового фронта в многомодовых волноводах с тепловой и резонансной нелинейностями

Шмойлова С. С., Ивахник В.В., Багров А.Р.

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева

e-mail: shmoilovasvet@yandex.ru

Шестиволновые преобразователи излучения на основе тепловой нелинейности широко применяются для получения волны с удвоенным обращенным волновым фронтом. Это позволяет корректировать фазовые искажения, обрабатывать в реальном масштабе

времени оптические изображения, сигналы и т.д. [1]. По сравнению с трёх- и четырёхволновыми преобразователями излучения, шестиволновые преобразователи обладают большими возможностями управления формой волнового фронта, пространственной селективностью, преобразованием изображения, передачи информации с одних пучков на другие и т.д. [2]. Чтобы повысить эффективность (коэффициент отражения), как и в случае четырёхволнового взаимодействия, целесообразно использовать шестиволновое взаимодействие в волноводах [3, 4]. Волоконные структуры позволяют концентрировать энергию в малых объёмах, усиливая эффекты тепловой нелинейности. Исследования показывают, что многоволновое взаимодействие в волноводах с кремниевыми сердечниками является перспективным направлением [5–8]. Такие волоконно-оптические системы обладают высокой мощностью (свыше 10 нВт) и значительной длиной когерентности (до 4 км), обеспечивая высокую контрастность и стабильность изображений. Эти свойства делают их полезными для усиления телекоммуникационных сигналов.

Настоящее исследование посвящено анализу качества удвоенного обращения волнового фронта при шестиволновом взаимодействии на основе тепловой и резонансной нелинейностей в различных типах волноводов. В качестве волноводов рассматриваются двумерный волновод с бесконечно проводящими поверхностями и неограниченный двумерный волновод с параболическим распределением показателя преломления (параболический волновод).

Список литературы

1. O.G. Romanov, D.V. Gorbach, A.L. Tolstik. Frequency transformation of optical vortices upon nondegenerate multiwave interaction in dye solutions // *Optics and Spectroscopy*, 2010, vol. 108(5), p. 768-773. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0030400X10050152>.
2. О. Ормачеа, А.Л. Толстик. Сравнительный анализ многоволновых взаимодействий в растворах красителей // *Вестник Белорусского государственного университета*. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика, 2003, т. 1(2), с. 3-9.
3. V.V. Ivakhnik, D.R. Kapizov, V.I. Nikonov. Six-wave interaction with double wavefront reversal in multimode waveguides with Kerr and thermal nonlinearities // *Computer Optics*, 2023, vol. 47(5), p. 702-709. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1313>.
4. V.V. Ivakhnik, D.R. Kapizov, V.I. Nikonov. Double wavefront reversal during six-wave interaction on Kerr nonlinearity in a waveguide with infinitely conducting surfaces // *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2024, vol. 27(2), p. 38-44. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.2.38-44>.
5. D. Wu, et al. Four-wave mixing-based wavelength conversion and parametric amplification in submicron silicon core fibers // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, vol. 27(2), p. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2020.3022100>.
6. S. Sun, et al. Raman enhanced four-wave mixing in silicon core fibers // *Optics Letters*, 2022, vol. 47(7), p. 1626-1629. DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.451785>.
7. M. Huang, et al. Classical imaging with undetected photons using four-wave mixing in silicon core fibers // *Photonics Research*, 2023, vol. 11(2), p. 137-142. DOI: <https://doi.org/10.1364/PRJ.473239>.

8. S. Sun, Z. Goran, A. Peacock. Design of integrated silicon waveguides for Raman-enhanced four-wave mixing in the telecom band // Optics Express, 2024, vol. 32(6), p. 8715-8722. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.509992>.

Развитие методов спектроскопии высокого разрешения для медицинских исследований тканей патологий ЛОР-органов

Вакс В. Л.^{1,2}, Айзенштадт А.А.^{1,3}, Домрачева Е.Г.^{1,2}, Черняева М.Б.^{1,2}, Анфертьев В.А.¹, Глушкова К.А.^{1,3}, Черняева А.С.¹

¹ИФМ РАН

²ННГУ им. Н.И.Лобачевского

³ГБУЗ НО «Детская городская клиническая больница № 1»

e-mail: elena@ipm.sci-nnov.ru

В настоящее время в мире активно развиваются метаболические подходы для диагностики различных заболеваний и патологий. Среди физико-химических методов, используемых для выявления метаболитов-маркеров патологий в биологических образцах (газовых или жидкостных), можно выделить, прежде всего, хроматографические методы, часто совмещенные с масс-спектрометрией, а также спектроскопические методы. Однако исследование тканей проводится только с использованием гистологического или химического анализа. Среди патологий тканей органов уха-горла-носа (ЛОР-органов), чья диагностика на ранних стадиях имеет важнейшее значение, можно выделить новообразования (как доброкачественные, так и злокачественные). Среди биомаркеров, характерных для тканей синоназальных опухолей к настоящему моменту выделяются такие крупные биологические молекулы, как белки (специфический белок опухолевой клетки, внутриклеточный белок-ингибитор циклин-зависимых киназ, белок - транскрипционный фактор, регулирующий клеточный цикл и др.) [1]. Спектроскопические подходы, в частности, газовая спектроскопия на нестационарных эффектах ТГц частотного диапазона, обладающая высокой разрешающей способностью и чувствительностью одновременно, позволяет выявлять состав продуктов термического разложения тканей и может дать важную информацию о различиях химического состава продуктов термического разложения здоровых и патологически измененных тканей. Данная работа посвящена изучению химического состава вторичных метаболитов для тканей опухолей органов уха, горла и носа и различных систем жизнеобеспечения с помощью ТГц-спектроскопии высокого разрешения на примере образцов относительно здоровых слизистых оболочек и таких новообразований, как папилломы миндалин и гортани и холестеатомы среднего уха.

Спектроскопические измерения проводились с использованием разработанного авторами ТГц-спектрометра высокого разрешения с фазовой манипуляцией воздействующего на газ излучения с рабочим диапазоном 118-175 ГГц, а также спектрометра на основе ТГц ККЛ [2]. Исследуемые образцы тканей нагревались, смесь продуктов термического

разложения напускалась в предварительно вакуумированную измерительную ячейку. По выявленным спектральным линиям с использованием электронных спектроскопических баз данных идентифицировались вещества, являющиеся продуктами термораспада более крупных биологических молекул, состав которых различается для здоровых тканей и патологически измененных тканей. В спектрах образцов относительно здоровой слизистой оболочки, так и в спектрах опухолевых тканей идентифицируются линии поглощения метанола, пропандиола, ацетальдегида, пиррола, сульфида этилена. Однако их относительная концентрация в продуктах термораспада образцов тканей новообразований выше, чем для относительно здоровых тканей. Кроме того, выявлен ряд соединений семейства органических кислот, альдегидов, нитрилов, других органических соединений, линии поглощения которых в спектрах относительно здоровых тканей отсутствуют.

Идентификация сходных веществ в опухолевых тканях и выявление отличий между опухолями разных видов, а также отличия от веществ в здоровых неизмененных тканях, может стать первым шагом к определению метаболического профиля тканей при опухолевом процессе в целом, а также метаболического профиля продуктов термического разложения тканей для конкретной патологии. Таким образом, показана потенциальная возможность использования ТГц-спектроскопии высокого разрешения для анализа метаболического состава тканей новообразований.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-19-00623, <https://rscf.ru/project/24-19-00623/>).

Список литературы

1. Lucidi D., Cantaffa C., Miglio M., Spina F., Alicandri Ciufelli M., Marchioni A., Marchioni D. Tumors of the Nose and Paranasal Sinuses: Promoting Factors and Molecular Mechanisms—A Systematic Review. // *Int. J. Mol. Sci.*, **24**, 2670, (2023).
2. В.Л. Вакс, В.А. Анфертьев, В.Ю. Балакирев, С.А. Басов, Е.Г. Домрачева, А.В. Иллюк, П.В. Куприянов, С.И. Приползин, М.Б. Черняева, Спектроскопия высокого разрешения терагерцового частотного диапазона для аналитических приложений // *УФН*, **190**, 765–776 (2020)

Модифицированный метод Джадда-Офельта для анализа интенсивностей оптических переходов ионов редкоземельных элементов

Дукин А. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: doukine@yandex.ru

В начале 60-х годов XX века появилась теория Джадда-Офельта [1], которая позволяет описывать интенсивности оптических переходов между возбужденными состояниями внутри 4f оболочки ионов редкоземельных элементов (РЗЭ). В рамках этой теории интенсивность оптических переходов для трехвалентного иона РЗЭ описывается с помощью

всего трех параметров интенсивности Джадда-Офеля (Ω_2 , Ω_4 , Ω_6) в которых заключена вся информация о взаимодействии иона с окружением. С помощью теории Джадда-Офеля рассчитываются вероятности излучательных переходов между состояниями внутри 4f оболочки, излучательные времена жизни возбужденных состояний, коэффициенты ветвления [1]. Эта теория позволяет с приемлемым качеством описывать как спектры поглощения, так и люминесценции и в настоящее время широко применяется для анализа интенсивностей спектров трехвалентных ионов РЗЭ в различных материалах [2].

В стандартном методе Джадда-Офеля отправной точкой является анализ спектра коэффициента поглощения образца, в котором переходы из основного в возбужденные состояния внутри 4f оболочки трехвалентного иона РЗЭ проявляются как набор узких полос.

Для проведения анализа Джадда-Офеля необходимо знать концентрацию оптически активных ионов РЗЭ в зарядовом состоянии $3f^N$ и толщину образца. Но в некоторых случаях это трудно сделать – например, если образец неоднородный, порошковый, пористый, микрочастица неправильной формы, или часть атомов РЗЭ находится в оптически-неактивном состоянии. Кроме того, определение концентрации ионов РЗЭ требует дополнительного исследования, при котором обычно измеряется только общая концентрация ионов без учета их зарядового состояния и положения в кристаллической решетке.

Для преодоления этой трудности предложены различные модификации стандартного метода Джадда-Офеля [3], [4]. Но в их рамках необходимо проводить дополнительные измерения: излучательного времени жизни отдельных возбужденных состояний, спектров излучения, спектров возбуждения и т.п..

В настоящей работе предложена модификация метода Джадда-Офеля, которая позволяет проводить анализ опираясь только на спектр пропускания, не используя данные о концентрации оптически активных ионов РЗЭ и толщине образца.

Модифицированный метод заключается в том, что среди наблюдаемых переходов в спектре поглощения ионов РЗЭ выбирается один, который содержит максимальную магнитодипольную компоненту. Интенсивность магнитодипольной части перехода не зависит от окружения иона, и поэтому такой переход выбирается референсным. Для всех наблюдаемых переходов в спектре поглощения в рамках теории Джадда-Офеля рассчитывается относительная сила осциллятора. Она определяется как отношение силы осциллятора к силе осциллятора референсного перехода. Параметры интенсивности Джадда-Офеля (Ω_2 , Ω_4 , Ω_6) рассчитываются путем подгонки методом наименьших квадратов рассчитанных значений относительных сил осцилляторов под их экспериментальные значения, определяемые из спектра поглощения.

Предложенный модифицированный метод Джадда-Офеля с успехом был применен для анализа спектра поглощения иона Er^{3+} в кристаллическом LiNbO_3 . Вычисленные значения параметров Ω_2 , Ω_4 , Ω_6 близки к тем, которые получены стандартным методом Джадда-Офеля для LiNbO_3 активированного ионами эрбия [5]. Отклонение рассчитанных сил осцилляторов перехода от их

экспериментальных значений не превышает 0.3%, что подтверждает высокую точность проведенного анализа и доказывает применимость предложенного модифицированного метода Джадда-Офельта для анализа интенсивности оптических переходов в ионах РЗЭ.

Список литературы

1. Hehlen M.P., Brik M.G., Kramer K.W., J.Lumin., v.136, 221-239, 2013.
2. Hrabovsky J., Varak P., Oswald J., et al, J.Phys.Photonics, v.7, 025006, 2025.
3. Cantelar E., Marin-Dobrincic M., Jardiel T., et al, Optical Materials, v.41, 122-125, 2015.
4. Luo W., Liao J., Li R., et al, Physical Chemistry Chemical Physics, v.12, 3276-3282, 2010.
5. Nunez L., Lifante G., Cusso F., Appl.Phys.B, v.62, 485-491, 1996.

Асимметричное рассеяние света в гибридных метаповерхностях на основе α -Si:C:H волновода с массивом α -Si:H наноколонн

Марков Д. П.¹, Павлов С.И.¹, Певцов А.Б.¹, Николаева А.В.², Свинкин Н.А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова

e-mail: danisimyss@gmail.com

Современные исследования в области нанофотоники направлены на управление светом с помощью метаповерхностей, основанных на резонансных явлениях. Одним из примеров таких явлений выступает эффект Керкера, проявляющийся в асимметричном рассеянии света наноструктурами. Данный эффект активно исследуется в контексте управления оптическими модами с помощью периодических массивов диэлектрических наночастиц [1]. Однако большинство работ ограничиваются изолированными наночастицами или их массивами [2,3], что не позволяет в полной мере использовать потенциал взаимодействия локализованных резонансов с распространяющимися модами. Введение волноводного слоя в структуру метаповерхностей открывает новые возможности для контроля асимметричного рассеяния. Волновод не только выступает платформой для формирования гибридных мод, но и вносит дополнительные степени свободы за счёт усиления направленных свойств системы. Актуальность исследования обусловлена потенциалом таких систем в создании направленных излучателей, сенсоров и фотонных интегральных схем.

В настоящей работе рассматривались гибридная структура на подложке кварца, объединяющая квадратный массив аморфных кремниевых колонн (α -Si:H) и слой карбида кремния (α -Si:C:H), который в виду своего показателя преломления ($n=2-3$) [4] выполнял роль волновода. Моделирование оптических характеристик (поглощение, излучательная способность) структур производилась методом RCWA (Rigorous Coupled-Wave Analysis) с учётом дисперсии материалов и периодических граничных условий. Дополнительно проводилось сингулярное разложение (SVD) матрицы рассеяния для выявления резонансных мод и их связи с геометрией структуры.

Анализ структуры показал наличие резонансной гибридной моды в области 700–750 нм, что соответствует пику фотолюминесценции α -Si:C:H. Исследование поглощения и излучательной способности структуры при освещении светом с прямого и обратного направлений вблизи данной моды показали наличие локального подавления светорассеяния при обратном освещении структуры. Данная особенность возникает за счёт взаимодействия Ми-резонансов колонн с волноводными модами слоя SiC.

Наблюдаемая асимметрия поглощения и излучательной способности при диаметре наноконн 60–90 нм и высоте 200 нм при прямом и обратном направлении света составляет $A_{\text{forward}}/A_{\text{backward}} \approx 5$ и $I_{\text{backward}}/I_{\text{forward}} \approx 2$. Увеличение высоты колонн до 500 нм приводит к резкому усилению асимметрии для поглощения: $A_{\text{forward}}/A_{\text{backward}} \approx 20$, для излучательной способности: $I_{\text{backward}}/I_{\text{forward}} \approx 10$. Полученные результаты подтверждают, что управление высотой колонн позволяет тонко настраивать баланс между локализованными и распространяющимися модами, открывая новые возможности для проектирования направленных метаповерхностей.

Список литературы

1. Xiong L., Polarization-controlled dual resonant lattice Kerker effects, *Nano Research*, 16, 3195–3200, 2023
2. Babicheva V. E., Lattice effect in Mie-resonant dielectric nanoparticle array under oblique light incidence, *MRS Communications*, 8, 1455–1462, 2018
3. Algorri J. F., Selective Dielectric Metasurfaces Based on Directional Conditions of Silicon Nanopillars, *Nanomaterials*, 7, 177, 2017
4. Akaoglu B., Carbon content influence on the optical constants of hydrogenated amorphous silicon carbon alloys, *Optical Materials*, 30, 1257–1267, 2008

X-ray-induced ultraviolet persistent luminescence in YPO₄:Bi

Kuznetsova Yu. A.¹, Ogorodnikov I. N.¹, Raikov D. V.¹, Kiselev S. A.¹, Voynov V. S.¹

¹УрФУ

e-mail: iu.a.kuznetsova@urfu.ru

Long persistent phosphors (LPP) are materials that can store excitation energy (X-rays, γ -rays, UV light) and convert it into prolonged luminescence lasting from minutes to hours, and even days [1]. Most LPP are characterized by luminescence in the visible and near-infrared ranges, while materials that provide long-lasting afterglow in the UV range are quite limited. UV LPP are of practical importance for photocatalysis, medicine (including phototherapy, disinfection, and cell analysis), and optical lithography technologies. This work focuses on the synthesis and study of optical properties of UV persistent phosphors YPO₄:Bi.

The YPO₄:Bi samples were synthesized using both solid-state reaction and hydrothermal methods. X-ray diffraction analysis confirmed the formation of single-phase powders with a tetragonal zircon-type structure of YPO₄. According to scanning electron microscopy images, the solid-

state synthesis resulted in 'large' particle sizes (1–4 μm), while the hydrothermal synthesis produced 'small' particle sizes (30–45 nm).

The X-ray excited luminescence spectra revealed that UV-C and UV-A emission bands are associated with recombination processes in single Bi^{3+} ions and Bi^{3+} - Bi^{3+} pairs, respectively [2]. The highest emission yield is observed in samples with a bismuth concentration of 0.6 mol.%. A comparison of samples consisting of 'large' and 'small' particles showed that as the particle size decreases, the luminescence yield also decreases due to the surface energy losses.

An analysis of thermoluminescence glow curves using the general order kinetics model, revealed hole traps with an activation energy of 0.93–1.05 eV and electron traps with an activation energy of 0.75–0.85 eV. The hole trap centers are associated with Y-vacancies, while the origin of electron trap centers remains unknown. The dominant mechanisms for UV-C and UV-A emission involve hole recombination at Bi^{2+} ions and electron recombination at Bi^{3+} - Bi^{4+} pairs, respectively. The optimal X-ray irradiation dose is 10–12 Gy.

The UV-C and UV-A afterglow curves follow a sum of exponential and first-order hyperbola functions corresponding to recombination through the conduction band and tunneling process, respectively. For solid-state prepared powder subjected to a 10 Gy X-ray irradiation dose, the UV-A and UV-C afterglow durations are 40 min and 10 min, respectively. A decrease in particle size leads to a reduction of afterglow intensity and duration. However, there is a significant increase in the duration of the tunneling component responsible for UV-C emission, attributed to the reduced average distance between the emission center and the hole trap.

A further strategy is proposed to improve the characteristics of UV-C afterglow, which includes the prevention of Bi^{3+} - Bi^{3+} pair formation and the creation of additional hole trap centers with a suitable energy depth.

The research was supported by the RSF project no. 24-72-00066.

References

1. Y. Li, M. Gecevicius, J. Qiu, Long persistent phosphors-from fundamentals to applications, *Chem. Soc. Rev.*, 45, 2090–2136, 2016.
2. R.H.P. Awater, L.C. Niemeijer-Berghuijs, P. Dorenbos, Luminescence and charge carrier trapping in $\text{YPO}_4\text{:Bi}$, *Opt. Mater.*, 66, 351–355, 2021.

Влияние фазовых трансформаций на частоты молекулярных колебаний в пленках 2-метилбензимидазолперхлората $C_8H_8N_2-HClO_4$

Кричевцов Б. Б.¹, Павлов С.И.¹, Редьков А.В.², Балашова Е.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИПМаш РАН

e-mail: boris@mail.ioffe.ru

Исследования переходов из кристаллической фазы в фазу ионного жидкого кристалла (ИЖК) или фазу ионной жидкости (ИЖ) в настоящее время вызывают большой интерес в связи с широкими возможностями использования, как ИЖК, так и ИЖ в различных областях практических применений [1,2]. Целью данной работы явилось изучение молекулярных колебаний в недавно синтезированном кристалле 2-метилбензимидазолперхлората $C_8H_8N_2-HClO_4$ (МБИ- $HClO_4$) при фазовых переходах из состояния ионного кристалла (ИК) в промежуточную фазу и в фазу ИЖ [3].

Молекулярные колебания изучались в пленках МБИ- $HClO_4$, выращенных на подложках сапфира Al_2O_3 методом испарения из раствора. Исследовались спектры инфракрасного поглощения, (ИК-Фурье спектрометр IRPrestige-21, Shimadzu, Япония) в геометрии отражения и прохождения в спектральном диапазоне $650 - 5000\text{ см}^{-1}$. Рамановские спектры в спектральной области $80-3300\text{ см}^{-1}$ были получены с помощью конфокального микроскопа Alpha 300R (Witec, Германия) в геометрии обратного рассеяния с использованием лазерного диода, работающего на длине волны $\lambda = 532\text{ нм}$. Измерения проводились в температурном интервале $T = (295 - 440)\text{ К}$.

В монокристаллах МБИ- $HClO_4$ при повышении температуры происходят два фазовых перехода первого рода с различными величинами температурного гистерезиса [3]. При нагревании сначала происходит переход из фазы ионного кристалла (ИК) в промежуточную фазу, которую можно интерпретировать, как фазу ИЖК, а затем при $T_{\text{melt}} \gg 440\text{ К}$ образуется ИЖ. При охлаждении переход ИЖ $\rightarrow$ ИЖК происходит при $T \gg 430\text{ К}$, а при $T \gg 401\text{ К}$ образуется фаза ИК. Аналогичное фазовое поведение демонстрируют и пленки МБИ- $HClO_4$, выращенные на различных подложках, но температуры переходов в них оказываются несколько ниже, чем в кристаллах.

Рамановские спектры и спектры инфракрасного поглощения пленок МБИ- $HClO_4$ при комнатной температуре состоят из большого числа линий, связанных с молекулярными колебаниями протонированной молекулы МБИ- H^+ и тетраэдров ClO_4^- . Частота этих колебаний близка к частотам колебаний в соединениях, содержащих молекулы МБИ, $HClO_4$, растворах или в монокристалле МБИ $\times HClO_4$. Анализ рамановских спектров показал, что в фазе ИЖ, как и в кристаллической низкотемпературной фазе, молекула МБИ остается протонированной, то есть в виде катиона МБИ- H^+ , а перхлорная кислота присутствует в виде аниона ClO_4^- . В кристаллической фазе наблюдается 9 мод, связанных с колебаниями

связей в искаженных тетраэдрах ClO_4^- , а в фазе ИЖ и остается только 4 моды, поскольку тетраэдр становится почти идеальным и происходит вырождение мод.

В фазе ИЖК измерение рамановских спектров сильно затруднено из-за сильной люминесценции, интенсивность которой примерно на два порядка больше интенсивности линий рамановского рассеяния. В отличие от этого, спектры инфракрасного поглощения хорошо измеряются во всех фазах. В спектрах инфракрасного поглощения присутствуют линии, частота которых практически не зависит от температуры, линии, частота которых немного увеличивается с температурой, а также ряд линий, частота которых демонстрирует температурный гистерезис. При переходе в фазу ИЖ частота этих линий увеличивается, а при охлаждении остается практически без изменений до перехода в фазу ИК. То, что эти линии обусловлены колебаниями валентных связей C-H иона MBI-H^+ , показывает, что этот ион является свободным, как в фазе ИЖ, так и ИЖК фазе, что подтверждает вывод о том, что промежуточная фаза является ИЖК.

Список литературы

1. D. R. MacFarlane, et. al. Energy Environ. Sci. 2014, 7, 232; <https://doi.org/10.1039/C3EE42099J>
2. K. Binnemans. Chem. Rev. 2005, 105, 4148-4204. doi: 10.1021/cr0400919
3. E. Balashova et al. Materials 2023, 16, 1994. <https://doi.org/10.3390/ma16051994>.

Спектры и кинетика люминесценции LiNbO_3 : Er/Mg в интервале температур 80 – 430 К

Скворцов А. П., Певцов А. Б., Старухин А. Н., Резницкий А. Н.

ФТИ им. А. Ф. Иоффе

e-mail: a.skvortsov@mail.ioffe.ru

Многочисленные практические применения кристаллов ниобата лития обуславливают необходимость всестороннего изучения их свойств. В настоящей работе исследованы спектры и кинетика фотолюминесценции (ФЛ) конгруэнтных кристаллов LiNbO_3 , легированных оксидами Er и Mg, при непрерывном и импульсном возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны 405 нм. В большинстве опубликованных работ исследовались и обсуждались свойства люминесценции LiNbO_3 : Er^{3+} при резонансном возбуждении уровней иона Er^{3+} . В то же время возбуждение в область 405 нм в значительной части приходится на электронные состояния матрицы, и, следовательно, возбуждение ФЛ включает процесс переноса возбуждения от матрицы к иону Er^{3+} . Обнаружено, что при возбуждении в область 405 нм спектр ФЛ кристалла LiNbO_3 : Er^{3+} в интервале длин волн 410 – 700 нм включает четыре мультиплета, максимумы которых расположены при 413, 526, 551, и 660 нм; при этом полоса 551 нм доминирует по интенсивности. Комбинируя спектры ФЛ с уровнями энергии, наблюдаемыми в других кристаллах LiNbO_3 : Er^{3+} , эти

особенности отнесены, соответственно, к переходам с уровней $^2H_{9/2}$, $^2H_{11/2}$, $^4S_{3/2}$ и $^4F_{9/2}$ на основной уровень $^4I_{15/2}$.

При возбуждении прямоугольными импульсами длительностью 250 мкс и частотой повторения 500 Гц с разрешением 0.5 мкс исследована кинетика нарастания и затухания импульса ФЛ кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$. Обнаружено, что при комнатной температуре время затухания люминесценции Er^{3+} на длинах волн 526 и 551 нм составляет ~ 27 мкс, а компоненты мультиплета $^2H_{9/2}$ затухают быстрее 1 мкс, что коррелирует с многочисленными литературными данными. При этом наиболее удивительным результатом оказалось то, что время затухания ФЛ в области 660 нм оказалось равным 33 мкс, что, насколько нам известно, почти в 30 раз больше значений, опубликованных ранее. Обсуждаются возможные причины отмеченного различия.

В интервале $T = 80 - 430\text{K}$ исследована температурная зависимость кинетики ФЛ. Обнаружено, что времена нарастания и затухания импульсов излучения переходов с уровней $^2H_{11/2}$, $^4S_{3/2}$ и $^4F_{9/2}$ монотонно уменьшаются с ростом температуры, а интенсивность ФЛ существенно растет только для переходов с уровня $^2H_{11/2}$. Сделан вывод, что последний результат отражает процесс установления термического квазиравновесия между двумя близко расположенными уровнями 526 и 551 нм.

Установлено, что спектры ФЛ ниобата лития, легированного оксидами Er и Mg, практически повторяют вид спектров образцов LiNbO_3 , легированных только Er^{3+} , однако при этом кинетика ФЛ заметно ускоряется. Это открывает перспективу контроля кинетики ФЛ путем изменения содержания MgO. Указанная возможность, а также отмеченная в ряде опубликованных работ более высокая стойкость ниобата лития, солегированного оксидами эрбия и магния, к оптическим повреждениям позволяет сделать вывод, что этот материал является лучшим по сравнению с $\text{LiNbO}_3:\text{Er}^{3+}$ с точки зрения лазерных применений.

Взаимодействие резонансов Ми и квазиволноводных резонансов в светоизлучающих диэлектрических метаповерхностях на основе материалов родственных аморфному кремнию

Павлов С. И.¹, Марков Д. П.¹, Певцов А. Б.¹, Николаева А.В.², Свинкин Н.А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова

e-mail: pavlov_sergey@mail.ioffe.ru

В последнее десятилетие диэлектрические метаповерхности вызывают все больший интерес для управления световым потоком. Широкая функциональность метаповерхностей основана на разнообразных эффектах, которые могут возникать при подходящей настройке

размеров и форм составляющих элементов (мета-атомов), а также при организации таких мета-атомов в пространственно-упорядоченные массивы. Взаимодействие локализованных резонансов в мета-атомах за счет дифракционной связи, а также с нелокализованными коллективными резонансами может приводить к формированию новой структуры электромагнитного поля в ближнем и дальнем полях, что обеспечивает дополнительные степени свободы для получения требуемого оптического отклика. Сочетание диэлектрических метаповерхностей со светоизлучающими материалами открывает широкие возможности для повышения функциональности и эффективности фотонных структур, что в свою очередь перспективно для создания компактных и эффективных источников света, таких как светодиоды, лазеры и источники одиночных фотонов. Было показано, что как одиночные наностолбики, так и массивы наностолбиков могут обеспечивать высокую направленность излучателя за счет интерференции магнитных и электрических мод Ми [1]. Более того, взаимодействие мод типа Ми с модами волноводного слоя может сильно модифицировать оптический отклик из-за гибридизации мод [2, 3].

В работе исследовалась метаповерхность в виде массива наностолбиков из аморфного кремния ($a\text{-Si:H}$) на поверхности светоизлучающего слоя $a\text{-Si}_{0.65}\text{C}_{0.35}\text{H}$. Подложкой структуры служило кварцевое стекло. Слой $a\text{-Si:C:H}$ выполнял роль планарного волновода, ввод и вывод света в который обеспечивался благодаря дифракции на периодически-упорядоченном массиве $a\text{-Si:H}$. Состав пленки с заданным соотношением C/Si соответствует показателю преломления приблизительно 2.5 и максимуму пика фотолюминесценции (ФЛ) около 710 нм [4]. Параметры структуры (толщина слоя $h(a\text{-Si:C:H})=100$ нм, высота столбиков 250 нм, периодичность массива 350 нм) были выбраны для настройки длины волны резонансов на максимум пика люминесценции. Варьирование радиуса столбиков $a\text{-Si:H}$ позволяло изменять спектральное положение резонансов Ми.

На спектрально-угловых зависимостях оптического отклика (отражения, пропускания, фотолюминесценции) структур с радиусом наностолбиков меньше 60 нм в диапазоне длин волн 650–1000 нм наблюдались резонансные особенности, связанные с возбуждением квазиволноводных ТЕ- и ТМ-мод. Расчеты дисперсионных зависимостей собственных оптических мод показали, что увеличение радиуса столбиков сдвигает спектральное положение резонансов Ми в область больших длин. Увеличение радиуса от 70 до 90 нм приводит к спектральному перекрытию квазиволноводных и Ми резонансов. В результате возникает взаимодействие резонансных мод с образованием гибридных резонансов, что проявляется в антипересечении резонансных кривых. При этом для различных параметров структур наблюдаются подавление отражения или пропускания, что является аналогом эффекта Керкера для одиночных диэлектрических рассеивателей. Кроме того, взаимодействие квазиволноводных и Ми резонансов приводит к качественной модификации спектрально-угловых зависимостей фотолюминесценции и изменению диаграммы направленности излучения.

Список литературы

1. Staude, I. et. al. "Tailoring directional scattering through magnetic and electric resonances in subwavelength silicon nanodisks", ACS Nano, Vol. 7, No. 9, 7824–7832, 2013.
2. Ding, P. et. al. "Guided mode caused by silicon nanopillar array for light emission enhancement in color-converting LED", OPTICS EXPRESS, Vol. 23, No. 16, 21477–21489, 2015.
3. Castellanos, G. W., P. Bai and J. Gómez Rivas, "Lattice resonances in dielectric metasurfaces", J. Appl. Phys, Vol 125, Issue 21, 213105, 2019.
4. Pavlov, S. I. et. al. "Bound states in the continuum in a waveguide structure covered by a two-dimensional square array of gold nanodisks", Phys. Rev. B, Vol. 108, Issue. 20, 205425, 2023.

Взаимная ориентационная динамика стабилизированных радикалов, CH_3 , и матричных молекул, CH_4 , в твёрдом метане в температурном диапазоне 1.4 - 35 К

Дмитриев Ю. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: dmitrievyurij@gmail.com

Метильные радикалы, CH_3 , стабилизированные в матрице твёрдого метана, CH_4 , представляют собой систему «квантовый ротатор в матрице квантовых ротаторов» даже при температурах образца, значительно больших гелиевых. Это является следствием малой вращательной постоянной, $B = 6.76$ К, для вращения вокруг оси третьего порядка, C_3 , свободной молекулы, в результате чего расстояние по энергии между нижними вращательными состояниями составляет около 20 К. Для описания квантового ротатора в жидких и твёрдых средах квантовых частиц недавно была предложена [1] и активно развивается [2, 3] модель новой квазичастицы – ангулона, представляющего примесную молекулу, как частицу - ротатор в «шубе» из фононов или других многочастичных возбуждённых состояний матричной среды, обладающих угловым моментом [3]. До настоящего времени единственными экспериментами, на которых базируется эта модель являются опыты по захвату молекул в нанокapли сверхтекучего гелия. В твёрдом метане в качестве многочастичных возбуждённых состояний могут, в частности, выступать квазичастицы топоны - коллективные ориентационные движения молекул, существование которых было предложено для описания особенностей температурного поведения удельной теплоёмкости твёрдого CH_4 [4] и нашло косвенное подтверждение в особенностях ориентационного движения CH_3 в матрице CD_4 [5].

Из прикладных значений системы CH_3/CH_4 можно выделить её роль в химических процессах, протекающих в холодных облаках в межзвездном пространстве, на поверхности комет и в атмосфере планет Солнечной системы и их спутников. Стартовым этапом для последующей цепочки низкотемпературных химических реакций в твердом метане с выходом тяжелых углеводородов является фотолиз метана с образованием метильных

радикалов. Этан, который является вторым по распространенности в атмосферах планет и в космическом пространстве углеводородом после CH_4 эффективно образуется при низких температурах в реакции рекомбинации радикалов CH_3 . Отметим также роль твёрдого метана, как перспективного холодного замедлителя нейтронов, радиационная стойкость которого под нейтронным пучком ограничивается образованием определённого количества радиолитического водорода и «замороженных» радикалов, включая метильные.

В настоящей работе получило развитие ЭПР-исследование обнаруженного ранее эффекта корреляции ориентационного движения стабилизированного в диапазоне температур 1.4 – 4.2 К метильного радикала с ориентационным движением молекул матрицы CH_4 (CD_4) [6, 7]. Измеренная при гелиевых температурах [6] относительная интенсивность запрещённых электронно-ядерных переходов радикалов предполагает определённую предпочтительную ориентацию соседних молекул CH_4 по отношению к примесной CH_3 -молекуле в *A*-симметричном состоянии, сохраняющуюся в динамике их взаимного ориентационного движения. В настоящей работе показано, что описанный эффект в том же температурном диапазоне наблюдается и для радикалов в *E*-симметричном состоянии, ориентационное движение которых во многих матрицах заметно отличается от движения *A*-симметричных радикалов. Представлены результаты экспериментов по системе CH_3/CH_4 при температурах выше гелиевых, вплоть до 35 К. Обнаружено уменьшение при высоких температурах интенсивности сателлитов, соответствующих запрещённым переходам, что свидетельствует о частичном рассогласовании ориентационного движения радикала и матричных частиц. Температура перехода от низкотемпературной фазы взаимной ориентации частиц к высокотемпературной фазе, т. е. локального (вблизи примесного) облёба радикала CH_3) «ориентационного плавления» с сохранением частичной упорядоченности молекул, определена в диапазоне 9 – 13 К, что заметно меньше температуры 20.4 К ориентационного фазового перехода в твёрдом CH_4 .

Список литературы

1. Schmidt R., Lemesko M., Rotation of quantum impurities in the presence of a many-body environment, *Phys. Rev. Lett.*, volume. 114, 203001, 2015
2. Liu Y. Y., Cui Y., Shang X. Z., Yang R. B., Li Z. Q., Wang Z. W., Theory of all-coupling angulon for molecules rotating in many-body environment, *J. Chem. Phys.*, volume. 159, 114305, 2023
3. Zeng Z., Yakaboylu E., Lemesko M., Shi T., Schmidt R., Variational theory of angulons and their rotational spectroscopy, *J. Chem. Phys.*, volume. 158, 134301, 2023
4. Захаров А. Ю., Леонтьева А. В., Прохоров А. Ю., Эренбург А. И., Аномальные свойства, проявляемые кристаллическим метаном в интервале 60 - 70 К, ФТТ, том. 56, № 7, 1446 - 1450, 2014
5. Prokhorov A. Yu., Leont'eva A. V., Dmitriev Yu. A., The rotation of methane molecules in the crystalline state above and below the temperature of the alfa-beta transition, *J. Phys: Conf. Ser.*, volume. 1352, 012041, 2019
6. Дмитриев Ю. А., ЭПР-спектроскопия вращательных состояний радикалов CH_3 в твёрдом CH_4 при гелиевых температурах, *Оптика и спектроскопия*, том. 132, № 11, 1108 - 1111, 2024

7. Dmitriev Yu. A., Benetis N. P., Quantum impurity rotator in a matrix of quantum rotors: Electron paramagnetic resonance dynamics of CH_3 in solid CD_4 matrix, J. Phys. Chem. A., volume. 122, 9483 - 9491, 2018

Оптические и морфологические свойства композитной структуры a-SiC:H/Ag/c-Si

Пригода К.В.¹, Большаков В.О.¹, Ерина А.А.¹, Марков Д.П.¹, Грудинкин С.А.¹, Жарова Ю.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kristina_prigoda@mail.ru

В данной работе создана композитная структура типа «полупроводник-металл-полупроводник», представляющая собой покрытую аморфным гидрогенизированным карбидом кремния (a-SiC:H) островковую плёнку серебра (Ag), осаждённую на монокристаллическую кремниевую подложку (c-Si). На сегодняшний день существует небольшое количество работ, посвященных таким структурам, поэтому изучение их свойств является интересной и актуальной задачей. Серебро имеет высокую отражательную способность, а также обладает плазмонными свойствами в видимом диапазоне спектра, благодаря чему существует большое разнообразие серебряносодержащих структур и предложений их практического применения в разных областях [1,2]. Пленки a-SiC:H обладают превосходными химическими и физическими свойствами, такими как: широкая запрещенная зона (1,4–4 эВ), прозрачность в видимом диапазоне, высокая стойкость к коррозии, а также термическая и химическая стабильность [3]. Комбинация этих двух материалов открывает новые горизонты для создания устройств с уникальными оптическими свойствами [4,5]. Ожидается, что частицы Ag, покрытые прозрачным слоем a-SiC:H, будут иметь большую стойкость к внешним воздействиям, что сделает их более долговечными в различных приложениях. Целью данной работы являлось изучение оптических характеристик композитной структуры a-SiC:H/Ag/c-Si и поиск возможных практических применений.

В этой работе для создания островковых плёнок Ag на поверхности c-Si применялся простой, недорогой и воспроизводимый метод химического осаждения Ag из раствора $0.02 \text{ M AgNO}_3 + 5 \text{ M HF}$ (в объёмных соотношениях 1:1, 1:3, 1:5) в течение 30 с. В качестве исходных подложек использовались пластины c-Si p-типа с $\rho = 1 - 10 \text{ Ом} \times \text{см}$ и кристаллографической ориентацией (111). Затем на полученные островковые плёнки серебра на поверхности c-Si был нанесен слой a-Si_{1-x}C_xH методом плазмохимического газозафазного осаждения из смеси CH_4 , SiH_4 и Ag. Соотношение газовых потоков углерод- и кремнийсодержащих компонентов $\text{CH}_4/[\text{CH}_4 + \text{SiH}_4] = 0.8$, что примерно соответствует составу пленки с $x = 0.58$. Толщина слоя a-SiC:H зависела от времени осаждения. В результате были созданы композитные структуры a-SiC:H/Ag/c-Si. С помощью растровой электронной микроскопии была изучена морфология синтезированных структур. По изображениям поперечного сечения островковых плёнок серебра были определены средние толщины слоев Ag для разных образцов.

Далее методом спектральной эллисометрии были изучены оптические свойства островковых плёнок Ag на c-Si до и после нанесения на них слоя a-SiC:H. При углах падения света от 70° до 79° на спектральной зависимости эллисометрического угла Ψ для структуры a-SiC:H/Ag/c-Si, где толщина слоя a-SiC:H составила ~50 нм, наблюдается провал на длине волны ~463 нм. При анализе поведения эллисометрического угла Δ для данного образца было выявлено, что при значении длины волны ~463 нм поляризация отраженного света меняет направление с правой на левую. При углах падения света от 50° до 79° на длине волны ~697 нм обнаружено, что значение угла Ψ приближается к 90°, принимая максимальное значение (~90°) при угле падения света 70°. При этом свет меняет направление поляризации с левой на правую, что означает преобладание р-поляризованной компоненты вектора напряженности электрического поля над s-поляризованной.

Затем были измерены рефлектометрические спектры (R_p и R_s) полученных структур, с помощью которых были подробнее охарактеризованы оптические свойства и определены положения объёмного плазмонного резонанса островковой плёнки серебра. Поведение спектров отражения согласуется с описанными выше особенностями, наблюдаемыми при эллисометрических измерениях. На спектральных зависимостях R_s при разных углах падения была выявлена особенность: в диапазоне 700-707 нм коэффициент отражения в s-поляризации стремится к нулю. Данная особенность была обнаружена только для структуры a-SiC:H/Ag/c-Si и не выявлена в спектрах островковой плёнки. При этом чем ближе угол падения света к 70°, тем ближе значения R_s в диапазоне 700-707 нм к нулю.

Список литературы

1. O.E. Eremina, N.R. Yarenkov, G.I. Bikbaeva, O.O. Kapitanova, M.V. Samodelova, T.N. Shekhovtsova, I.E. Kolesnikov, A.V. Syuy, A.V. Arsenin, V.S. Volkov, G.I. Tselikov, S.M. Novikov, A.A. Manshina, I.A. Veselova. Silver nanoparticle-based SERS sensors for sensitive detection of amyloid- β aggregates in biological fluids, *Talanta*, 266 (1), 124970 (2024). DOI: 10.1016/j.talanta.2023.124970
1. Tabarov, K. Prigoda, E. Popov, A. Ermina, V. Levitskii, D. Krylov, O. Andreeva, A. Gazizulin, V. Bolshakov, V. Tolmachev, D. Markov, I. Amosova, T. Timoshicheva, A. Gorshkov, D. Danilenko, V. Vitkin, Yu. Zharova. Detection of adenovirus using dendritic silver substrates combined with SERS and random forest algorithms, *Applied Surface Science*, 682, 161771 (2025). DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.161771
2. В.А. Васильев, А.С. Волков, Е. Мусабеков, Е.И. Теруков, В.Е. Челноков, С.В. Чернышев, Ю.М. Шерняков. Фотолюминесценция аморфных пленок a-Si_{1-x}C_x: H, ФТП, 24 (4), 710 (1990).
3. M. Nur-E-Alam, M.K. Basher, M. Vasiliev, N. Das. Physical vapor-deposited silver (Ag)-based metal-dielectric nanocomposites for thin-film and coating applications, *Applied Sciences*, 11(15), 6746 (2021). DOI: 10.3390/app11156746
4. N. Zhang, D.J. Dai, J.Y. Fan. Plasmon-assisted photoluminescence enhancement of SiC nanocrystals by proximal silver nanoparticles. *Applied Surface Science*, 258 (24), 10140 (2012). DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.06.093

Увеличение эффективности сбора излучения центров окраски кремний-вакансия из алмазных микроскопических полусфер с помощью стеклянной микросферы

Медведев А. В.¹, Грудинкин С.А.¹, Феоктистов Н.А.¹.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Medvedev@gvg.ioffe.ru

Люминесцентные изолированные алмазные частицы с внедренными центрами окраски кремний-вакансионными (SiV) привлекают внимание в качестве твердотельных источников одиночных фотонов для квантовой физики и технологии [1]. При комнатной температуре спектр фотолюминесценции (ФЛ) центров окраски SiV в алмазе состоит из сильной бесфоновой линии при 738 нм и слабой вибронной полосы.

Эффективность вывода излучения центров SiV из алмаза ограничено вследствие высокого показателя преломления алмаза ($n = 2.4$), которому соответствует угол полного внутреннего отражения 24.5° . Увеличение эффективности вывода излучения можно добиться за счет введения центров окраски в микроскопические алмазные частицы полусферической формы [2]. Однако большой телесный угол вывода излучения из таких алмазных полусфер требует использования дорогих микрообъективов с большой апертурой, которые имеют малое рабочее расстояние для достижения необходимой эффективности сбора излучения, что ограничивает их практическое применение.

В настоящей работе на подложке из сапфира методом микроволнового плазмохимического газофазного осаждения (MWCVD) синтезированы изолированные алмазные частицы полусферической формы с введенными в процессе роста центрами окраски SiV [3]. Размер алмазных частиц составлял 2-3 мкм.

Использование в схеме регистрации ФЛ стеклянной микросферы диаметром 200 мкм, расположенной между подложкой с алмазными частицами и микрообъективом, позволило почти в 10 раз увеличить интенсивность бесфоновой линии ФЛ центров окраски, так как благодаря ей осуществлялось десятикратное сужение диаграммы направленности излучения в направлении микрообъектива с численной апертурой $NA=0.9$. В такой схеме регистрации микросфера выполняла роль толстой фокусирующей линзы с эффективной численной апертурой, равной примерно 4 и фокусным расстоянием ~ 50 мкм от ее задней поверхности.

Таким образом, благодаря эффективной коллимации фотолюминесценции стеклянной микросферой, достигнуто многократное увеличения сбора излучения с помощью малоапертурных микрообъективов. Такой способ прост в реализации, и перспективен для увеличения эффективности регистрации люминесценции из структур с большим показателем преломления.

Список литературы

1. Schäfer, M.; Kambs, B.; Herrmann, D.; Bauer, T.; Becher, C. Two-Stage, Low Noise Quantum Frequency Conversion of Single Photons from Silicon-Vacancy Centers in Diamond to the Telecom C-Band. //Advanced Quantum Technologies 2023, V.8, p.2300228.
2. P. Siyushev et al. Monolithic diamond optics for single photon detection// Applied Physics Letters. 2010, V. 97, p. 241902.
3. Grudinkin S. A., Feoktistov N. A., Medvedev A. V., Bogdanov K. V., Baranov A. V., Vul' A. Y. and Golubev V. G . Luminescent isolated diamond particles with controllably embedded silicon-vacancy color centers //J. Phys. D: Appl. Phys. 2012, V.45, p.062001.

Влияние дефектов на люминесцентные свойства YAG

Гусев Г.А.¹, Дымченко В.С.¹, Сырников П.А.¹, Заморянская М.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: ggusev@mail.ioffe.ru

Иттрий-алюминиевый гранат (YAG) активно применяется в качестве лазерных кристаллов, сцинтилляторов и люминофоров. Он обладает такими важными свойствами, как высокая химическая и механическая стойкость, высокий коэффициент преломления и собственная люминесценция в области УФ и синего диапазона [1]. Также, благодаря высокому световыходу, широко применяются YAG, активированные редкоземельными ионами (РЗИ).

Собственная люминесценция в YAG связана с наличием точечных дефектов. В частности, таких как антисайты типа YAl^{Oct} . Вклад в люминесценцию также могут давать автолокализованные экситоны [2]. Предполагается, что содержание таких дефектов может зависеть от температуры получения кристалла либо керамического образца. Чем выше температура, тем больше образуется дефектов типа антисайт YAl^{Oct} . Для некоторых оксидных материалов показано, что уровни собственной люминесценции могут участвовать в передаче энергии возбуждения к активаторам-центрам люминесценции [3]. Это может способствовать увеличению эффективности люминесценции. Поэтому важной задачей является исследование возможности управления содержанием точечных дефектов в материале и более подробное изучение влияния этих дефектов на люминесцентные свойства неактивированных YAG.

Цель настоящей работы – исследовать влияние дефектов на люминесцентные свойства YAG.

Хотя YAG считается довольно хорошо изученным материалом, по литературным данным, исследования в основном проводились при фото-возбуждении [4]. Однако, как правило, энергии фотонов видимого и ближнего УФ недостаточно для возбуждения люминесценции собственных дефектов в широкозонных материалах. В настоящей работе главным

методом исследования является локальная катодолюминесценция (КЛ, возбуждение электронами средних энергий 5–30 кэВ). В спектрах КЛ возможно наблюдать полосы излучения, для возбуждения которых требуется энергия фотонов вакуумного УФ.

В работе были исследованы образцы неактивированного иттрий-алюминиевого граната, полученные методом горизонтально направленной кристаллизации (ГНК). Образцы для исследования отличались окраской, связанной с содержанием и типом собственных дефектов. Образцы были исследованы методом КЛ, получены спектры пропускания и проведен рентгеноструктурный анализ. Для исследования природы дефектов был проведен отжиг образцов и исследовано влияние отжига на спектры пропускания и КЛ. На основании проведенных исследований были сделаны выводы о природе полос КЛ неактивированных YAG.

Список литературы

1. V. Babin, K. Blazek, A. Krasnikov, K. Nejezchleb, M. Nikl, T. Savikhina, S. Zazubovich, Luminescence of undoped LuAG and YAG crystals. *Phys. Status Solidi (c)*, 2(1) (2005) 97–100.
2. N. Shiran, A. Gektin, K. Hubenko, V. Nesterkina, P. Arhipov, S. Tkachenko, O. Sildetskiy, Defects related luminescence in yttrium-aluminum garnet crystals. *Funct. Mater.* 23 (2016) 191–196
3. M.V. Nazarov, D.Y. Jeon, J.H. Kang, E.J. Popovici, L.E. Muresan, M.V. Zamoryanskaya, B.S. Tsukerblat, Luminescence properties of europium-terbium double activated calcium tungstate phosphor, *Solid State Commun.* 131 (2004) 307–311.
4. C.R. Varney, S.M. Reda, D.T. Mackay, M.C. Rowe, F.A. Selim, Strong visible and near infrared luminescence in undoped YAG single crystals. *AIP Advances*, 1(4) (2011).

Сочетание методов люминесцентной и время-разрешенной спектроскопии для измерения температуры с помощью наносенсора на основе комплексов $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$

Буриков С. А., Федянина А.А., Доленко Т.А.

МГУ имени М. В. Ломоносова

e-mail: sergey.burikov@gmail.com

В настоящее время по-прежнему актуальной является проблема разработки бесконтактного метода измерения локальной температуры с высокой точностью. В области люминесцентной термометрии был достигнут значительный прогресс [1], однако серьезной проблемой люминесцентной нанотермометрии биологических объектов остается наличие аутофлуоресценции биологической ткани, которая перекрывается со спектром фотолюминесценции большинства наночастиц-термосенсоров. С этой точки зрения существенным преимуществом комплексов, легированных редкоземельными ионами, является то, что в них можно реализовать апконверсионную люминесценцию, при которой два или более фотона возбуждающего излучения ближнего ИК диапазона превращаются в один люминесцентный фотон с более высокой энергией [2].

Для реализации апконверсионной люминесценции инертная матрица легируется двумя типами редкоземельных ионов (РЗИ), один из которых обладает большим сечением поглощения (сенситализатор), а другой – интенсивной люминесценцией (активатор). Сенситализатор поглощает возбуждающее излучение и передает возбуждение на активатор. Спектр люминесценции таких комплексов представляет собой набор полос в видимой и ближней инфракрасной области спектра.

Для построения сенсора температуры на базе комплексов с РЗИ обычно используется зависимость от температуры таких параметров, как интенсивность выбранной полосы люминесценции, соотношение интенсивностей полос люминесценции. Основная проблема заключается в том, что зависимость интенсивности люминесценции комплексов с РЗИ от интенсивности возбуждающего излучения нелинейна. Это приводит к тому, что точность определения температуры существенно изменяется при переходе от одной среды к другой [3].

В данной работе предложен новый подход к определению локальной температуры среды с помощью нанок комплексов $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ с апконверсионной люминесценцией. Разработанный метод основывается на совместном использовании температурных зависимостей отношения интенсивностей полос люминесценции в районе 450 и 475 нм и положения центра масс кинетической кривой полосы люминесценции в районе 800 нм. Важной особенностью предлагаемого подхода является то, что используется зондирование среды с помощью мощных коротких лазерных импульсов. Показано, что в таком режиме зондирования за счет реализации режима насыщения люминесценции исчезает зависимость соотношения интенсивностей разных полос спектра люминесценции от интенсивности накачки.

Сочетание методов люминесцентной и время-разрешенной спектроскопии для измерения температуры с помощью комплексов $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ позволило существенно повысить универсальность термосенсора. Новый подход обеспечивает не только высокую точность определения локальной температуры – вплоть до 0.5 °C, но и позволяет определять температуру в любой биологической среде с одинаковой точностью.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00411, <https://rscf.ru/project/25-22-00411/>

Список литературы

1. Drami'canin, M.D. Luminescence Thermometry with Nanoparticles: A Review. *Nanomaterials* 2023, 13, 2904. <https://doi.org/10.3390/nano13212904>
2. F. Auzel, History of upconversion discovery and its evolution, *J. Lumin.* 223 (2020) 116900, <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116900>.
3. O.E. Sarmanova, S.A. Burikov, K.A. Laptinskiy, O.D. Kotova, E.A. Filippova, T.A. Dolenko. In vitro temperature sensing with up-conversion $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ -based nanocomposites: Peculiarities and pitfalls // *Spectrochim. Acta Part A*, 241 (2020), 118627.

Оптически индуцированная анизотропия полимерных пленок поли(9,9-диоктилфлуорена-альта-бензотиадиазола)

Зедоми Т.Э.¹, Котова Л.В.¹, Кочерешко В.П.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: tomazedomi@mail.ru

Современные технологии стремительно развиваются, и важным компонентом этого прогресса являются полимерные органические полупроводники. Одним из значительных преимуществ полимерных органических полупроводников является возможность обработки сопряжённых полимеров, что позволяет создавать функциональные структуры. Важным классом сопряжённых полимеров являются полифлуорены, они привлекают внимание благодаря простоте применения и широкому спектру оптических и электронных свойств.

Исследовались оптические спектры пленок полимера F8BT (поли(9,9-диоктилфлуорена-альта-бензотиадиазол)). Этот полимер используется как зеленый эмиттер для светоизлучающих диодов и транзисторов [1]. F8BT обладает высокой подвижностью электронов, формирует однородные пленки и имеет высокий внешний квантовый выход достигающий 60-80% [2]. Эти характеристики позволяют F8BT эффективно функционировать в фотогальванических устройствах, лазерах, а также в дисплеях и других устройствах гибкой оптоэлектроники [3, 4].

В настоящей работе были изучены спектры пропускания поляризованного света пленок F8BT различной толщины, изготовленных методами капельного литья и центрифугирования из раствора. Анализировалась зависимость этих спектров от температуры и дополнительного ультрафиолетового излучения. На образец падал линейно поляризованный свет, измерялись параметры Стокса прошедшего через образец света в видимой области спектра. Образцы подвергались УФ облучению с длиной волны порядка 300 нм и дозой 25, 600 и 1500 мДж, а также термическому отжигу при температуре 200 °С.

Получены поляризационные характеристики спектров пропускания образцов: степень циркулярной поляризации, степень линейной поляризации, степень линейной поляризации в осях, повернутых под углом 45 градусов относительно плоскости падения, – как до воздействий, так и после облучения УФ; после облучения УФ и последующего отжига при температуре 200 °С в течение 40 минут; а также после облучения УФ и последующего отжига при температуре 200 °С в течение 80 минут. Данные, собранные в ходе исследований, демонстрируют ряд интересных особенностей.

Было обнаружено, что УФ облучение приводит к сильному увеличению оптической анизотропии пленок. Это проявляется в значительном увеличении величины конверсии линейной поляризации в круговую и наоборот связанной с явлением двулучепреломления. Последующий отжиг полимера приводил к частичному восстановлению изотропности пленок. Наблюдаемое явление объясняется изменением взаимной ориентации мономеров за счёт фотовозбуждения имеющихся в составе молекулы одинарных химических связей.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 24-22-20059) и гранта Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с договором № 24-22-20059 от 22 мая 2024 г.

Список литературы

1. Gioti M., Optical, photophysical, and electrooptical studies on slot-die polyfluorene-based flexible OLED devices, *Opt. Mater. Express*, 11, 1442-1456, 2021.
2. Sardone L., Sabatini C., Latini G., Barigelletti F., Marletta G., Cacialli F., Scanning force microscopy and optical spectroscopy of phase-segregated thin films of poly(9,9'-dioctylfluorene-alt-benzothiadiazole) and poly(ethylene oxide), *Journal of Materials Chemistry*, 17, 1387-1391, 2007.
3. Masashi M., Ryutaro K., Chihaya A., F8BT Oligomers for Organic Solid-State Lasers, *ACS Applied Materials&Interfaces*, 12 (25), 28383-28391, 2020.
4. Zhang Y., Blom P., Electron and hole transport in poly(fluorene-benzothiadiazole), *Appl. Phys. Lett.*, 98 (14), 143504, 2011.

Выделение гомогенных флуорофоров, получаемых на разных этапах гидротермального синтеза углеродных точек

Лаптинский К. А., Вервальд А.М., Корепанова А.А., Доленко Т.А.

МГУ им. М. В. Ломоносова

e-mail: laptinskiy@physics.msu.ru

На сегодняшний день у научного сообщества практически не осталось сомнений в том, что совокупность свойств, присущая углеродным точкам (УТ), позволяет использовать эти наночастицы в различных задачах сенсорики. Доказательством этому является не только рост количества научных публикаций, но и растущее количество патентов, в которых предлагается использование УТ в качестве сенсоров. Важным этапом создания эффективного наносенсора, принцип действия которого основывается на его фотолюминесцентных свойствах, является достижение гомогенности флуорофоров, чтобы в максимально возможной степени обеспечить не только стандартизацию наносенсоров, но и большую однозначность изменения и чувствительность фотолюминесцентных свойств при изменении искомых параметров. К сожалению, на сегодняшний день публикации, описывающие процессы и результаты фракционирования УТ, синтезированных гидротермальным методом, носят относительно немногочисленный характер. Однако, уже наглядно продемонстрировано, что даже такой популярный метод фракционирования как использование диализных мешков не позволяет достичь выделения гомогенных структур [1].

В настоящей работе рассматривается выделение гомогенных флуорофоров, полученных на разных этапах гидротермального синтеза УТ из лимонной кислоты и этилендиамина. Ранее полученные нами результаты [2] позволили определить границы параметров этапов синтеза, при которых образуются УТ, отличные по своим оптическим свойствам. Для выделения гомогенных флуорофоров использовался гель-электрофорез, в результате

которого удалось выделить до 6-ти различных фракций УТ, образующихся на одном из этапов гидротермального синтеза. Для каждой выделенной фракции проведен анализ оптических свойств методами фотолюминесцентной спектроскопии, фотометрии, время-разрешенной спектроскопии, конфокальной КР-микроскопии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-01042, <https://rscf.ru/project/23-72-01042/>

Список литературы

1. Ullal N., Mehta R., Sunil D. Separation and purification of fluorescent carbon dots – an unmet challenge, *The Analyst*, vol. 149 (6), 1680–1700, 2024
2. Vervald A., Laptinskiy K., Khmeleva M., Dolenko T. Toward carbon dots from citric acid and ethylenediamine, part 1: Structure, optical properties, main luminophore at different stages of synthesis, *Carbon Trends*, vol. 19, 100452, 2025.

Управляемое подавление дефектной моды фотонного кристалла с графеновыми частицами

Глухов И. А.^{1,2}, Моисеев С. Г.^{1,2}

¹Ульяновский государственный университет

²УФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

e-mail: glukhov91@yandex.ru

Спектральные характеристики фотонных кристаллов могут быть модифицированы за счет нарушения периодичности следования материальных слоев, в результате чего в фотонной запрещенной зоне (спектральном интервале, в котором оптическая структура полностью отражает электромагнитную волну) появляется мини-зона пропускания, отвечающая «дефектной» локализованной моде. Особый интерес вызывает структура типа микрорезонатора Фабри–Перо, представляющая собой «дефектный» (дополнительный) слой, помещенный между двумя фотонными кристаллами. Применение дефектных слоёв из материалов с нелинейными или управляемыми свойствами позволяет модифицировать спектральную линию дефектной моды, в том числе реализовать управление её амплитудой, поляризацией и частотой [1-4].

В настоящей работе показана возможность управления в терагерцевом диапазоне частот коэффициентом пропускания в мини-зоне, связанной с дефектной модой, в фотонном кристалле с графеновыми частицами (ГЧ). ГЧ круглой формы выполнены из двойного графенового слоя, энергия Ферми которого контролируется с помощью приложенной разности электрических потенциалов [5]. ГЧ электрически связаны тонкими графеновыми проводниками и расположены в одной плоскости внутри дефектного слоя фотонного кристалла. Для определенности рассмотрена фотонная структура, выполненная из непоглощающих слоев (Si, SiO₂) с толщинами, отвечающими брэгговской длине волны 150 мкм. ГЧ имеют диаметр много меньше длины волны применяемого излучения (от единиц до нескольких десятков микрон) и размещены в полимере TOPAS. Спектральные характеристики

и распределение поля по фотонной структуре рассчитаны на основе метода матриц переноса и верифицированы с помощью численного моделирования методом конечных элементов.

В отличие от сплошного (неструктурированного) графена массив ГЧ взаимодействует с полем падающей электромагнитной волны резонансным образом, что приводит к появлению особенностей (пиков/провалов) в спектральных характеристиках на частоте плазмонного резонанса ГЧ. Результаты моделирования показывают, что период массива влияет на амплитуду резонансного пика и в значительно меньшей степени – на частоту плазмонного резонанса. Изменения радиуса и энергии Ферми (приложенной разности электрических потенциалов) ГЧ приводят к заметному изменению как амплитуды, так и частоты резонанса. Определены дизайн и местоположение массива ГЧ в дефектном слое, обеспечивающие высокий контраст пропускной способности фотонного кристалла на частоте дефектной моды при варьировании энергии Ферми ГЧ в диапазоне от 0 до 0.5 эВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-30017).

Список литературы

1. Ветров С.Я., Авдеева А.Ю., Тимофеев И.В., Особенности спектральных свойств одномерного фотонного кристалла с резонансным дефектным слоем нанокompозита, ЖЭТФ, том 140, вып. 5, стр. 871-878 (2011).
2. Елисеева С.В., Остаточников В.А., Семенцов Д.И., Подавление дефектной моды фотонного кристалла с магнитным дефектом в области ферромагнитного резонанса, Физика твердого тела, 2013, том 55, вып. 1, стр. 61-64 (2013).
3. Glukhov I. A., Dadoenkova Y. S., Bentivegna F. F. L., Moiseev S. G., Deterministic aperiodic photonic crystal with a 2D array of metallic nanoparticles as polarization-sensitive dichroic filter, Journal of Applied Physics, V. 128, Issue 5, pp. 053101 (2020).
4. Moiseev S.G., Glukhov I.A., Dadoenkova Y.S., Bentivegna F.F.L., Polarization-selective defect mode amplification in a photonic crystal with intracavity 2D arrays of metallic nanoparticles, JOSA B, V. 36, No. 6, pp. 1645-1652 (2019).
5. Zhou Q., Qiu Q., Huang Z., Graphene-based terahertz optoelectronics, Optics & Laser Technology, V. 157, pp. 108558 (2023).

Выращивание кристаллов K_2O x nGa_2O_3 из раствора в расплаве KF и исследование их оптических свойств

Носов Ю. Г.¹, Шапенков С.В.^{1,2}, Вывенко О.Ф.², Варыгин Г.В.^{1,2}, Щеглов М.П.¹, Кицай А.А.¹, Чикиряка А.В.¹, Николаев В.И.¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия.

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.

e-mail: Yu.Nosov@mail.ioffe.ru

Одним из наиболее перспективных широкозонных полупроводников для нового поколения силовой и оптоэлектроники в настоящее время рассматривается оксид галлия (III),

Ga_2O_3 . Однако Ga_2O_3 обладает только электронным типом проводимости и создание устройств на его основе упирается в проблему поиска родственных ему широкозонных полупроводников р-типа, пригодных для создания гетероструктур. К соединениям с такими свойствами относятся безводные галлаты различных металлов (ZnGa_2O_4 , LiGa_5O_8 и др.) [1]. В данной работе были выращены кристаллы одного из представителей этого класса [2] - галлата калия с формулой $\text{K}_2\text{O} \times n\text{Ga}_2\text{O}_3$ и впервые проведены исследования его оптических свойств.

Образцы $\text{K}_2\text{O} \times n\text{Ga}_2\text{O}_3$ были получены из раствора $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (4N) в расплаве KF (ЧДА) путем медленного испарения растворителя. Расплавление производилось в платиновом тигле на воздухе, температура расплава выдерживалась при 1200 °С. В результате образовались пластинчатые кристаллы гексагональной формы с линейными размерами порядка 1-3 мм при толщине ~0,5 мм. Полученные образцы были исследованы методами рентгеновской дифракции (XRD), оптической спектроскопии пропускания (СП), аналитической сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), включая энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию (EDS) и катодоллюминесценцию (КЛ).

Анализ XRD в режиме θ - 2θ дал серию отражений от базисной и других плоскостей, которые были индексированы в гексагональной ячейке галлата $\text{K}_2\text{O} \times 8\text{Ga}_2\text{O}_3$ [2] с определенными параметрами $a = 5,80 \text{ \AA}$ и $c = 23,5 \text{ \AA}$. Средний состав, вычисленный по данным EDS, близок к результату XRD по соотношению K_2O и Ga_2O_3 : $\text{K}_2\text{O} \times 7,75 \text{ Ga}_2\text{O}_3$. Большое значение параметра c ($>2 \text{ нм}$) связывают со слоистой структурой галлата [2], образованной двумя подрешетками из слоев оксидов галлия и калия, соответственно, чередующихся в направлении [0001].

Вольт-амперные характеристики, измеренные при комнатной температуре, при пропускании тока через омические контакты (InGa эвтектика), были линейными при малых напряжениях смещения ($\pm 2 \text{ В}$) и характеризовались омическим сопротивлением 2-3 ГОм.

Спектры оптического пропускания (СП), измеренные в диапазоне длин волн от 260 до 750 нм обнаружили небольшую ступеньку поглощения около 700 нм. Основной край поглощения СП располагался при ~310 нм, форма которого хорошо аппроксимировалась с помощью построения Тауца для непрямых переходов, что позволило впервые для $\text{K}_2\text{O} \times n\text{Ga}_2\text{O}_3$ определить величину оптической ширины запрещенной зоны (E_g) в ~ 3,77 эВ.

Изображения гексагональных кристаллов в СЭМ выявили пластинчатый рельеф поверхности, который был сформирован выступающими частями прорастающих гексагональных микропризм. Спектры КЛ в диапазоне 250-800 нм содержали три характерные полосы, одна из которых была близка по положению 300-450 нм и форме спектрам КЛ, полученным в эпитаксиальных пленках Ga_2O_3 [3], что указывает на наличие участков чистого оксида галлия. Второй спектральной особенностью КЛ являлся интенсивный узкий пик при ~715 нм (т.е. вблизи небольшой ступеньки в СП), который связывают с внутри-центровыми переходами в примесных ионах Fe^{3+} [4], источником которых, вероятно, выступает исходный ЧДА порошок KF. Третья наиболее интенсивная широкая полоса с

положением максимума около 550 нм не может быть отнесена к оксиду галлия и является, по-видимому, характерной люминесценцией для $K_2O \times 8Ga_2O_3$.

Таким образом, были получены высокоомные кристаллы близкие по составу к $K_2O \times 8Ga_2O_3$ миллиметровых размеров с оптической шириной запрещенной зоны $E_g \sim 3,77$ эВ, которые демонстрируют неоднородные люминесцентные свойства и пластинчатую структуру, что может быть связано со слоистой сверхструктурой галлата. Ее подтверждение требует дополнительных исследований, например, методами просвечивающей электронной микроскопии.

Список литературы

1. S. Bairagi, et al., Opt. Mater. Express **12**, 3284 (2022).
2. Y. Bao et al., Solid State Ion. **130**, 293 (2000).
3. S. Shapenkov et al., Phys. Status Solidi A **217**, 1900892 (2020).
4. Q. Chen et al., Phys. Rev. B **109**, 165124 (2024).

Магнитные свойства, XPS и NEXAFS спектры $CaCu_3Ti_4O_{12}$, допированного хромом

Симпелева Р. А.¹, Некипелов С.В.², Королева А.В.³, Федорова А.В.³, Макеев Б.А.⁴, Жук Н.А.¹

¹СГУ им. Питирима Сорокина

²Институт физики и математики Коми НЦ УрО РАН

³Санкт-Петербургский государственный университет

⁴Институт геологии Коми НЦ УрО РАН

e-mail: rsimpeleva@mail.ru

В последние годы всё большее внимание исследователей привлекают перовскитоподобные оксидные материалы на основе титаната кальция-меди состава $CaCu_3Ti_4O_{12}$ (ССТО) с гигантскими значениями диэлектрической проницаемости. Особый интерес к ССТО вызван тем, что в отличие от обычных сегнетоэлектрических материалов на основе перовскита, ССТО имеет диэлектрическую проницаемость более 10^4 при комнатной температуре со слабой температурной зависимостью от 100 до 400 К, благодаря чему может найти применение в конденсаторах, запоминающих и других микроэлектронных устройствах. Благодаря структурной гибкости, перовскитоподобная структура весьма толерантна к изо-и гетеровалентным замещениям катионов и кислородным вакансиям, геометрическим искажениям кристаллической решетки, что приводит к многообразию составов и варьированию физико-химических свойств сложных оксидов на их основе. Кристаллическая структура $CaCu_3Ti_4O_{12}$ образована путем трансформации кубической структуры перовскита $CaTiO_3$ через изменение угла наклона октаэдров TiO_6 из-за замещения катионов Ca^{2+} несоразмерными Ян-теллеровскими катионами Cu^{2+} . Несмотря на большое количество исследований, посвященных $CaCu_3Ti_4O_{12}$, природа изменения его диэлектрических свойств до сих пор остается предметом активных обсуждений. Первоначально обнаружение гигантской диэлектрической постоянной в ССТО объяснялось так называемой

внутренней поляризацией ионов титана. Дальнейшее исследование диэлектрического поведения ССТО обнаружило необходимость учитывать и внешнюю поляризацию, индуцированную электрическим неоднородным полем между полупроводниковым зерном и границами изолирующего зерна керамических образцов. Таким образом, происхождение диэлектрического поведения ССТО связывают с особенностями кристаллической структуры $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{14}\text{O}_{12}$ и возникновением различных межзеренных эффектов. Все это привело к активным исследованиям влияния различных заместителей в перовскитоподобной структуре на свойства ССТО, а поиск оптимальных характеристик по-прежнему ведется эмпирически. В представленной работе детально исследовано зарядовое состояние катионов металлов методами ультрамягкой рентгеновской спектроскопии и методом магнитного разбавления хромсодержащих твердых растворов $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{14}\text{O}_{12}$. Образцы были исследованы методами NEXAFS-спектроскопии с использованием синхротронного излучения накопителя BESSY II (Берлин, Германия). NEXAFS-спектры были получены методом регистрации полного электронного выхода. XPS-исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ "Физические методы исследования поверхности". XPS-анализ проводили на рентгеновском спектрометре Thermo Scientific ESCALAB 250Xi. Из интерпретации полученных XPS- и NEXAFS 2p-спектров и магнитных данных можно сделать вывод, что в рассматриваемых хромсодержащих твердых растворах ССТО катионы меди и кальция имеют зарядовое состояние +2, катионы титана - +(4- δ), а допированные катионы хрома +3.

Фокусировка электрического поля плоской волны в отверстии диэлектрического кольца

Болкунов М. А.^{1,2}, М.Ф. Лимонов^{1,3}, К.А. Бронников¹

¹Университет ИТМО

²СПбПУ

³ФТИ имени А.Ф. Иоффе

e-mail: mishabolkm@mail.ru

Одним из ключевых элементов диэлектрической фотоники является кольцевой резонатор (КР) с прямоугольным сечением. Высокодобротные резонансы мод шепчущей галереи (МШГ) высокого порядка, возбуждаемые в КР, нашли широкое применение при создании фильтров, модуляторов, делителей оптических сигналов [1,2]. Вместе с тем, модовый состав КР в низкочастотной области имеет свои особенности: в частности, спектр рассеяния состоит из отдельных групп резонансов, называемых «галереями» [3,4]. Каждая галерея начинается с резонанса Фабри-Перо между горизонтальными или вертикальными стенками КР и продолжается набором эквидистантных продольных резонансов с экспоненциально возрастающей добротностью. Использование трех независимых геометрических параметров – внешний радиус, радиус отверстия и высота резонатора – позволяет настраивать положение собственных резонансов в спектре КР и получать такие эффекты сильной связи мод, как связанные состояния в континууме и исключительные точки [5].

Наличие отверстия в КР также предоставляет возможность получения универсальных устройств фотоники, где объем отверстия мог бы заполняться целевым материалом, например, аналитом – при создании сенсоров, или активным материалом – при создании микролазеров. Однако, высокая добротность широко используемых резонансов МШГ подразумевает концентрацию поля моды преимущественно в объеме КР. Таким образом, представляет интерес поиск таких резонансных состояний, где наблюдалось бы усиление (фокусировка) поля в отверстии КР относительно амплитуды поля в падающей волне.

В данной работе с помощью численного моделирования исследовалась зависимость спектра амплитуды электрического поля в коаксиальном отверстии КР от радиуса отверстия при падении плоской волны перпендикулярно плоскости кольца. Заметное увеличение амплитуды поля в геометрическом центре отверстия обнаружено для собственных мод КР с азимутальным индексом $m = 1$ и различными радиальными индексами $r = 1, 2, 3, \dots$, соответствующими различным радиальным галереям резонансов в спектре рассеяния КР. Установлено, что для таких мод при увеличении отношения радиуса отверстия к радиусу кольца R_{in}/R_{out} от 0.1 до 0.8 нормированная амплитуда электрического поля уменьшается с $|E|/|E_0| \approx 15$ до 3 (E_0 – амплитуда в падающей волне) при фиксированном отношении радиуса кольца к его высоте $R_{out}/h = 5$ и диэлектрической проницаемости $\epsilon = 80$ (керамический материал для экспериментов в микроволновом диапазоне). Примечательно, что для относительно большого отверстия с $R_{in}/R_{out} \approx 0.65$ усиление поля составляет $|E|/|E_0| \approx 6.5$, причем для моды самого низкого порядка с $(m, r) = (1, 1)$ на длине волны примерно в два раза большей диаметра КР, то есть данный эффект является субволновым. Для $\epsilon = 12$, соответствующему кремнию в оптическом диапазоне, амплитуда поля снижается в 1,5-4 раза относительно случая $\epsilon = 80$ для малых значений $R_{in}/R_{out} = 0.1-0.3$ и практически не изменяется для больших $R_{in}/R_{out} \approx 0.8$.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00114, <https://rscf.ru/project/23-12-00114/>).

Список литературы

1. W. Bogaerts, P. De Heyn, T. Van Vaerenbergh, K. De Vos, S. Kumar Selvaraja, T. Claes, P. Dumon, P. Bienstman, D. Van Thourhout, and R. Baets, «Silicon microring resonators», *Laser & Photonics Reviews* 6(1), 47–73 (2012).
2. D. G. Rabus and C. Sada, *Integrated Ring Resonators: A Compendium*, Springer Series in Optical Sciences (Springer International Publishing, 2020), 127.
3. N. Solodovchenko, M. Sidorenko, T. Seidov, I. Popov, E. Nenasheva, K. Samusev, and M. Limonov, «Cascades of Fano resonances in light scattering by dielectric particles», *Materials Today* 60, 69–78 (2022).
4. A. P. Chetverikova, M. F. Limonov, M. S. Sidorenko, K. B. Samusev, and N. S. Solodovchenko, «Radial and axial photonic galleries of dielectric rings», *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* 57, 101185 (2023).
5. N. S. Solodovchenko, K. B. Samusev, and M. F. Limonov, «Quadruplets of exceptional points and bound states in the continuum in dielectric rings», *Phys. Rev. B* 109(7), 075131 (2024).

Оптические свойства и кристаллическая структура $\text{Bi}_2\text{Mg}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ta}_2\text{O}_9+\Delta$ со структурой пирохлора

Кетова Д. А.¹, Кржижановская М.Г.², Селютин А.А.², Жук Н.А.¹

¹СГУ им. Питирима Сорокина

²СПбГУ

e-mail: deika.160904@gmail.com

Синтетические пирохлоры вызывают пристальное внимание ученых в связи с проявлением практически полезных физико-химических свойств, таких как протонная проводимость, превосходные фотокаталитические и диэлектрические свойства. Гибкость кристаллической структуры пирохлоров к замещениям катионов и вакансиям в анионной подрешетке позволяет значительно варьировать химический состав соединений и получать сотни комбинаций составов с разнообразными функциональными свойствами. В последнее время основные усилия исследователей сосредоточены на поиске новых представителей этого семейства соединений, среди которых выделяют высокоэнтропийные и многоэлементные пирохлоры, пирохлоры с бескислородной анионной подрешеткой или смешанного типа.

В представленной работе исследована кристаллическая структура и оптические свойства твердых растворов $\text{Bi}_2\text{Cr}_x\text{Mg}_{1-x}\text{Ta}_2\text{O}_9+\Delta$ ($x \leq 0.7$) со структурой пирохлора, синтезированных твердофазным методом. Структурные параметры разупорядоченного пирохлора определены методом Ритвельда (пр. гр. $Fd-3m:2$ (№ 227), $Z=8$). Ионы тантала(V), магния(II) и хрома(III) распределяются в одной системе кристаллографических позиций (16b), ионы висмута(III) смещены в позиции 96g. Кислород разупорядочен и находится в двух кристаллографических позициях, одна из которых (48f) полностью занята, другая (8a) частично вакантна. С ростом содержания магния параметр элементарной ячейки увеличивается от 10.45852(1) Å ($x(\text{Mg})=0.3$) до 10.49991(1) Å ($x(\text{Mg})=0.7$), подчиняясь правилу Вегарда. Зеленого цвета образцы характеризуются пористой микроструктурой со средним продольным размером зерен 0.5 мкм, независимо от соотношения магния/хрома(III). Спектры поглощения хромовых пирохлоров содержат несколько особенностей. Поглощение ниже 400 нм может быть обусловлено межзонными переходами. Плечо на длине волны 450-520 нм связано с d-d электронным переходом $^4A_2 \rightarrow ^4T_1$, характерным для ионов Cr(III). Широкое поглощение при 600-700 нм с максимумом при 650 нм связано с переходом $^4A_2 \rightarrow ^4T_2$ и наблюдается также для растворов солей Cr(III) и отвечает ионам хрома(III) в октаэдрических позициях. Как показали расчеты, ширина запрещенной зоны для прямых разрешенных переходов в образцах $x(\text{Cr})=0.3$; 0.5 и 0.7 составляет 2.14, 2.22 и 2.29 эВ, что соответствует поглощению в интервале длин волн 545–583 нм. При этом с ростом содержания хрома в образцах ширина запрещенной увеличивается и растет энергетический зазор между валентной зоной и зоной проводимости. Можно констатировать, что допирование хромом снижает фотоактивность висмутсодержащего пирохлора. Между тем, ширина запрещенной зоны исследованной керамики близка энергии солнечного излучения, достигающего поверхности нашей планеты и имеющего максимальную

интенсивность (2.1–2.5 эВ). Это обуславливает перспективу использования данных материалов в качестве светопоглощающих элементов для солнечных батарей.

Трансформация спектров поглощения и люминесценции углеродных наноточек под влиянием УФ облучения

Нельсон Д. К.¹, Старухин А.Н.¹, Еуров Д.А.¹, Курдюков Д.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: d.nelson@mail.ioffe.ru

Углеродные наноточки (УТ) являются новым видом люминофоров, привлекающих внимание благодаря удачному сочетанию таких качеств, как яркая флуоресценция, низкая токсичность, дешевизна и относительная простота синтеза. УТ представляют собой квазисферические наночастицы (размером до 10 нм), состоящие из кристаллического графита или турбоэстратного углерода с атомами в состоянии sp^2 гибридизации. Успешное применение УТ в качестве люминофоров в различных приложениях предполагает понимание роли различных внешних факторов в формировании их люминесцентных свойств. Целью настоящей работы явилось исследование влияния ультрафиолетового (УФ) облучения (в области длин волн 250 – 400 нм) на спектральные характеристики УТ.

УТ размером ~ 3 нм были синтезированы методом пиролиза лазерного красителя Нильский красный (НК) в нанопорах мезопористого SiO_2 . Исследовались оптические спектры УТ в коллоидных растворах в ряде органических растворителей. Возбуждение флуоресценции (ФЛ) УТ осуществлялось светом с $\lambda_{exc} = 405$ нм. При комнатной температуре в спектре ФЛ синтезированных УТ доминирует интенсивная полоса красной ФЛ с длиной волны 605 нм. Установлено, что УФ облучение растворов приводит к уменьшению ширины доминантной полосы красной флуоресценции и падению ее интенсивности. В то же время в области коротковолнового крыла полосы формируется отчетливый максимум излучения при ~ 500 нм, который при больших временах облучения становится доминирующим в спектре. Отметим, что интегральная интенсивность ФЛ, нормированная на поглощенную системой на длине волны $\lambda_{exc} = 405$ нм световую мощность, меняется мало, как и соответствующий квантовый выход ФЛ. Исследована зависимость интенсивностей полос красной ($\lambda \approx 605$ нм) и зеленой ($\lambda \approx 500$ нм) ФЛ от продолжительности УФ обработки t . Установлено, что тушение полосы ФЛ при $\lambda \approx 605$ нм сопровождается исчезновением соответствующей полосы ($\lambda \approx 490$ нм) в спектре поглощения УТ. Показано, что интенсивность указанной полосы поглощения уменьшается экспоненциально в зависимости от времени УФ обработки t .

Рассмотрены возможные причины трансформации спектров ФЛ и поглощения УТ под действием УФ облучения, которые связываются с изменением структуры и состава

излучающих центров в УТ под влиянием УФ излучения. Отмечается, что, с одной стороны, влияние УФ излучения на спектр ФЛ УТ требует учета спектрального состава возбуждающего света при применении УТ в качестве люминофоров, а, с другой стороны, открывает возможность управления спектральным составом ФЛ УТ.

XPS, NEXAFS исследования танталата висмута со структурой пирохлора, допированного Cu/Co

Паришуква К. Н.¹, Некипелов С.В.², Королева А.В.³, Лебедев А.М.⁴, Макеев Б.А.⁵, Королев Р.И.¹, Жук Н.А.¹

¹СГУ им. Питирима Сорокина

²Институт физики и математики Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар

³СПбГУ

⁴НИЦ «Курчатовский институт», пр. Акад. Курчатова, Москва

⁵Институт геологии Коми научного центра УрО РАН, Сыктывкар

e-mail: kristinaparshukova17@gmail.com

Интерес к соединениям со структурой пирохлора обусловлен широким спектром их практически полезных свойств. Недавние исследования пирохлоров на основе танталата висмута показали, что успешно синтезируются многоэлементные пирохлоры, в октаэдрической подрешетке которых находятся катионы различных переходных 3d-элементов. В представленной работе показана возможность твердофазного синтеза монофазного пирохлора $\text{Bi}_2\text{Cu}_{1/2}\text{Co}_{1/2}\text{Ta}_2\text{O}_9 \pm \delta$ (пр. гр. Fd-3m, $a=10,5379(8) \text{ \AA}$), проведен анализ зарядового состояния катионов переходных элементов на основе данных ультрамягкой рентгеновской спектроскопии с использованием синхротронного излучения. Керамика характеризуется малопористой микроструктурой. Элементное картирование образца $\text{Bi}_2\text{Cu}_{1/2}\text{Co}_{1/2}\text{Ta}_2\text{O}_9 \pm \delta$ показало равномерное распределение атомов всех элементов по поверхности образца, а анализ ЭДС подтвердил соответствие экспериментального состава образца заданному. Химическое состояние катионов переходных элементов в пирохлоре охарактеризовано с помощью фотоэлектронной спектроскопии и NEXAFS. В спектре XPS Ta4f наблюдается характерный сдвиг в сторону меньших энергий на 0,9 эВ, что связано с распределением низкозарядных катионов переходных элементов в октаэдрических позициях тантала (V). Эффективный заряд катионов тантала составляет $+(5-\delta)$, все катионы висмута в пирохлоре находятся в одинаковом зарядовом состоянии +3. Катионы кобальта в пирохлоре имеют преимущественно заряд +2, +3. XPS спектр меди в пирохлоре тантала, помимо сигнала от Cu(II) при 931,5 эВ, содержит характерный для Cu(I) сигнал при 934 эВ. Для определения вклада различных валентных состояний меди разложили спектры XPS на отдельные пики от катионов Cu(I) и Cu(II), смоделированные кривыми Гаусса-Лоренца, в результате установлено, что молярное соотношение катионов Cu(I)/Cu(II) в пирохлоре составляет 0,82. Спектры NEXAFS Cu 2p оксидной керамики представляют собой суперпозицию полос поглощения катионов Cu(I) и Cu(II). Наличие ионов меди(I) в фазово-чистом пирохлоре, легированном катионами меди, является нетривиальным результатом, который был обнаружен с помощью NEXAFS-спектроскопии. Можно

предположить, что в пироклорах, допированных катионами в переменной степени окисления, возможен электронный обмен, в результате которого становится возможным передача электрона электроотрицательным катионам меди(II) от электроотрицательных ионов Со(II). Необходимость восстановления части катионов меди, вероятно, продиктована стремлением системы стабилизировать кристаллическую структуру пироклора за счет снятия напряжений, созданных гетеровалентным допированием.

Формирование отражающей поверхности крупногабаритных зеркал ИТЭР из нержавеющей стали марки 316L(N)-IG

*Терещенко И. Б.¹, Самсонов Д. С.¹, Марчий Г.В.¹, Голубев М.С.¹, Кузнецов Ф.К.¹,
Мухин Е.Е.¹*

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: i.tereschenko@mail.ioffe.ru

Крупногабаритные зеркала диагностической системы ИТЭР, выполненные из нержавеющей стали 316L(N)-IG обладают высокой эксплуатационной долговечностью в экстремальных условиях термоядерного реактора [1]. Однако их применение ограничивается двумя ключевыми проблемами: низким коэффициентом отражения в видимом диапазоне ($R \approx 55\text{--}60\%$ при $\lambda = 550$ нм) и сложностью механической обработки поверхности, вызванной адгезионными свойствами материала и склонностью к наклёпу [2].

Для повышения отражательной способности на поверхность стали наносится высокоотражающее оптическое покрытие, эксплуатационная стойкость и функциональные характеристики которого коррелируют с качеством обработки поверхности. Классическое абразивное полирование с использованием абразивов Al_2O_3 , CeO и АСМ оказалось недостаточно эффективным для достижения требуемых оптических параметров ($\sigma/\lambda < 0.01$) на макете крупногабаритного зеркала М2 (540×110 мм), являющегося частью системы сбора света ДТР. Применение ионного травления (Ag^+ , энергия 2,5 кэВ, плотность тока 0.73 А/м²) для удаления нарушенного слоя (~ 300 нм) [3] привело к нежелательным эффектам, таким как селективное травливание карбидных фаз с образованием лунок диаметром до 100 нм и увеличение шероховатости $\sigma \sim$ в 2 раза.

Наиболее перспективным методом обработки поверхности продемонстрировало магнито-реологическое полирование (МРП) [4]. На модельных образцах размером 10×10 мм удалось достичь шероховатости $\sigma = 0.95$ нм без формирования нарушенного слоя, что соответствует требованиям для использования в системах сбора излучения. В качестве оценки качества полирования, с точки зрения использования данного зеркала в системе сбора излучения, применен математический аппарат, в основе которого лежит двулучевая функция отражательной способности (ДФОС). Однако, следует учитывать, что параметры обработки, успешно апробированные на модельных образцах малого размера, не всегда могут быть напрямую перенесены на крупногабаритные изделия без дополнительной

оптимизации. Это требует дальнейших исследований для масштабирования технологий и адаптации методов обработки.

Доклад подготовлен как отчет о работе для Организации ИТЭР (контракт Росатома № Н.4а.241.19.25) и при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания 124031800036-2 (FFUG-2024-0034).

Список литературы

1. D. S. Samsonov et al., “Large-scale collecting mirrors for ITER optical diagnostic,” Nucl. Fusion, Feb. 2022
2. N. Zhou, R. Lin Peng, and R. Pettersson, “Surface characterization of austenitic stainless steel 304L after different grinding operations,” Int. J. Mech. Mater. Eng., vol. 12, no. 1, p. 6, Dec. 2017
3. J. Yin, Q. Bai, and B. Zhang, “Methods for Detection of Subsurface Damage: A Review,” Chin. J. Mech. Eng., vol. 31, no. 1, p. 41, Dec. 2018
4. M. Kumar, H. N. Singh Yadav, A. Kumar, and M. Das, “An overview of magnetorheological polishing fluid applied in nano-finishing of components,” J. Micromanufacturing, vol. 5, no. 2, pp. 82–100, Nov. 2022

Проявление оптического охлаждения ядер в эффективном поле электронов в эффекте Ханле в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Давыдов М. Н.¹, Джигоев Р.И.¹, Намозов Б.Р.¹, Козырев Н.В.¹, Кусраев Ю.Г.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mdavydov2010@mail.ru

В некоторых полупроводниковых системах при возбуждении электрон-дырочной пары циркулярно поляризованным светом, возможно понижение спиновой температуры ядерной спиновой системы (ЯСС) до единиц мК [1], поскольку одним из каналов спиновой релаксации оптически ориентированных носителей заряда является сверхтонкое взаимодействие. При приложении внешнего магнитного поля, зеемановские уровни охлажденных ядер заселяются в соответствии со спиновой температурой, что приводит к возникновению эффективного ядерного поля (поле Оверхаузера), величина которого может быть больше величины приложенного поля. Например, при 100%-й поляризации ядер в GaAs величина эффективного ядерного поля достигнет 5,3 Тл [2]. На электронный спин действует результирующее магнитное поле, которое складывается из внешнего и ядерного. По кривой деполяризации фотолюминесценции (ФЛ) в поперечном магнитном поле (эффект Ханле) анализируется достигнутая спиновая температура ЯСС.

Мы исследовали влияние оптического охлаждения ядерной спиновой системы в эффективном магнитном поле оптически ориентированных электронов (поле Найта) на эффект Ханле в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при температуре решетки 77 К. В данном исследовании получена спиновая температура ЯСС ($T_s \sim 10 \mu\text{K}$) в миллион раз меньшая

температуры

решетки

($T_L \approx 77\text{ K}$) без приложения внешних магнитных полей, а охлаждение происходило в эффективном поле оптически ориентированных электронов ($B_{\text{Knight}} \sim 1\text{ Гс}$), как впервые было осуществлено в работе [1].

Спин носителей заряда ориентировался циркулярно-поляризованным лучом He-Ne лазера. Измерен спектр краевой ФЛ и получены зависимости степени циркулярной поляризации ФЛ от мощности накачки. Исследовались магнито-полевые зависимости в геометрии Фойгта компонент среднего спина электрона по изменению степени циркулярной поляризации ФЛ: 1) компоненты $\langle S_z \rangle$, направленной вдоль направления распространения возбуждающего луча; 2) компоненты $\langle S_x \rangle$, направленной поперек направления распространения возбуждающего луча.

Оптически ориентированный спин электронов прецессирует в поперечном магнитном поле, вследствие чего появляется отличная от нуля компонента среднего спина $\langle S_x \rangle$. В условиях оптического охлаждения ЯСС в эффективном магнитном поле электронов наблюдались особенности поперечной компоненты спиновой ориентации $\langle S_x \rangle$, которые удаётся объяснить и описать в рамках существующих теорий [3]. Наблюдалась компенсация деполаризующего действия внешнего магнитного поля ядерным полем ($\langle S_x \rangle = 0$ при $|B| \approx 22\text{ Гс}$). Также наблюдался N -образный узкий контур (расстояние между пиками $\approx 12\text{ Гс}$) в области малых полей, который мы объясняем преобладанием ядерного поля.

В зависимости $\langle S_z \rangle$ от приложенного поперечного поля возникает W -образный узкий контур кривой Ханле (полная ширина на половине высоты $\approx 2,8\text{ Гс}$) в области малых полей и два дополнительных максимума поляризации ФЛ (координаты максимумов $|B_M| \approx 26\text{ Гс}$). Особенности кривой $\langle S_z \rangle$ в условиях оптического охлаждения ЯСС в эффективном поле электронов исследованы в работе [1] и описаны в [3]. Хвост кривой Ханле ($\langle S_z \rangle$) не удастся описать асимптотической кривой Лоренца ($F(B) \sim B^{-2}$), что связывается с диффузией спина электронов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FFUG-2024-0046.

Список литературы

1. Новиков В. А, Флейшер В.Г. Охлаждение спин-системы ядер решетки полупроводника в поле ориентированных светом электронов // ЖЭТФ. – 1976. – Т. 71, №2. – С. 778–790.
2. Paget. D., Lampel G., Sapoval B., Safarov V.I. Low field electron-nuclear spin coupling in gallium arsenide under optical pumping conditions // Phys. Rev. B. – 1977. – Vol. 15. – P. 5780.

3. Optical Orientation, Modern Problems in Condensed Matter Science Series, Vol. 8/ edited by F. Meier and B. Zakharchenya — North-Holland, Amsterdam, 1984 (Ch.5 by I.A.Merkulov and V.G.Fleisher)

Численное моделирование зависимости эффективного показателя преломления SiN волновода от концентрации водорода в атмосфере

Кузнецов И. В.¹, Перин А.С.¹

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

e-mail: igor.v.kuznetsov@tusur.ru

Водород (H_2) – не имеющий запаха и цвета легковоспламеняющийся газ, способный образовывать взрывоопасные смеси с воздухом. Контролировать уровень H_2 в атмосфере необходимо в некоторых областях промышленности. Сегодня, в основном, применяются датчики концентрации водорода, являющиеся термокаталитическими, электрохимическими и полупроводниковыми сенсорами. Поскольку сигналы, которые передают такие датчики являются электрическими, системы использующие полупроводниковые сенсоры концентрации водорода потенциально уязвимы к электромагнитным помехам. Использование оптических чувствительных элементов позволит получить помехозащищенную систему обнаружения H_2 в атмосфере.

Известны датчики водорода на основе волоконно-оптических решений [1]. Принцип действия таких сенсоров основан на изменении ширины воздушного зазора в интерферометре Фабри-Перо, формируемом на торце оптического волокна (ОВ) путем нанесения нескольких нанослоев диэлектриков и металла. Изменение ширины воздушного зазора достигается благодаря диффузии H_2 в тонкую металлическую плёнку (например, в плёнку тантала). Недостатком такой конструкции является сложность технологического процесса формирования такого интерферометра на торце ОВ.

Решения на основе технологий интегральной фотоники включают множество технологически-отработанных процессов формирования фотонных структур, в первую очередь в пленках кремния (Si) и нитрида кремния (SiN). SiN является более привлекательной платформой, поскольку волноводы на его основе имеют малое затухание ($<0,2$ дБ/см).

Типичная конструкция интегрального оптического сенсора для анализа состава внешней среды представляет из себя интерферометр Маха-Цендера (ИМЦ), одно из плеч которого освобождено от оболочки таким образом, чтобы внешняя среда работала в качестве оболочки волновода. Таким образом, в зависимости от химического состава внешней среды, меняются условия распространения оптического излучения в волноводе и как следствие

возникает фазовая задержка между оптическими волнами, прошедшими через разные плечи ИМЦ, что приводит к изменению интерференционной картины на выходе ИМЦ [2].

Целью работы является численное моделирование зависимости эффективного показателя преломления оптического волновода от концентрации H_2 в атмосфере.

Показатели преломления воздуха и водорода определяются по дисперсионным формулам, приведенным в работах [3, 4]. Поскольку в научной литературе нет данных о зависимости показателя преломления воздуха от концентрации H_2 , на данном этапе разумно предположить, что зависимость является линейной. Тогда для описания показателя преломления смеси воздуха и H_2 воспользуемся формулой:

$$n = (1 - C_{H_2})n_{air} + C_{H_2}n_{H_2}, \quad (1)$$

где C_{H_2} – концентрация водорода в воздухе, n_{air} – показатель преломления воздуха, n_{H_2} – показатель преломления H_2 . В дальнейшем, по мере развития работы, данная зависимость может быть пересмотрена.

Проводилось численное моделирование зависимости эффективного показателя преломления (n_{eff}) от концентрации водорода в атмосфере со следующими параметрами волновода: ширина сердцевины волновода (SiN) 1,4 мкм, высота сердцевины 160 нм, высота подложки (SiO_2) 2 мкм, высота оболочки (смесь воздуха и H_2) 5 мкм. Показатели преломления SiO_2 и SiN приведены в работах [5, 6]. Из результатов численного моделирования ясно, что изменение концентрации водорода на 1% приводит к изменению показателя преломления на величину $1,28 \cdot 10^{-8}$. Тогда величина интенсивности на выходе ИМЦ:

$$I_1 = \frac{I_0}{2} \cdot [1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda_0} n_{eff,1} L_1 - \frac{2\pi}{\lambda_0} n_{eff,2} \cdot L_2)], \quad (2)$$

где $L_{1,2}$ – длины плеч.

При моделировании принималось $L_1 = 320$ мкм, $L_2 = kL_1$, $k > 0$.

Из (2) видно, что по мере увеличения L_2 , разница между интенсивностью при нулевой и максимальной концентрации H_2 возрастает. При этом провалы этой зависимости объясняется изменением положения рабочей точки, а максимальная разница достигается, когда рабочая точка находится в линейной части характеристики. Таким образом, задача проектирования оптического чувствительного элемента H_2 сводится к подбору конфигурации ИМЦ таким образом, чтобы рабочая точка модулятора оказалась на линейном участке характеристики и при этом длина безоболочной области была максимальной

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2025-0002 «Исследование и разработка чувствительных элементов сенсорных систем на основе фотонных интегральных схем»).

Список литературы

1. Минкин А. М. и др. Волоконно-оптический датчик концентрации водорода на базе интерферометра Фабри–Перо, изготовленный с использованием наноразмерных слоев $Al_2O_3/Ta/SiO_2$ // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10. – №.2 – С. 25–41.

2. Martens D., Bienstman P. Study on the limit of detection in MZI-based biosensor systems // Scientific reports. – 2019. – V. 9. – №. 1. – P. 5767.
3. Ciddor P. E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared // Applied optics. – 1996. – V. 35. – №. 9. – P. 1566-1573.
4. Peck E. R., Huang S. Refractivity and dispersion of hydrogen in the visible and near infrared // JOSA. – 1977. – V. 67. – №. 11. – P. 1550-1554.
5. Malitson I. H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica // Josa. – 1965. – V. 55. – №. 10. – P. 1205-1209.
6. Luke K. et al. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si₃N₄ microresonator // Optics letter. – 2015. – V. 40. – №. 21. – P. 4823-4826.

Спектральные и пространственные характеристики излучения вертикально-многомодовых торцевых лазерных диодов с экстремально широким волноводом

Бекман А. А.¹, И.А. Мельниченко², Г.О. Корнышов¹, Ю.М. Шерняков¹, Н.Ю. Гордеев¹, А.С. Паюсов¹, О.И. Симчук², Ткач Ю.С.², М.В. Максимов²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Академический университет им. Ж.И. Алферова

e-mail: *spbgate21@gmail.com*

В данной работе исследованы многомодовые полупроводниковые лазеры со сверхшироким вертикальным волноводом, перспективные для создания требуемого пространственного распределения интенсивности электромагнитного излучения. Изменение диаграммы направленности лазера может достигаться за счет выбора положения активного слоя и регулирования тока накачки. Расширение волновода позволяет регулировать потери для мод высшего порядка и снижать оптическую плотность мощности, что способствует повышению устойчивости к катастрофической деградации зеркал.

InGaAs/GaAs/AlGaAs лазерные структуры (длина волны излучения $\lambda \approx 1,04$ мкм) с GaAs волноводом шириной 2.6 мкм и двумя квантовыми ямами в активной области, выращенные методом MOCVD, были использованы для изготовления полосковых лазеров (ширина полоска 50 мкм). Ватт-амперные характеристики, спектры электролюминесценции, картины ближнего и дальнего поля измерялись в импульсном режиме. Спектрально-разрешенные пространственные характеристики излучения исследовались с помощью сканирующей оптической микроскопии ближнего поля (СБОМ) с оптоволоконной головкой.

Был исследован эффект одновременной генерации на основном и возбужденном состояниях InGaAs/GaAs квантовых ям (эффект двухуровневой генерации) [1-2]. Первоначально генерация возникала на основном состоянии, а при увеличении тока накачки – на возбужденном. При достаточно малых длинах резонатора (0.8 мм) с ростом тока наблюдалось полное исчезновение генерации на основном состоянии. Анализ картин дальнего поля показал изменение распределения интенсивности с ростом тока. Спектрально-разрешенные измерения СБОМ выявили, что с ростом тока происходит переход от генерации на

основном состоянии на моде второго порядка, на генерацию на возбужденном состоянии на нулевой моде, что связывается с ростом потерь для мод высших порядков. Измеренные профили мод показали хорошее соответствие с результатами моделирования.

Полученные результаты демонстрируют возможность управления спектральным и пространственным распределением излучения вертикально-многомодовых полупроводниковых лазеров с широким волноводом посредством изменения тока накачки и температуры. Комбинация измерений дальнего и ближнего поля позволяет получить полную информацию о пространственных характеристиках излучения. Изменение диаграммы направленности излучения при изменении тока позволяет контролировать коэффициент ввода в оптическое волокно, что может быть использовано для кодирования информации. Данный подход также открывает перспективы для создания лазерных источников с контролируемой многопестковой диаграммой направленности, которые могут найти применение в различных сенсорах, датчиках движения, лидарах и т.д.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00358. О.И. Симчук и Ю.С. Ткач благодарят Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2023-0010) за поддержку исследования поверхностных дефектов эпитаксиальных структур.

Список литературы

1. E. Zhukov et al., *Semicond. Sci. Technol.* 18 774–781 (2003)
2. M. V. Maximov, et al. *Opt. Lett.* 49(21) 6213-6216 (2024)

Фотоэлектрический преобразователь лазерного излучения $\lambda = 1064$ нм на основе GaInAsP/InP

Гаврилов К. А.¹, Минтаиров С.А.¹, Надточий А.М.¹, Нахимович М.В.¹, Салий Р.А.¹,
Калюжный Н.А.¹, Шварц М.З.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: gawrilowk@yandex.ru

Первый фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) лазерного излучения (ЛИ), рассчитанный на длину волны $\lambda = 1064$ нм, был создан ещё в 1981 году (H.D. Law и др.), он представлял собой гетероструктуру InP/GaInAsP/InP, выращенную методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и имел КПД порядка 43% при мощности падающего лазерного излучения 4.85 мВт [1]. В то время общий технологий уровень не позволил реализовать концепцию лазерной беспроводной передачи энергии. К ней вернулись в начале 2000-х годов в связи с проектами NASA [2]. На сегодняшний день, лучший ФЭП лазерного излучения $\lambda = 1064$ нм на основе GaInAsP имеет КПД порядка 41% при падающей мощности излучения ~ 20 Вт/см² [3]. Теоретические оценки для ФЭП на основе GaInAsP с шириной запрещённой зоны $E_g = 1.16$ эВ (соответствует $\lambda = 1064$ нм) показывают, что максимальное значение КПД может достигать 75% при плотности фототока 10 А/см² [4], что эквивалентно мощности падающего излучения ~ 12 Вт/см². Таким образом, создание

высокоэффективного (более 50% КПД) лазерного ФЭП ЛИ на основе GaInAsP/InP является актуальной задачей.

Следует отметить, что на сегодняшний день для ЛИ «микронного» диапазона разработана технология InGaAs/GaAs ФЭП, гетероструктура которого выращивается через метаморфные «буферные» слои. Данные ФЭП позволили на практике продемонстрировать КПД до 55% [5,6,7] при плотности мощности падающего излучения вплоть до $\sim 15 \text{ Вт/см}^2$. Тем не менее, технология монолитной, согласованной по параметрам решётки гетероструктуры GaInAsP/InP имеет значительный потенциал, так как псевдоморфный эпитаксиальный рост позволяет избежать проблем с формированием и прорастанием пронизывающих дислокаций, возникающих в буферных слоях при метаморфном росте.

В данной работе создана гетероструктура ФЭП ЛИ на основе системы материалов GaInAsP/InP. Твёрдый раствор GaInAsP согласованный по параметру решётки с подложкой InP позволяет изменением стехиометрии $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ регулировать его ширину запрещённой зоны в пределах от 0.72 эВ, до 1.34 эВ (для стехиометрий, удовлетворяющих условию согласования параметров решётки). Эпитаксиальный рост проводился методом металлоорганической газовой фазной эпитаксии (МОГФЭ). В качестве источников атомов V группы использовались гидриды фосфора (PH_3) и мышьяка (AsH_3). В качестве источников атомов III группы использовались триметилгаллий (TMGa) и триметилиндий (TMIn).

Гетероструктура фотоэлектрического преобразователя представляет собой последовательность материалов: подложка InP, которая также служит тыльным барьером для фотогенерированных носителей заряда, эпитаксиальный слой GaInAsP общей толщиной около 4 мкм (верхняя часть которого, эмиттер, легирована кремнием (Si), а нижняя, база – цинком (Zn)), который является поглощающей ЛИ областью ФЭП, эпитаксиальный слой InP, служащий верхним барьером, уменьшающим поверхностную рекомбинацию, и сильнолегированный слой InGaAs (используемый для формирования омического контакта). Нанесение металлических контактов для создания тестового образца ФЭП проводилось методом электрохимического осаждения никеля (Ni).

Измерение спектрального внешнего квантового выхода, ватт-амперной характеристики и семейства вольт-амперных характеристик, позволили заключить, что образец имеет КПД преобразования на длине волны $\lambda = 1064 \text{ нм}$ порядка 29% при плотности падающей мощности лазерного излучения $\sim 30 \text{ Вт/см}^2$. Последующий анализ характеристик по модели токового инварианта [8, 9], позволил заключить, что при создании ФЭП ЛИ на основе разработанной гетероструктуры можно добиться КПД преобразования порядка 50% при плотности падающей мощности $\sim 30 \text{ Вт/см}^2$.

Список литературы

1. H.D. Law, W.W. Ng, K. Nakano, P.D. Dapkus and D.R. Stone, «High efficiency In-GaAsP photovoltaic power converter» in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 26-27, Feb. 1981, doi: 10.1109/EDL.1981.25327.
2. Hongzuo Liu, Yixuan Zhang, Yihua Hu, Zion Tse, Jing wu, «Laser Power Transmission and Its Application in Laser-Powered Electrical Motor Drive: A Review», in *Power Electronics and Drives Volume 6* (41), 2021 doi: 10.2478/pead-2021-0010

3. Yin et al., «High-Voltage 1064 nm InGaAsP Multijunction Laser Power Converters», in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 43, no. 8, pp. 1291-1294, Aug. 2022, doi: 10.1109/LED.2022.3183833.
4. В.М. Андреев, «Мощные фотоэлектрические преобразователи монохроматического и концентрированного солнечного излучения», *Современная электроника*, № 6 (2014).
5. N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, «Optimization of photoelectric parameters of InGaAs metamorphic laser ($\lambda=1064$ nm) power converters with over 50% efficiency», *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, V.217, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110710>
2. Pellegrino, H. Helmers, J. Ohlmann, O. Höhn and D. Lackner, «High-Efficiency 1064 nm Metamorphic Photonic Power Converters for Spacecraft Wireless Power Transfer,» 2023 13th European Space Power Conference (ESPC), Elche, Spain, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ESPC59009.2023.10298134.
6. N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, S.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, «InGaAs metamorphic laser power converters with distributed Bragg reflector for wavelength range $\lambda=1-1.1$ μm », CPV-16 AIP Conf. Proc., v.2298, #030001-2020 (16th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, CPV-16; Denver, USA; 4-6 May 2020); doi.org/10.1063/5.0032903
7. М.А.Минтаиров, В.В.Евструпов, С.А.Минтаиров, Р.А.Салий, М.З.Шварц, Н.А.Калюжный, Токовый инвариант как метод поиска оптимальной ширины запрещенной зоны субэлементов многопереходных солнечных элементов. Письма ЖТФ, т.50, 5, 2024, с. 32 – 34, <https://doi.org/10.61011/PJTf.2024.05.57182.19776>
8. М.А. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, and N.A. Kalyuzhnyy, Current invariant as fundamental relation between saturation currents and band gaps for semiconductor solar cells, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, v.264, 2024, ArtNo: #112619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112619>

Оптический сенсор углекислого газа на основе гетеродиодов из твердых растворов InAsSb(P).

Кунков Р. Э.¹, Карандашев С. А.¹, Климов А. А.¹, Лухмырина Т. С.¹, Ременный М. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: romunkov@yandex.ru

Углекислый газ (диоксид углерода) является ежедневным спутником жизнедеятельности человека. Его эмитентами являются производственные предприятия, особенно те, чья деятельность связана с процессами горения, а также все аэробные живые организмы [1]. Первые проявления негативного влияния CO₂ на организм человека начинаются уже при концентрациях около 0.1 – 0.15 об. % [2], в то время как в чистом атмосферном воздухе содержится около 0.04 об. %. Поэтому допустимые уровни содержания углекислого газа в производственных, офисных и жилых помещениях строго регламентируются [3,4], а важность его контроля является общепризнанной.

Среди различных подходов к созданию датчиков диоксида углерода, одним из наиболее перспективных является оптический, основанный на избирательном поглощении ИК излучения молекулами газа, в котором уменьшение мощности излучения, прошедшего через анализируемый газ, подчиняется закону Бугера-Ламберта-Бера. Очевидно, что параметры используемых оптоэлектронных компонентов во многом определяют достижимые уровни пороговой чувствительности и точности сенсора. На сегодняшний день, наибольшее распространение получили бытовые и промышленные [5] датчики на основе тепловых источников и приемников ИК излучения. Однако, их применение в сенсоре приводит, как правило, к высокому энергопотреблению, а сами компоненты характеризуются низким быстродействием и быстрым «старением», при этом тепловые приемники имеют относительно невысокую чувствительность. Также, существуют инфракрасные сенсоры, использующие полупроводниковую компонентную базу на основе солей свинца [6], в которой оптически активным элементом является аморфная пленка. Из-за этого, одним из недостатков данной технологии считается отсутствие долговременной стабильности.

Наиболее перспективной альтернативой является использование свето- и фотодиодов на основе гетероструктур из твердых растворов InAsSb(P) , что связано с высокой металлургической стабильностью материалов A^3B^5 , доступностью подложек для их роста, а также их относительно невысокой стоимостью. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, на протяжении многих лет проводится разработка и исследование фотодиодов [7, 8] и светодиодов [9, 10] на основе гетероструктур из твердых растворов InAsSb(P) , работающих в диапазоне длин волн около 4.2 мкм в широком интервале температур, на основе которых был разработан недисперсионный датчик углекислого газа и макет портативного газоанализатора, характеризующиеся значением пороговой чувствительности углекислого газа в диапазоне 50 – 100 ppm [11].

В рамках данной работы были разработаны свето- и фотодиоды на основе гетероструктуры $\text{N-InAsSbP/InAsSb/P-InAsSb}$, характеризующиеся более высокими значениями мощности и обнаружительной способности по сравнению с полученными в работах [7-10], и создан экспериментальный образец компактного датчика углекислого газа, характерными особенностями которого являются наличие опорного канала, способность работать в широком интервале температур без термостабилизации и минимальное энергопотребление. Была проведена оценка параметров датчика, были получены значения пороговой чувствительности около 0.001 об. % (10 ppm) и относительной погрешности не хуже 0.1 % от значения измерения при диапазоне измеряемых концентраций CO_2 от 0 до 5 %, длине оптического пути 2 см и времени накопления сигнала 128 мс. Проведено сравнение характеристик разработанного сенсора с существующими аналогами.

Список литературы

1. Zhu Liu, Zhu Deng, Steven J. Davis & Philippe Ciais, «Global carbon emissions in 2023», *Nature reviews earth & environment* 5 (2024), pp. 253 – 254.
2. И. И. Новикова, А. В. Сорокина, М. А. Лобкис, Н. А. Зубцовская, М. В. Семенихина, В. А. Щевелева, Н. И. Назимкин, «Углекислый газ: проблемы нормирования, контроля и профилактики неблагоприятного воздействия в образовательных организациях», *Российский вестник гигиены* 4 (2023), стр. 18 – 28.

3. ГОСТ 30494-2011. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053>
4. СанПиН 2.2.3.570-96. Гигиенические требования к предприятиям угольной промышленности и организации работ. Электронный ресурс: <https://infogost.com/sanpin-2-2-3-570-96-gigienicheskie-trebovaniya-k-predpriyatiyam-ugolnoy-promyishlennosti-i-organizatsii-rabot/>
5. Инфракрасные недисперсионные газовые датчики компании Dynament (UK). Электронный ресурс: <http://www.dynament.ru/pdf/tds0048.pdf>
6. Инфракрасные недисперсионные газовые датчики компании Optosense (RU). Электронный ресурс: <https://optosense.ru/upload/iblock/212/ESAT.100700.00%20%D0%A0%D0%AD.pdf>
7. А.Л. Закгейм, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.Е. Черняков, «Неохлаждаемые широкополосные флип-чип фотодиоды на основе InAsSb ($\lambda_{\text{cut off}} = 4.5$ мкм)», Физика и техника полупроводников (2009), том 43, вып. 3.
8. Иммерсионные светодиоды, излучающие на длине волны 4.2 мкм. Электронный ресурс: <http://www.ioffeled.com/Specifications/LED42.pdf>
9. Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, «Светодиоды флип-чип на 4.2 мкм с глубокой мезой травления», Физика и техника полупроводников (2006), том 4, вып. 6.
10. Иммерсионные фотодиоды, чувствительные к излучению на длине волны 4.2 мкм. Электронный ресурс: <http://www.ioffeled.com/Specifications/PD42.pdf>
11. Galina Yu. Sotnikova, Gennady A. Gavrilo, Sergey E. Aleksandrov, Alexander A. Kapralov, Sergey A. Karandashev, Boris A. Matveev, and Maxim A. Remenny, «Low Voltage CO₂-Gas Sensor Based on III–V Mid-IR Immersion Lens Diode Optopairs: Where we Are and How Far we Can Go?», IEEE Sensors Journal (2010), vol. 10, no. 2, pp. 225-234

Фотодетекторы на основе CVD-MoS₂ атомарной толщины

Елисеев И. А.¹, Kurtash V. A.², Pezoldt J.², Давыдов В. Ю.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Технический университет Ильменау (TU Ilmenau), Ильменау, Германия

e-mail: ilya.eliseyev@mail.ioffe.ru

Гибридные структуры "фотодетектор-полевой транзистор" (photo-FET) представляют собой перспективную платформу для разработки нового поколения оптоэлектронных устройств. Их ключевым преимуществом по сравнению с диодными структурами является высокая чувствительность и увеличенное соотношение сигнал/шум по сравнению с диодными структурами, что достигается благодаря возможности полного закрытия канала транзистора для снижения темнового тока [1]. Использование двумерных полупроводников в качестве фоточувствительного материала позволяет значительно снизить как размеры устройств, так и их энергопотребление. Монослойный дисульфид молибдена (MoS₂) обладает высокой удельной фоточувствительностью [2] и достаточно высокой подвижностью носителей заряда [3], что делает его одним из наиболее перспективных материалов для создания таких устройств. Кроме того, транзисторные структуры на основе

MoS₂ демонстрируют значительный потенциал применения в энергоэффективных системах для нейроморфных вычислений [4].

В данной работе исследованы гибридные структуры photo-FET на основе MoS₂, выращенного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD), толщиной от одного до трех монослоев. Результаты спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) подтвердили высокую степень структурного совершенства выращенных слоев и отсутствие значительного внесения дефектов в процессе изготовления устройств.

При работе в режиме полевого транзистора был обнаружен эффект модуляции электронной плотности в монослойном MoS₂ при приложении напряжения к затвору. Кроме того, исследовано поведение характерных линий спектров КРС и фотолюминесценции (ФЛ) MoS₂ при приложении положительного напряжения между затвором и истоком. В ходе измерений обнаружено изменение относительной интенсивности линий E_{2g} и A_{1g} и сдвиг частоты линии A_{1g}, связанные с изменением концентрации носителей заряда в канале. Сдвиг максимума экситонной ФЛ, предположительно обусловленный увеличением вклада заряженных экситонов, составил около 15 мэВ при напряжении затвор-исток 30 В.

В режиме фотодетектора были изучены фотоотклик и релаксационные характеристики для различных длин волн возбуждения. Установлено, что величина фототока насыщения нелинейно зависит от числа слоев MoS₂. При возбуждении лазером с длиной волны 633 нм (близкой к резонансу В-экситона) наблюдается значительное снижение значений фототока насыщения по сравнению с возбуждением на длине волны 532 нм. Это явление может быть связано с ускоренной излучательной рекомбинацией. Исследование зависимости фототока от плотности мощности возбуждения позволило выявить вклад различных факторов, таких как наличие зарядовых ловушек, которые влияют на время отклика и релаксации фотодетектора.

Полученные результаты вносят значительный вклад в понимание фундаментальных физических процессов, таких как генерация, рекомбинация и транспорт носителей заряда, а также роль зарядовых ловушек и экситонных эффектов в фотоотклике структур на основе MoS₂. Это открывает новые возможности для оптимизации характеристик фотодетекторов и разработки более совершенных оптоэлектронных устройств, включая нейроморфные системы.

Список литературы

1. Najarian, A.M.; Vafaie, M.; Chen, B.; de Arquer, F.P.G., Sargent, E. Photophysical properties of materials for high-speed photodetection, *Nat. Rev. Phys.*, vol. 6 219, 2024.
2. Lopez-Sanchez, O.; Lembke, D.; Kayci, M.; Radenovic, A.; Kis, A. Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS₂. *Nature Nanotechnology*, vol. 8, 497–501, 2013.
3. Radisavljevic, B.; Radenovic, A.; Brivio, J.; Giacometti, V.; Kis, A. Single-layer MoS₂ transistors. *Nature Nanotechnology*, vol. 6, 147–150, 2011.
4. Kurtash, V., Jacobs, H.O. and Pezoldt, J., 2023. Energy-Efficient Operation Conditions of MoS₂-Based Memristors. *physica status solidi (a)*, 220(13), p.2200893.

Спектральные характеристики оптического излучения микроплазм полупроводниковых приборов

Казанков А.А.^{1,2}, Фролов И.В.¹, Сергеев В.А.¹, Радаев О.А.¹

¹УФIRE им. В. А. Котельникова РАН

²Ульяновский государственный технический университет

e-mail: ilya-frolov88@mail.ru

В *p-n* переходах полупроводниковых приборов (ППП) с дефектами и неоднородно распределенными примесями, концентрирующимися обычно вокруг дислокаций, при приложении обратного напряжения возникают области локального лавинного пробоя, называемые микроплазмами (МП). МП-пробой проявляется в виде импульсов лавинного тока и импульсного оптического излучения. Люминесценция, возникающая в режиме МП-пробоя, обнаружена в различных классах ППП: светодиодах [1], фотодиодах [2], транзисторах [3] и др., изготовленных по различным технологиям на основе различных материалов.

Для экспериментального исследования динамических и спектральных характеристик люминесценции отдельных МП и их связи с пространственным распределением дефектов в структурах ППП авторами разработана измерительная установка, позволяющая регистрировать излучение локальных областей кристалла ППП в режиме МП пробоя видеокамерой на основе ПЗС-матрицы SC5239S и SoC - контроллера GK7205 с высоким пространственным (2560×1440) и спектральным разрешением с частотой 20 кадров в секунду. Для исследования спектров флуктуации оптического излучения отдельных МП на различных длинах волн оптический фильтр установки с полосой пропускания от 25 до 30 нм ступенчато перестраивался в диапазоне длин волн от 450 до 630 нм с шагом 10 нм.

Исследованы динамические и спектральные характеристики люминесценции отдельных МП InGaN/GaN светодиодов, кремниевых транзисторов и фотодиодов. У всех исследованных образцов приборов наблюдалось несколько МП. Так, у пяти образцов InGaN/GaN светодиодов XREBLU-L1-0000-00K01 синего свечения в начале пробоя наблюдалось от 2-х до 4-х МП с различной интенсивностью оптического излучения. Интенсивность излучения каждой МП флуктуирует во времени. Путем разложения временного ряда флуктуаций интенсивности излучения МП в ряд Фурье установлено, что для всех исследованных образцов приборов спектры флуктуации оптического излучения МП имеют вид $S(f) \sim 1/f^\gamma$ во всем диапазоне исследуемых длин волн излучения. Значение показателя степени γ спектра флуктуаций оптического излучения МП близок к 1, зависит от обратного тока и температуры, причем на коротковолновом участке спектра излучения это значение меньше, чем на длинноволновом.

При температуре окружающей среды $T = 30^\circ\text{C}$ и длине волны излучения МП $\lambda = 485$ нм $\gamma = 0,84$; при $\lambda = 523$ нм $\gamma = 0,86$; при $\lambda = 562$ нм $\gamma = 0,91$. При увеличении температуры окружающей среды интенсивность излучения МП уменьшается, а показатель степени γ увеличивается. При температуре $T = 50^\circ\text{C}$ и длине волны $\lambda = 523$ нм $\gamma = 0,89$. При

увеличении обратного тока значение показателя степени γ уменьшается. Известные модели НЧ-флуктуаций МП в ППП связывают их с точечными дефектами в области МП пробоя [4].

Установлено, что спектр оптического излучения МП InGaN/GaN светодиодов существенно шире спектра их оптического излучения при прямом смещении и находится в диапазоне длин волн от 450 до 630 нм. В диапазоне 560-590 нм на этих спектрах проявляется подъем, соответствующий «желтой» люминесценции МП, которая в GaN светодиодах связана с рекомбинацией носителей заряда на точечных дефектах [5, 6]. МП с большей интенсивностью излучения имеют более высокую величину подъема спектра в диапазоне 560-590 нм относительно максимума спектра излучения.

Таким образом, динамические и спектральные характеристики излучения МП содержат информацию о параметрах генерационно-рекомбинационных процессов в областях p - n переходов с дефектами и могут использоваться для исследования этих дефектов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

Список литературы

1. Bercha A., Sakowski K., Muziol G. et al., Light emission at reverse voltage in a wide-well (In,Ga) $\times$ N/Ga $\times$ N light-emitting diode, *Physical Review Applied*, 21, 5, 2024.
2. Сергеев В.А., Казанков А.А., Фролов И.В., Радаев О.А., Алгоритм оценки параметров флуктуаций интенсивности люминесценции локальных областей кристалла светодиода в режиме электрического пробоя // Доклады 4-й Всероссийской конференции «Современные технологии обработки сигналов» (СТОС-2023) (г. Москва, 12 – 13 декабря 2023 г.). – М. : РНТОРЭС им. А.С.Попова, 2023. – С.121–124.
3. Kim T., Kim G., Cho M.-K., et al., Investigation of Device- and Circuit-Level Reliability of Inverse-Mode Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar Transistors, *Sensors*, 24 (22), 7130, 2024.
4. Шашкина А. С., Кривошейкин А. В., Скворцов Н. Н., Воротков М. В., Фрактальные свойства лавинного пробоя светодиода, *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*, 4 (253), 85-93, 2016.
5. Власенко А.И., Киселюк М.П., Ляшенко О.В., Микроплазменный пробой InGaN/GaN-гетероструктур мощных светодиодов, *Журнал прикладной спектроскопии*, том. 80, № 1, 121–127, 2013.
6. Veleschuk V., Vlasenko A., Kisselyuk M., Vlasenko Z., Khmil D., Borshch V., Electroluminescence of InGaN/GaN heterostructures at the reverse bias and nitrogen temperature, *Optica Applicata*, Vol. XLV, No. 4, 535-543, 2015

Энергоэффективность вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1.3 мкм, реализованных в рамках технологии спекания пластин

Ковач Я. Н.^{1,2}, Блохин С.А.¹, Бобров М.А.¹, Блохин А.А.¹, Воропаев К.О.¹, Бабичев А.В.², Гладышев А.Г.³, Копытов П.Е.², Андрюшкин В.В.^{2,3}, Новиков И.И.^{2,3}, Карачинский Л.Я.^{2,3}, Егоров А.Ю.³, Сапунов Г.А.⁴, Дербезов И.А.⁴, Tian S.C.⁴, Bimberg D.⁴

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

² Университет ИТМО,

³ ООО «Коннектор Оптикс»

⁴ Bimberg Chinese-German Center for Green Photonics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP), Chinese Academy of Sciences, 130033, Changchun, China, 77 Ying Kou Rd

e-mail: yakovachyakov@gmail.com

Современное развитие искусственного интеллекта, а также внедрение облачных вычислений и анализа больших данных требуют повышения производительности центров обработки данных (ЦОД), что неизбежно ведет к стремительному росту мирового энергопотребления [1]. Одним из возможных решений в области нового поколения высокоскоростных оптических межсоединений для крупномасштабных ЦОД являются длинноволновые вертикально-излучающие лазеры (ДВИЛ) [2]. В рамках технологии гибридной интеграции оптического резонатора InAlGaAs/InP с металл-диэлектрическими зеркалами (ГИ-ДВИЛ) продемонстрирована принципиальная возможность достижения скорости передачи данных до 30 Гбит/с для ГИ-ДВИЛ спектрального диапазона 1.3 мкм [3] и 50 Гбит/с для ГИ-ДВИЛ спектрального диапазона 1.55 мкм [4]. Для альтернативной технологии создания ДВИЛ с помощью спекания пластин оптического резонатора InAlGaAsP/InP с полупроводниковыми брэгговскими зеркалами AlGaAs/GaAs (СП-ДВИЛ) достигнуты скорости передачи данных до 35 Гбит/с для СП-ДВИЛ спектрального диапазона 1.3 мкм [5] и 37 Гбит/с для СПИ-ДВИЛ спектрального диапазона 1.55 мкм [6]. Увеличение мощности ЦОД обуславливает важность анализа энергоэффективности единичного оптического передатчика (energy-to-data ratio, EDR) – энергопотребления лазера на передачу одного бита информации.

В настоящей работе представлен анализ энергоэффективности одномодовых СП-ВИЛ спектрального диапазона 1.3 мкм для разного типа амплитудной модуляции. В качестве активной области лазера, для увеличения дифференциального усиления, была использована InGaAs/InAlGaAs сверхрешетка.

Была показана принципиальная возможность достижения скорости оптической передачи данных 25 Гбит/с в режиме двухуровневой (передача 1 символа/бита информации за тактовый интервал) амплитудной модуляции (non-return to zero, NRZ) при применении предискажения входного электрического сигнала (т.н. эквализация). В этом случае энергопотребление лазера на передачу одного бита информации (без учета динамической

компоненты, отвечающей за переключение лазера) достигает 1.27 пДж/бит. Значение EDR можно снизить путем уменьшения рабочего тока, что, к сожалению, ведет к падению символической скорости передачи данных. Однако более резкое падение быстродействия лазера по мере снижения энергопотребления лазера ведет к росту энергоэффективности при малых рабочих токах. В результате, при скоростях передачи данных 14-16 Гбит/с реализуется наименьшее значение EDR ~0.85 пДж/бит.

Подавление пика релаксационных колебаний в амплитудно-частотной характеристиках в широком диапазоне токов позволило поднять агрегированную скорость передачи данных в режиме четырехуровневой (передача 2 символов/битов информации за тактовый интервал) амплитудной модуляции (4-level Pulse Amplitude Modulation, PAM-4) до 30 Гбит/с (при символической скорости передачи данных 15 Гбит/с), что соответствует энергоэффективности ~1.04 пДж/бит. Применение техники эквализации привело к росту агрегированной скорости передачи данных до 42 Гбит/с и, одновременно, падению EDR ниже 0.8 пДж/бит. Таким образом было показано, что с точки зрения достижения более высоких скоростей передачи данных и снижения энергопотребления лазера на передачу одного бита информации режим модуляции PAM-4 предпочтительнее режима модуляции NRZ.

Список литературы

1. Padullaparthi B.D. et al., VCSEL industry : communication and sensing, Wiley-IEEE Press, 352 p., 2021.
2. A. Babichev et al., Photonics 10 (3), 268 (2023).
3. M. Muller et al., ISLC 2012 International Semiconductor Laser Conference, San Diego, CA, USA, pp. 1–2 (2012).
4. S. Spiga et al., J. Light. Technol. 35 (4), 727–733 (2017).
5. A. Caliman et al., Opt. Express 24 (15), 16329 (2016).
6. A. Babichev et al., Photonics 10 (6), 660 (2023).

Свойства датчиков МНПВО на основе двойных гетероструктур p-InAsSbP/n-InAs, облученных гамма-квантами

Лухмырина Т. С.¹, С. А. Карандашев¹, А. А. Климов¹, Р. Э. Кунков¹, В.Н. Ломасов²,
Б. А. Матвеев¹, М. А. Ременный¹, Е. И. Шабунина¹, Н. М. Шмидт¹.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: h7k9g00@gmail.com

Двойные гетероструктуры (ДГС) с активной областью из n-InAs, используются при создании свето- (СД) и фотодиодов (ФД) средневолнового инфракрасного диапазона, работающих при комнатной температуре и имеющих ряд применений в пирометрах, термофотовольтаических генераторах, быстродействующих приборах газового анализа, а также в датчиках химического состава, основанных на изменении условий прохождения излучения от СД к ФД при его многократном нарушенном полном внутреннем отражении

(МНПВО) в волноводе, связывающим СД и ФД. Датчики МНПВО на основе ДГС р-InAsSbP/n-InAs позволяют проводить оценку химического состава жидких [1] и твердых веществ, например, полимеров, при непосредственном оптическом контакте чувствительной области датчика и исследуемого вещества (аналита). Датчики МНПВО чаще всего не требуют пробоподготовки и поэтому могут использоваться как неразрушающий метод анализа состояния полимерных материалов, использованных в оборудовании, расположенном в труднодоступных для оператора местах, например, вблизи от реактора атомных электростанций [2,3].

Радиационная стойкость InAs изучалась ранее при воздействии на него протонами, нейтронами и электронами, но нам не удалось обнаружить в литературе данных по деградации электрических свойств и шумовых характеристик р-n структур на основе InAs после воздействия на них g-квантами. Вместе с тем шумовые характеристики помимо оценки деградации датчиков позволяют выяснить природу дефектов, образуемых в полупроводниковых структурах при воздействии на них проникающей радиации.

В данной работе изучается радиационная стойкость СД и ФД на основе двойных гетероструктур (ДГС) р-InAsSbP/n-InAs/n-InAsSbP/n⁺-InAs(100) с диаметром активных областей (мез) $\varnothing_m = 90, 180$ и $280 \mu\text{m}$ и датчиков МНПВО на основе СД ($\varnothing_m = 190 \mu\text{m}$) и ФД ($\varnothing_m = 190 \mu\text{m}$), оптически связанных с помощью трапецевидного волновода, полученного скалыванием пластины из GaAs (111).

Одиночные диоды и диоды в составе датчиков МНПВО были подвергнуты многократному облучению g-квантами от источника ^{60}Co с дозами облучения в диапазоне от 5 до $\sim 2 \cdot 10^3 \text{ kGy}$. Изучались изменения вольт-амперных, спектральных, фотоэлектрических характеристик и фототока (I_{ph}), а также значений токового шума (SI) в зависимости от соотношения площади и периметра активных областей диодов в интервале температур 200 – 300 К.

Показано, что ДГС р-InAsSbP/n-InAs и датчики МНПВО на их основе устойчивы к воздействию g-излучения ^{60}Co при дозах облучения, меньших $\sim 0.1 \text{ MGy}$, т.е. сохраняют почти неизменными такие параметры, как шум ($T = 300 \text{ K}$), сопротивление в нуле смещения (R_0) ($T = 200 - 300 \text{ K}$) и фототок при 300 К. При средних дозах облучения ($\sim 0.2 \text{ MGy}$) происходило временное снижение значений R_0 и I_{ph} и увеличение SI , которые примерно через месяц самопроизвольно восстанавливались до прежних значений. После больших доз облучения (2 MGy) также наблюдалась начальная деградация параметров: двух-трехкратное увеличение SI и уменьшение R_0 и I_{ph} , и фаза их частичного восстановления, однако в данном случае имела место необратимая деградация параметров диодов и датчика МНПВО. Анализ зависимости шума, нормированного на периметр облученных образцов $SI/(p\varnothing_m)$, от плотности тока (J) показал, что в начальный период после облучения коэффициент пропорциональности данной зависимости был единым для образцов с разным диаметром мез, поэтому изменения параметров диодов после облучения обусловлены, главным образом, образованием и частичным залечиванием дефектов, расположенных вблизи от боковой стенки мезы (периметра ДГС). При этом во всех случаях при низких частотах (f)

шум имел зависимость вида $1/f$, что характерно для диодов с наличием близкорасположенных дефектов, например, донорно-акцепторных пар [4].

Список литературы

1. Карандашев С А, Климов А А, Лухмырина Т С, Матвеев Б А, Ременный М А and Усикова А А 2022 Микрооптопара ($\lambda = 3.4 \mu\text{m}$) на основе двойной гетероструктуры InAsSbP/InAs для измерения концентрации этанола в водном растворе методом МНПВО *Опт. и спектр.* **180** 8 с 13
2. Broudin M and Chouikha M B 2022 Methodologies for efficient and reliable NPP polymer ageing management *EPJ Nucl. Sci. Technol.* **8** p 22
3. Boussandel M I, Fathallah A, Armani J-M, Armi F, Klisnick G, Ren Z and Chouikha M B 2023 Radiation tolerance assessment of COTS components for an optoelectronic system to measure polymer aging in nuclear environments *2023 RADECS Data Workshop (IEEE)* pp 1–5
4. Жигальский Г П 2012 *Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах* (Физматлит), с 512

Кластеризация фазовых соотношений в оптической частотной гребенке

Журавлев Г. С.¹, Ковалев А.В.¹, Викторов Е.А.¹

¹ИТМО

e-mail: gszhuravlev@itmo.ru

Особенности синхронизации мод в полупроводниковых лазерах представляют широкий академический и практический интерес. Динамические режимы, реализуемые благодаря этому эффекту востребованы в дальнометрии, оптических вычислениях, аппаратных нейронных сетях и других технологиях. Оптический спектр, соответствующий таким режимам – оптическая частотная гребенка (ОЧГ). Набор эквидистантных пиков в широкой полосе длин волн, составляющий ОЧГ, используется в спектроскопии и в качестве метрологического стандарта частоты [1]. В зависимости от вида функции спектральной фазы разделяют амплитудно-модулированные и частотно-модулированные ОЧГ [2].

В настоящей работе исследована модель двухсекционного полупроводникового лазера на основе системы дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом относительно комплексной амплитуды выходного поля, безразмерных усиления и поглощения, описывающая генерацию оптической частотной гребенки с помощью пассивной синхронизации мод. Данная модель характеризует лазер (с высоким усилением и потерями на обход, что специфично для полупроводниковых лазеров) с кольцевым резонатором, состоящий из области усиления, медленного насыщающегося поглотителя, а также внутрирезонаторного фильтрующего элемента с лоренцевым профилем пропускания.

С использованием численных методов и алгоритма коррекции спектральной фазы [3] проанализированы межмодовые разности фаз при различных параметрах системы. При исследовании режима с импульсом, уширенным относительно случая с постоянной

межмодовой разностью фаз обнаружен эффект кластеризации, выражающийся в формировании сигмоидной функции в распределении разностей фаз по частотам с максимумом производной, соответствующим центру оптического спектра. Наблюдаются кластеры разностей фаз в окрестностях значений 0 и $\frac{\pi}{2}$. Полученные данные демонстрируют сочетание свойств амплитудно- и частотно-модулированных ОЧГ в области частот.

С целью определения границ и сценариев возникновения наблюдаемого режима проведен бифуркационный анализ. Установлено, что режим синхронизации мод возникает из стационарного состояния через бифуркацию Хопфа и является неустойчивым. Стабилизация происходит через формирование кластеризации фазовых соотношений в оптической гребенке. Границы устойчивой синхронизации мод соответствуют седло-узловой бифуркации и бифуркации Хопфа.

Эффект связан с различным ненулевым уширением спектральных линий во внутрирезонаторных секциях ($\alpha_g=3$, $\alpha_q=1$ для секций усиления и поглотителя соответственно). На основе временной диаграммы интенсивности и эволюции мгновенной частоты установлено соответствие экспериментальным данным и получено объяснение наблюдаемой асимметрии формы импульса [4]. Наблюдение кластеризации дополняет теоретические представления о фазах синхронизированных мод и имеет прикладное значение в разработке систем спектроскопии, сенсорики и передачи данных.

Список литературы

1. Hansch T. W. Nobel Lecture: Passion for precision // Reviews of Modern Physics, Vol. 78, № 4, 2006, pp. 1297–1309
2. Hillbrand J. и др. In-phase and anti-phase synchronization in a laser frequency comb // Physical Review Letters., Vol. 124, № 2, 2020
3. Huang X. и др. A novel high-accuracy digitalized measuring phase method: 2008 9th International Conference on Signal Processing – Beijing, 2008
4. Verschelde A. и др. Analysis of the phase-locking dynamics of a III-V-on-silicon frequency comb laser // OSA Continuum, Vol. 4, № 1, 2021, pp. 129-136

Исследование оптических свойств интегральных X-разветвителей на основе нитевидных нанокристаллов GaP

Аникина М. А.^{1,2}, Кузнецов А.^{1,2}, Шаров В. А.^{2,3}, Абрамов А. Н.⁴, Кондратьев В. М.^{1,2},
Большаков А. Д.¹

¹МФТИ

²СПбАУ РАН им. Ж. И. Алфёрова

³ФТИ им. А. Ф. Иоффе

⁴ИТМО

e-mail: mari.a.nikina@yandex.ru

Оптические 2x2 или X-разветвители являются одними из базовых компонентов интегральных фотонных систем. Они могут использоваться как пассивные оптические

элементы, позволяя направлять свет, при этом выступая в качестве спектральных фильтров или разделителей мощности. Несмотря на хорошую изученность и технологичность, у него есть существенные недостатки, такие как сложность создания излучательных устройств и непрозрачность в видимом диапазоне, что затрудняет его применение в интегральных фотонных схемах. Фосфид галлия (GaP) соответствует требованию прозрачности в видимом диапазоне, кроме этого, он характеризуется высоким показателем преломления [1] и нелинейными параметрами в этом диапазоне [2]. Благодаря ширине запрещенной зоны (2.26 при комнатной температуре [3]) и возможностям получать кристаллы с малой шероховатостью боковых стенок [4], оптические элементы на основе GaP характеризуются низкими потерями на поглощение и рассеяние при распространении света видимого диапазона и могут быть использованы в качестве эффективных волноводов [5]. Также рост GaP имеет большой потенциал для совмещения с кремниевыми технологиями [6], кроме того, есть возможность реализации излучательных систем в пределах одной структуры на основе GaP за счёт изменения химического состава [7]. Всё это приводит к тому, что GaP имеет большие перспективы для создания миниатюрных элементов интегральной фотоники. Структуры GaP в виде нитевидных нанокристаллов (ННК) характеризуются хорошими механическими свойствами, и, благодаря высокому показателю преломления, ННК могут сгибаться с сохранением волноводных свойств [8]. В данной работе рассматриваются оптические свойства X-разветвителя на основе ННК GaP с целью создания полноценного фотонного устройства и дальнейшей возможности оптимизации его характеристик.

Было проведено численное 3D моделирование оптического элемента, расчеты проводились методом конечных разностей во временной области по алгоритму Йи в программном обеспечении Ansys Lumerical. Дополнительно были проведены расчеты упрощенной 2D модели системы методом конечных элементов в пакете программ COMSOL Multiphysics. Благодаря расчёту 3D модели были получены распределения интенсивности электрического поля в области оптической связи двух ННК, показывающие распределение мощности на выходных портах разветвителя, а также циклы перекачки энергии по мере распространения света в волноводах. Оба эффекта зависят от рабочей длины волны и длины оптической связи разветвителя. Кроме этого, в теоретических спектрах пропускания наблюдается появление полос пропускания, количество и ширина которых также зависит от длины оптической связи LC , диаметров ННК d и расстояния между ними g . Расчёт 2D модели подтверждает эти результаты, однако переход к расчету взаимодействия симметричных и антисимметричных супермод разветвителя позволяет существенно снизить сложность вычислений. Благодаря этому были построены карты зависимости интенсивности излучения на выходных портах разветвителя от длины волны излучения и второго параметра в виде геометрической характеристики структуры (LC , d , g), что в дальнейшем может быть использовано для оптимизации геометрии устройства под желаемый режим работы и анализа экспериментальных данных.

Также были реализованы экспериментальные образцы разветвителей. ННК были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии и механически перенесены на

стеклянную подложку со слоем ИТО. Формирование X-образных структур происходило путём передвижения ННК зондом атомно-силового микроскопа. Волноводные свойства элемента подтверждены путём получения оптических изображений разветвителей при за-светке каждого из четырёх портов лазером 532 нм и суперконтиннуом. Для последнего случая были получены спектры пропускания выходных портов, которые хорошо согласуются с расчётами.

Таким образом, в работе теоретически и экспериментально показано, что на основе ННК GaP могут быть получены эффективные X разветвители, которые могут быть использованы для направления и распределения света в фотонной схеме. Оптимизация геометрических параметров устройства приводит к настройке спектральных характеристик разветвителя, что позволяет получать различные режимы работы, в том числе режимы переключения и распределения мощности.

М.А.А. выражает благодарность Минобрнауки (проект FSMG-2021-0005, соглашение 075-03-2023-106) за поддержку численного моделирования. А.Д.Б. выражает благодарность РНФ (проект 24-12-00225) за поддержку экспериментальной части работы.

Список литературы

1. Bond W. L. Measurement of the refractive indices of several crystals //Journal of Applied Physics. – 1965. – Т. 36. – №. 5. – С. 1674-1677.
2. Singh S., Srivastava P. Optical properties of gallium phosphide (GaP) nanowires //Applied Nanoscience. – 2013. – Т. 3. – С. 89-94.
3. Lorenz M. R., Pettit G. D., Taylor R. C. Band gap of gallium phosphide from 0 to 900 K and light emission from diodes at high temperatures //Physical Review. – 1968. – Т. 171. – №. 3. – С. 876.
4. Fedorov V. V. et al. Gallium phosphide nanowires in a free-standing, flexible, and semitransparent membrane for large-scale infrared-to-visible light conversion //ACS nano. – 2020. – Т. 14. – №. 8. – С. 10624-10632.
5. Kuznetsov A. et al. In-Plane Directional MoS₂ Emitter Employing Dielectric Nanowire Cavity //Small Structures. – 2025. – С. 2400476.
6. Beyer A. et al. GaP heteroepitaxy on Si (001): Correlation of Si-surface structure, GaP growth conditions, and Si-III/V interface structure //Journal of Applied Physics. – 2012. – Т. 111. – №. 8.
7. Kuznetsov A. et al. Anisotropic Radiation in Heterostructured “Emitter in a Cavity” Nanowire //Nanomaterials. – 2022. – Т. 12. – №. 2. – С. 241.
8. Kuznetsov A. et al. Elastic gallium phosphide nanowire optical waveguides—versatile subwavelength platform for integrated photonics //Small. – 2023. – Т. 19. – №. 28. – С. 2301660.

Снижение внешней квантовой эффективности УФ-светодиодов, вызванное перелегированием барьеров кремнием

Шабунина Е. И.¹, Шмидт Н.М.¹, Черняков А.Е.², Тальнишних Н.А.², Закгейм А.Л.²,
Иванов А.Е.^{2,3}, Полякова А.Я., Алексанян Л.А.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НТЦ микроэлектроники РАН

³СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: jenni-85@mail.ru

UV-светодиоды с длиной волны 280 нм имеют низкие значения внешней квантовой эффективности (ВКЭ). Известны некоторые причины этого явления, такие как высокая энергия активации магния, случайные флуктуации состава твердого раствора AlGaIn, разупорядоченность гетерограниц. Проведенные в данной работе исследования выявили еще один источник снижения ВКЭ.

Исследование зависимостей спектров низкочастотного шума $S_I(f)$ в диапазоне $1 \div 10^3$ Гц в коммерческих УФ-светодиодах на длину волны 280 нм со значениями ВКЭ 5-7% позволило выявить особенности, не наблюдаемые в синих и зеленых светодиодах, в том числе с низкими значениями ВКЭ. Зависимости $S_I(f)$ в УФ-светодиодах имеют вид $S_I \sim 1/f^\nu$ где ν – показатель формы спектра. Согласно теоретическим представлениям, такой вид зависимостей свидетельствует о механических напряжениях в активной области светодиодов. При этом с ростом инжекционного тока 0.01-1.5 мА наблюдается снижение величины ν , т.е. снижение уровня механических напряжений в активной области светодиода, но полностью они не уходят. C-V профилирование активной области УФ-светодиодов показало [1], что уровень легирования барьеров активной области кремнием достигает 10^{19} см^{-3} и более чем на порядок превышает уровень легирования, используемый в синих и зеленых светодиодах. Такая высокая концентрация кремния с малым тетраэдрическим радиусом неизбежно должна приводит к росту механических напряжений, что и выявляется на зависимостях $S_I(f)$. В области частот $10^2 - 10^3$ Гц изменение вида зависимости $S_I(f)$ выявляет суперпозицию шума, создаваемого дефектами Шокли-Рида-Холла (ШРХ) и близко-расположенными дефектами. При этом вклад дефектов ШРХ в уровень шума растет с ростом инжекционного тока. С понижением температуры до 220 К значения ВКЭ в максимуме светодиодов растут на 30%. Отсутствие зависимости токового шума S_I от тока в интервале токов 0.2-2 мА указывает на излучательную рекомбинацию носителей заряда. Спектры электролюминесценции светодиодов при токе 1 мА подтверждают излучательную рекомбинацию, но не только в максимуме на длине волны 280 нм, но и в полосе 350-560 нм, а также в областях с другим составом твердого раствора. Эти результаты позволяют предполагать, что перелегирование барьеров кремнием также как присутствие областей с отличающимся составом твердого раствора приводит к потере носителей заряда и снижению ВКЭ в максимуме. Кроме того, присутствие дополнительных напряжений в барьерах может снижать срок службы УФ-светодиодов. Таким образом, введение

дополнительных механических напряжений вызывает перестройку дефектов при взаимодействии с носителями заряда в барьерах квантоворазмерной структуры светодиодов, находящихся в области объемного заряда p-n перехода.

Список литературы

1. Polyakov A. Y., Alexanyan L. A., Schemerov I. V., Vasilev A. A., Chernykh A. V., Ivanov A. E., Talnishnikh N. A., Chernyakov A. E., Zakgeim A. L., Shmidt N. M., Lagov P. B., Doroshkevich A. S., Isayev R. Sh., Pavlov Yu. S., Hsiao-Hsuan Wan, Fan Ren, and Pearton S. J., Point defect effects in AlGaIn 270-nm light emitting diodes introduced by MeV electron and proton irradiation, APL Mater., vol. 12, 121121, 2024

Разработка активных компонент для GaAs фотонных интегральных схем на основе микродисковых лазеров с InGaAs/GaAs квантовыми точками

Федосов И. С.¹, Н.А. Фоминых¹, Н.В. Крыжановская¹, И.С. Махов¹, Ю.А. Гусева², М.М. Кулагина², С.А. Минтаиров², Н.А. Калужный², Р.А. Хабибуллин³, Р.Р. Галиев³, А.Ю. Павлов³, К.Н. Томош³, М.С. Солодовник⁴, Н.Е. Черненко⁴, Н.А. Шандыба⁴, А.Е. Жуков¹

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³ИСВЧПЭ им. В.Г. Мокерова РАН, г. Москва

⁴ФГАОУ ВО «ЮФУ»

e-mail: isfedosov@hse.ru

В последнее время всё больший интерес привлекает реализация фотонных интегральных схем (ФИС) на GaAs, так как на основе этой системы материалов можно создавать эффективные источники и приемники оптического сигнала [1]. В качестве источников сигнала могут быть использованы микродисковые (МД) лазеры, обладающие высокой добротностью (порядка 10^5) и малыми размерами вплоть до единиц мкм [2]. Для реализации направленной передачи излучения таких микролазеров они могут быть эванесцентно связаны с оптическими волноводами (ОВ). При этом и МД лазеры, и ОВ изготавливаются из одной эпитаксиальной гетероструктуры, что увеличивает точность их позиционирования и упрощает технологический процесс по сравнению с гетерогенной интеграцией, например, [3]. Однако в этом случае имеет место частичное поглощение излучения МД лазера, распространяющегося по ОВ. В данной работе исследовалась возможность уменьшения потерь на поглощение в ОВ при приложении к нему прямого смещения. Исследуемые гетероструктуры получены методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке n^+ -GaAs. В качестве активной области были использованы 5 слоев квантовых точек $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$. МД лазеры диаметром 30 и 40 мкм, связанные с ОВ длиной порядка 440 мкм, были сформированы с помощью электронной литографии и плазменного реактивно-ионного травления. На вершинах мез лазеров и на волноводе с помощью металлизации AgMn/Ni/Au были сформированы изолированные друг от друга омические контакты к слою p^+ -GaAs.

Для подавления лазерной генерации самого ОВ на модах Фабри-Перо торцы ОВ были скошены с помощью фокусированного ионного пучка, в результате чего было существенно подавлено обратное отражение и лазерной генерации при токах накачки ОВ вплоть до 70 мА не наблюдалось. МД лазеры работали при комнатной температуре в режиме постоянной накачки, вывод излучения МД лазеров регистрировался с торцов ОВ с помощью микрообъектива Mitutoyo x20 и измерителя мощности Thorlabs S155C. Исследованы особенности ватт-амперных характеристик микролазеров, связанных с ОВ, обусловленных как конкуренцией мод шепчущей галереи, так и мод, распространяющихся по и против часовой стрелки в дисковом резонаторе. Выполнен анализ выводимой оптической мощности с торца ОВ при разном токе на нем (от 0 до 70 мА). Получено существенное увеличение выводимой мощности микролазера (почти на порядок) при приложении к ОВ тока величиной порядка 55 мА, вследствие эффекта «просветления». Таким образом, показана перспективность использования МД лазеров эванесцентно связанных с ОВ на основе GaAs и выполненных из единой эпитаксиальной структуры как элементарного компонента для ФИС.

Исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Список литературы

1. Dietrich C.P. et al. *Laser & Photonics Reviews*, **10** (6), 870–894 (2016).
2. Kryzhanovskaya N. et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **54** (45), 453001 (2021).
3. Guilhabert B. et al. *Opt. Lett.*, **43** (20), 4883–4886 (2018).

Фотоэлектрические преобразователи на основе гетероструктур $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,2}\text{In}_{0,7}\text{Sb}_{0,2}\text{P}_{0,8}/\text{InP}$

Лунин Л. С.¹, Лунина М. Л.¹, Донская А. В.²

¹ЮНЦ РАН

²ЮРГПУ (НПИ)

e-mail: alina_donskaya.8@mail.ru

Развитие электроники в значительной степени определяется достижениями технологии новых материалов. К новым перспективным материалам относятся, в частности, полупроводниковые гетероструктуры на основе многокомпонентных твердых растворов соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Интерес к ним вызван возможностью формирования структурно совершенных гетеропереходов за счет одновременного согласования параметров решетки и коэффициентов термического расширения сопрягающихся материалов, а также увеличением числа степеней свободы твердых растворов, которые позволяют синтезировать элементную базу приборов оптоэлектроники с заданными свойствами.

Твердый раствор AlGaInSbP до настоящего момента не был получен ни одним из эпитаксиальных методов. Имеется упоминание в 2015 году о данном твердом растворе в патенте RU2696352C2, но только как об одном из множества претендентов на активный слой

солнечного элемента из соединений $A^{III}B^V$ на кремниевой подложке [1]. Твердый раствор $AlGaInSbP$ может быть получен на основе четверного твердого раствора $AlGaInSb$ [2] путем добавления в него фосфора или из $AlGaInAs$ (замещением мышьяка фосфором и сурьмой), который может быть согласован по параметру решетки с подложкой InP .

Известно, что выращивание пленок методами молекулярно-лучевой эпитаксии и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений в случае трех и более элементов в составе сопровождается образованием капель на поверхности роста из элементов III или V групп [3]. Поэтому синтез таких твердых растворов из жидкой фазы перспективен, в первую очередь, в силу контролируемости термодинамического и морфологического состояния межфазных границ, а также концентрации безызлучательных центров рекомбинации, что существенно для многих оптоэлектронных приборов. Метод зонной перекристаллизации градиентом температуры (ЗПГТ) [4] является одной из модификаций метода жидкофазной эпитаксии и характеризуется малым пересыщением на фронте кристаллизации, высокой изотермичностью и низкими значениями концентрационного переохлаждения. ЗПГТ используется для получения светодиодов, термофотозлектрических преобразователей и некоторых электронных устройств, где для достижения высоких токов и напряжений требуется выращивание толстых легированных слоев, что недостижимо в методах МЛЭ и МОСГФЭ [5]. В последние годы при получении полупроводников $A^{III}B^V$ и наноструктур на их основе наблюдается тенденция к снижению температур роста, чтобы подавлять поверхностную диффузию активных компонентов и высоколетучесть компонентов V-группы. В этом аспекте метод ЗПГТ позволяет проводить более низкотемпературные процессы, чем МОСГФЭ.

Гетероструктуры $Al_{0,1}Ga_{0,2}In_{0,7}Sb_{0,2}P_{0,8}/InP(100)$ были получены градиентной жидкофазной эпитаксией с подпиткой жидкой зоны поликристаллом $InAlPSb$ при температуре роста $T = 823$ К, толщине раствора-расплава $l = 200$ мкм с градиентом температуры в нем $G = 20$ К/см. Исходные данные для ростового процесса были определены путем изучения скорости синтеза твердых растворов $Al_{0,1}Ga_{0,2}In_{0,7}Sb_{0,2}P_{0,8}$ на подложках $InP(100)$. Состав, полученных гетеросистем, подтвержден вторичной-ионной масс-спектрометрией и рамановской спектроскопией. Выявлено, что вследствие высокого коэффициента распределения фосфора, в эпитаксиальных слоях $AlGaInSbP$ вблизи гетерограницы наблюдается избыток атомов P, которые замещают атомы Sb. Вызванное нарушение симметрии кристаллической решетки в эпитаксиальных слоях отражается в наличии запрещенных поперечных оптических мод InP ($\hbar\omega = 291$ см⁻¹) и GaP ($\hbar\omega = 367$ см⁻¹). Несмотря на это, исследование спектров фотolumинесценции показали, что полная ширина пика на полувысоте интенсивности составляет 43 мэВ, свидетельствующее о достаточном уровне кристаллического совершенства гетероструктур $Al_{0,1}Ga_{0,2}In_{0,7}Sb_{0,2}P_{0,8}/InP(100)$. Максимальная испускательная способность соответствует граничному значению между видимым и ближним ИК спектрами $\lambda = 787$ нм. Исследованы спектральные характеристики гетеросистемы с использованием широкозонного окна $AlInP$. Результаты подтвердили эффективность применения гетероструктур $AlInP/Al_{0,1}Ga_{0,2}In_{0,7}Sb_{0,2}P_{0,8}/InP$ в качестве фотоэлектрических

преобразователей, работающих в широком диапазоне длин волн 500–6000 нм с высоким внешним квантовым выходом $\eta \approx 95\%$.

Список литературы

1. Бугге Р., Мюрвогнес Й. Способ эпитаксиального выращивания границы раздела между материалами из III-V групп и кремниевой пластиной, обеспечивающий нейтрализацию остаточных деформаций // Патент РФ № 2696352С2. 2015.
2. Svensson S.P., Mahadik N.A., Kipshidze G., Donetski D., Zhao J., Belenky G. Review of Virtual Substrate Technologies for 6.3 Ångström Lattice Constants // J. Vac. Sci. Technol., A. 2023. V. 41. № 4. P. 040802.
3. Sterzer E., Knaub N., Ludewig P., Straubinger R., Beyer A., Volz K. Investigation of the Microstructure of Metallic Droplets on Ga(AsBi)/GaAs // J. Cryst. Growth. 2014. V. 408. P. 71–77.
4. Лозовский В.Н. Зонная плавка с градиентом температуры // М.: “Металлургия”, 1972. 240 с.
5. Малышев С.А. Высокоскоростные фотодиоды на гетероструктурах на основе арсенида галлия и фосфида индия: Дис. ... д-р. физ.-мат. наук по спец. 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах. Минск: Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 2010. 205 с.

Гибридные каскадные солнечные элементы на основе бондинга материалов A^3B^5 и кремния

Минтаилов С. А.¹, Емельянов В.М., Калюжный Н.А., Нахимович М.В.¹, Салий Р.А.¹, Шварц М.З.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mintairov@scell.ioffe.ru

Во второй половине прошлого столетия благодаря развитию эпитаксиальных технологий, в частности, метал-органической газофазной эпитаксии (МОГФЭ), были созданы солнечные элементы (СЭ) на основе арсенида галлия, и с этого момента стали активно исследоваться СЭ на основе материалов A^3B^5 . Они имеют высокий потенциал КПД, хорошую температурную стабильность, радиационную стойкость и возможность создания структур с несколькими р-п переходами. К настоящему моменту в результате исследований была продемонстрирована высокая эффективность преобразования энергии наземного солнечного спектра однопереходными СЭ на основе материалов A^3B^5 : 29.1% для GaAs, 24.2% для InP, 16.6% для AlGaAs и 22% для GaInP СЭ [1].

Первый многопереходный (МП) СЭ на основе тандема GaInP/GaAs был реализован в 1990 году и имел КПД 27% (AM1.5D) [2]. В 2005 году были созданы GaInP/GaAs/Ge трехпереходные СЭ с КПД 39.0% (AM1.5D) [3]. В настоящее время для наземных условий достигнута самая высокая эффективность преобразования 47.1% (AM1.5D, кратность концентрирования излучения 143 X) при использовании шестипереходных инвертированных метаморфных СЭ [4]. Для космических условий (спектр AM0) на данный момент наилучшие

лабораторные значения КПД составляют: 35.8% для механически стыкованных пятипереходных СЭ [5]. и 33.7% для инвертированных монокристаллических МП СЭ [6]. Однако в производстве до сих пор доминируют согласованные по параметру кристаллической решетки монокристаллы GaInP/Ga(In)As/Ge трехпереходные СЭ с КПД ~40-41% в наземных условиях и ~30-31% в космосе. Решение задачи дальнейшего увеличения КПД лежит в плоскости новых конструктивных и структурных исполнений МП СЭ: метаморфные гетероструктуры [7], механическая стыковка СЭ [8], а также технология «бондинга» пластин [9].

Успешные варианты «бондинга» двухпереходных GaInP/GaAs и GaInP/GaInAsP тандемов с однопереходным Si СЭ за счет взаимной интердиффузии поверхностей полупроводников и сил Ван-Дер-Вальса были недавно представлены в работах [10, 11] в конфигурации для наземного солнечного спектра AM1.5G, что позволило продемонстрировать КПД СЭ на уровне 36.1% [11].

В данной работе проведено исследование различных пар материалов A^3B^5 для широкозонного тандема и различных конструкций кремниевых СЭ для создания гибридных (Al)GaInP/(Al)Ga(In)As(P)//Si СЭ. Проведены расчеты спектральных характеристик субэлементов гибридных СЭ, и определены толщины фотоактивных слоев, обеспечивающие согласование субэлементов по фотогенерированному току. Созданы чипы субэлементов и тандемных СЭ, а также определены пути достижения КПД 45% для наземных условий и 35% для космических.

Список литературы

1. Green M.A., Dunlop E.D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. "Solar cell efficiency tables (Version 56)"// *Progr. Photovoltaics* 2020; 28: 629. doi:10.1002/ppv.3303
2. Olson J.M., Kurtz S.R., Kibbler A.E. "A 27.3% efficient $Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs$ tandem solar cell" // *Appl. Phys. Lett.* 1990; 56:623. DOI: 10.1063/1.102717
3. R.R. King, D.C. Law, C.M. Fetzer, R.A. Sherif, K.M. Edmondson, S. Kurtz, G.S. Kinsey, H.L. Cotal, D.D. Krut, J.H. Ermer, and N.H. Karam "Pathways to 40%-efficient concentrator photovoltaics" // *Proc. 20th EPVSEC* 2005, p. 118, . <https://www.spectro-lab.com/pv/support/R.%20King%20et%20al.,%20EU%20PVSEC%202005,%20Pathways%20to%2040%25.pdf>
4. Geisz J.F., France R.M., Schulte K.L. et al. "Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration" // *Nat Energy* 2020, 5, 326–335 . <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5>
5. Li X., Li G., Lu H., Zhang W. ">35% 5-junction space solar cells based on the direct bonding technique" // *J Semicond.* 2021, 42(12):122701. DOI: 10.1088/1674-4926/42/12/122701
6. Patel P., Aiken D., Chumney D., Cornfeld A., Lin Y., Mackos C., et al. "Initial results of the monolithically grown six-junction inverted metamorphic multi-junction solar cell" // *IEEE 38th PVSC PART 2* 2012, 1. doi: 10.1109/PVSC-Vol2.2012.6656717
7. Geisz J.F., Kurtz S., Wanlass M.W., Ward J.S., Duda A., Friedman D.J., et al. "40.8% Efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions" // *Appl Phys Lett* (2007), 91, 023502. doi:10.1063/1.2753729
8. Kao Y.C., Chou H.M., Hsu S.C., Lin A., Lin C.C., Shih Z.H., et al. "Performance comparison of III-V//Si and III-V//InGaAs multi-junction solar cells fabricated by the

- combination of mechanical stacking and wire bonding” // *Sci Rep* 2019, 9(1), 4308. doi:10.1038/s41598-019-40727-y
9. Dimroth F., Grave M., Beutel P., Fiedeler U., Karcher C., Tibbits T.N.D., et al. “Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency” // *Prog Photovoltaics Res Appl* 2014, 22(3), 277. doi:10.1002/pip.2475
 10. P. Schygulla, R. Müller, D. Lackner, O. Höhn, H. Hauser, B. Bläsi, F. Predan, J. Benick, M. Hermle, S. Glunz, F. Dimroth “Two-terminal III–V//Si triple-junction solar cell with power conversion efficiency of 35.9 % at AM1.5g” // *Prog Photovolt Res Appl*. 2022, 30, 869. doi:10.1002/pip.3503
 11. Schygulla P., Müller R., Höhn O., et al. “Wafer-bonded two-terminal III-V//Si triple-junction solar cell with power conversion efficiency of 36.1% at AM1.5g” // *Prog Photovolt Res Appl*. 2025, 33(1), 100. doi:10.1002/pip.3769

Анализ расположения управляющих элементов в биморфном деформируемом зеркале с радиально-кольцевой геометрией электродов

Топоровский В. В.^{1'2}, Галактионов И.В.^{1'2'3}, Кудряшов А.В.¹

¹IDG RAS, Moscow, Russia

²Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow, Russia

³Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

e-mail: toporovskii_v@mail.ru

Фазовая поверхность может быть аппроксимирована двумя принципиально различными методами: зональным или модальным. В связи с широким использованием круглых (кольцевых) апертур в передающих телескопических системах применяется модальный метод представления фазовой поверхности. Данный метод заключается в описании волнового фронта при помощи детерминированных базисных функций, удовлетворяющих условию ортонормированности. Такими функциями могут быть полиномы Цернике либо полиномы Карунена-Лозва [1]. Использование первых предпочтительно с точки зрения их описания в аналитической форме. Также они могут быть использованы для оценки эффективности коррекции фазовых aberrаций волнового фронта адаптивной оптической системой.

Однако, компенсация aberrаций волнового фронта лазерного излучения сопряжена с проблемой нахождения оптимальной конфигурации управляющих элементов корректора волнового фронта для эффективной коррекции флуктуаций фазы [2]. В работе произведена теоретическая оценка возможности коррекции пространственных частот спектра атмосферной турбулентности при помощи биморфных деформируемых зеркал с различными конфигурациями управляющих элементов: с 7-, 19-, 37-, 61-, 91- и 127-ю электродами [3,4]. Было произведено моделирование методом конечных элементов с целью определения оптимального количества электродов для коррекции крупномасштабных aberrаций волнового фронта лазерного излучения (Z3-Z15). Эффективность воспроизведения

полиномов Цернике по форме оценивались по критерию Марешаля [5] в соответствии с величиной остаточного среднеквадратичного отклонения. Использование зеркала с радиально-кольцевой структурой и 61-м электродом оказалось оптимальным для коррекции сферической аберрации, трилистников и комы 2-го порядка в сравнении с 37-элементным зеркалом. Разница в точности воспроизведения между 61- и 91-элементным зеркалом незначительна (<3%).

Список литературы

1. Dai G. M., "Modal compensation of atmospheric turbulence with the use of Zernike polynomials and Karhunen-Loève functions", *Journal of the Optical Society of America A* 12, 2182-2193 (1995).
2. Verpoort S., Wittrock U., «Actuator patterns for unimorph and bimorph deformable mirrors», *Appl. Opt.* 49, G37-G46 (2010).
3. J. Sheldakova, I. Galaktionov, A. Nikitin, A. Rukosuev, V. Samarkin, V. Toporovsky, A. Kudryashov, «Miniature bimorph deformable mirror for laser beam shaping», *Proc. SPIE* 11266, pp. 112661L, 2020.
4. Galaktionov I, Sheldakova J, Samarkin V, Toporovsky V, Kudryashov A. «Atmospheric Turbulence with Kolmogorov Spectra: Software Simulation, Real-Time Reconstruction and Compensation by Means of Adaptive Optical System with Bimorph and Stacked-Actuator Deformable Mirrors», *Photonics* **10**, 1147, 2023.
5. Tyson R. K. *Principles of adaptive optics* / R. K. Tyson. – Boca Raton, CRC Press, 2022. – 356 p.

Исследование фотоэлектрических и электрофизических свойств гетероструктур i-aSi:H/SiO₂/p-Si

Котина И. М.¹, Базлов Н.В.^{1,2}, Бондаренко А.С.¹, Дербин А.В.¹, Драчнев И.С.¹, Коньков О.И.^{1,3}, Муратова В.Н.¹, Трушин М.В.¹, Унжаков Е.В.¹

¹ПНПФ - НИЦ «КИ»

²СПбГУ

e-mail: unzhakov_ev@pnpi.nrcki.ru

Известно, что в структурах типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) с туннельно-тонким диэлектриком наблюдается эффект усиления фототока (транзисторный эффект). Эффект проявляется в режиме инверсии зон на поверхности полупроводника и изучался, в основном, на МДП структурах созданных на низкоомных подложках [1-2] и на наночастицах кремния [3].

Интересными структурами для изучения этого эффекта являются гетероструктуры на высокоомном p-Si с двухслойным диэлектриком из нелегированного аморфного кремния (i-aSi:H) и двуокиси кремния (SiO₂). В этом случае, во-первых, можно ожидать значительного уменьшения плотности поверхностных состояний на гетерогранице благодаря пассивации поверхности кремния обоими диэлектриками [4]. Во-вторых, использование

высокоомного кремния дает возможность увеличить чувствительность за счет увеличения площади при уменьшении емкости по сравнению с низкоомной подложкой.

В настоящей работе представлены результаты первых исследований фотоэлектрических и электрофизических свойств гетероструктур $i\text{-aSi:H/SiO}_2/\text{p-Si}$. Гетероструктуры создавались на основе p-Si (111) с удельным сопротивлением больше $1 \text{ кОм}\cdot\text{см}$. Пленки аморфного кремния $i\text{-aSi:H}$ наносились методом магнетронного разложения силана MASD (magnetron assisted silane decomposition) в смеси газов SiH_4 (25%) и Ar (75%) на предварительно окисленные в концентрированной азотной кислоте подложки. Окисление производилось при комнатной температуре после травления в смеси HF:HNO_3 (1:8) и последующей выдержке в водном растворе HF . В качестве металлического затвора использовался Al . Омическим контактом с обратной стороны подложки служил Pd . Исследовались темновые и световые (с максимум излучения при длине волны $\lambda=950 \text{ нм}$) вольт-амперные характеристики а также вольт-емкостные характеристики при прямых и обратных смещениях на частотах в области 1-500 кГц. Исследовались структуры с различной толщиной нелегированного аморфного кремния $i\text{-aSi:H}$. На всех исследуемых структурах наблюдалась зависимость фототока от обратного смещения. При этом коэффициент усиления фототока увеличивался с увеличением толщины $i\text{-aSi:H}$. Максимальное усиление фототока $5\cdot 10^3$ было получено в гетероструктурах с толщиной $i\text{-aSi:H}$ 20 нм при обратном смещении 15 В.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в кремниевых аморфно- кристаллических гетероструктурах $i\text{-aSi:H/SiO}_2/\text{p-Si}$ с туннельным диэлектриком из двуокиси кремния может быть реализован высокий коэффициент внутреннего усиления фототока.

Список литературы

1. И. В. Грехов, М. И. Векслер, П. Ф. Иванов, Т. П. Самсонова, А. Ф. Шулекин // ФТП т. 32, № 9, стр. 1145, 1998.
2. C. W. Liu, W. T. Liu, M. H. Lee, W. S. Kuo, and B. C. Hsu // IEEE ELECTRON DEVICE Letters, vol. 21, # 6, 2000.
3. О. С. Кен, Д.А. Андроников, Д.А. Явсин, А.В. Кукин, С.Н. Данилов, А.Н. Смирнов, О.М. Сресели, С.А. Гуревич // ФТП т. 48, № 11, стр. 1555-1581, 2014.
4. C. H. Lin and C. W. Liu // Sensors, vol. 10, p. 8797-8826, 2010.

Конструкция чипа полупроводникового лазера с резонатором, сформированным двумерным фотонным кристаллом

Золотарев В. В.¹, Некрасов А.С.¹, Орешко И.В.¹, Казакова А.Е.¹, Слипченко С.О.¹, Пихтин Н.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: zolotarev.bazil@mail.ioffe.ru

Полупроводниковые лазеры с резонатором на основе двумерного фотонного кристалла (ФК), сформированного воздушными отверстиями в слоях гетероструктуры, последнее время вызывают большой интерес, поскольку позволяют получать высокомогущное лазерное излучение с симметричной картиной в дальней зоне и малым углом расходимости [1-3]. В отличие от классических вертикально излучающих лазеров (VCSEL), в лазерах с ФК стимулированное излучение распространяется вдоль слоев гетероструктуры, что обеспечивает увеличение объема активной области и, как следствие, максимальной выходной оптической мощности, а вывод излучения с поверхности чипа обусловлен дифракцией лазерного излучения на ФК. Наличие ФК формирует для электромагнитного излучения, распространяющегося в волноводном слое гетероструктуры, распределенную обратную связь, аналогично случаю классического РОС лазера, что обуславливает резонаторные свойства. Расчеты зонной диаграммы 2D-ФК с квадратной симметрией демонстрируют, что подходящей точкой для формирования распределенной обратной связи и вывода излучения с поверхности чипа является Γ -точка второго порядка. Вывод излучения с поверхности исключает необходимость в сколотых гранях, что позволяет применять лазеры данной конструкции в элементах интегральной фотоники. При этом размеры области излучения с поверхности чипа могут превосходить 200x200мкм, что обеспечивает симметричную расходимость с малым углом.

В данной работе на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs/InGaAs были проведены полуаналитические расчеты потерь на выход для резонаторов на основе 2D-ФК квадратной симметрии, сформированных в верхней обкладке лазерного волновода отверстиями различной геометрической формы и размера. Длина волны излучения составляла порядка 1040нм. Для данной длины волны период ФК соответствующий Γ -точке второго порядка составляет порядка 0.3мкм. Γ -точка второго порядка состоит из четырех мод (четыре дисперсионные ветви), для каждой из которых могут существовать несколько конфигураций распределения интенсивности лазерного излучения в ближнем поле, в зависимости от размера излучающей области. Потери на выход определяют с одной стороны пороговые свойства для каждой моды, с другой стороны её излучательную эффективность. Генерация лазерного излучения будет осуществляться на моде с наименьшими оптическими потерями, при этом для достижения стабильного одномодового режима необходимо обеспечить существенную модовую дискриминацию. С другой стороны моды с величиной оптических потерь на выход близкой к нулю обладают очень низкой внешней квантовой дифференциальной эффективностью, что может быть востребовано в задачах, где

необходимы высокодобротные резонаторы, однако не применимо для создания мощных полупроводниковых лазеров.

Расчеты продемонстрировали, что моды с нулевыми оптическими потерями характерны не только для ФК с круглыми отверстиями, но и отверстиями любой геометрической формы с симметрией C_2 даже при отсутствии зеркальной симметрии. Для отверстий, не обладающих симметрией C_2 , величина потерь на выход в том числе зависит от размера отверстия, с увеличением размера происходит рост как абсолютного значения потерь, так и модовой дискриминации. Однако при достижении фактора заполнения (отношения площади отверстия к площади элементарной ячейки) значений более 30-35% рост потерь либо насыщается, либо потери начинают уменьшаться. Основной причиной такого поведения является существенное снижение Γ -фактора волноводной моды в области ФК, что обусловлено снижением средней диэлектрической проницаемости слоя ФК с ростом размера воздушного отверстия. Таким образом, величина оптических потерь на выход является вопросом оптимизации с одной стороны размеров отверстий, формирующих ФК, с другой стороны дизайна лазерной гетероструктуры, определяющего Γ -фактор волноводной моды в ФК.

Увеличение апертуры излучения, с целью увеличения максимально достижимой выходной оптической мощности, приводит к снижению пороговых условий для мод высших порядков, обладающих несколькими пиками в картине ближнего поля, что негативно сказывается на расходимости лазерного излучения в дальней зоне. Основной механизм модовой дискриминации для ближнепольных конфигураций являются латеральные оптические потери в ФК конечного размера, которые связаны с выходом оптического излучения за пределы излучающей области в плоскости волновода. С увеличением излучающей апертуры моды высших порядков локализуются ближе к центру, что приводит к снижению латеральных потерь.

Список литературы

1. Hong K-B., Chen L-R., Huang K-C., Yen H-T., Weng W-C., Chuang B-H. Lu T-C., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., том 28, 1–7, 2022
2. Liang Y., Peng C., Sakai K., Iwahashi S., Noda S., Opt. Express, том 20, 15945, 2012
3. Yang Z., Kuo C., Lin G., Photonics, том 8, 189, 2021

Исследование предельных энергетических возможностей мощных УФ (370 нм) матричных излучателей: токовый и температурный факторы

Черняков А.Е.¹, Закгейм А.Л.¹, Иванов А.Е.¹, Тальнишних Н.А.¹, Шабунина Е.И.²

¹НТЦ микроэлектроники РАН

²ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: chernyakov.anton@yandex.ru

Мощные ультрафиолетовые (УФ) светодиодные излучатели мягкого UV-A диапазона 315–400 nm находят новые применения в технологических процессах (полимеризация), люминесцентном анализе, биологии, медицине. Расширение сферы применения УФ-излучателей делает актуальной задачу исследования их предельных энергетических характеристик, включая как достижение максимальной оптической мощности, так и зависимости эффективности и ресурса работы от тока нагрузки и температуры.

Цель работы заключалась в исследовании энергетических, спектральных и тепловых характеристик мощного матричного УФ-излучателя и установлении факторов, ограничивающих главные энергетические параметры: оптическую мощность и КПД. При этом экспериментально решались задачи "мэппинга" по площади излучающей матрицы и отдельного чипа яркостного, спектрального, токового и температурного, распределений в зависимости от уровня входной мощности. Полученные результаты представляют интерес, как при разработке матричных светодиодных излучателей большой мощности, так и оптимизации их работы в различных применениях [1].

Исследуемый УФ-излучатель CBM-120-UV (Luminus Devices, Inc., США) [2] состоит из 12 плотно "упакованных" InGaN/GaN светодиодных чипов вертикальной конструкции, соединенных параллельно и размещенных на общей коммутационной плате-носителе – теплоотводе в конфигурации 4 линейки по 3 чипа в каждой (площадь чипа 1 mm²), зазор между чипами 100 μm. Теплоотвод (корпус) выполнен из меди – пластина размерами 28×28 mm², толщиной 3.5 mm, снабжена термистором для контроля температуры и отверстиями для закрепления на внешнем радиаторе.

Электрооптические и тепловые характеристики исследовались в диапазоне рабочих токов от 1 А до 18 А, с использованием тепловизионного контроля – инфракрасный тепловизионный микроскоп УТК-1 (ИФП СО РАН) для температурного мэппинга, и OL770 LED Test and Measurement System (Optronic Lab, США) для исследования интегральных мощностных и спектральных характеристик. Спектрометр Avantes 2048 (Avantes BV, Нидерланды), снабженный позиционируемым с малым шагом волоконным вводом, использовался для сканирования по площади матрицы и измерения оптической мощности и спектра излучения каждого чипа.

Было установлено, что при токах выше 9 А (0.75 А, через отдельный чип) в матрице начинается развитие температурных градиентов. Так, при токе 15 А температура центральных чипов превышает температуру периферийных на 5 К за счет худших условий теплоотвода

(в части горизонтального теплорастекания). При этом оптическая мощность, снимаемая с центральных чипов оказывается на 30% выше, чем с периферийных. Этот эффект, на первый взгляд, парадоксальный - с температурой падает квантовая эффективность η , объясняется высокой чувствительностью к температуре прямого падения напряжения U_f и отрицательным значением его температурного коэффициента TCU » - 0.9 mV/K. Повышение температуры центральных чипов уменьшает прямое напряжение на них, что, при параллельном соединении, способствует росту тока через них, еще большему нагреву и, соответственно, снижению напряжения. Возникает положительная обратная связь, ведущая к достижению стабильного состояния, но уже когда ток центральных чипов, оказывается выше, чем периферийных.

Помимо градиентов в величине тока «большого» масштаба между отдельными чипами, возникают его градиенты и «малого» масштаба внутри отдельного чипа – шнурование тока вблизи и под контактом (current crowding) [3]. Последний эффект сильно зависит от общей конструкции чипа, топологии контактов, их удельного сопротивления и приводит к тому, что локальная плотность тока может заметно превышать среднюю, соответственно, искажать зависимость от тока квантового выхода (форсировать «efficiency droop») и даже приводить к катастрофическому отказу.

Полученные данные подтверждают, что предельные значения тока через УФ-излучатели CBM-120-UV составляют до ~20 А при этом значение выходной оптической мощности достигает 18 W, что можно рассматривать, как весьма высокие значения. Дальнейшее повышение «энергетики» УФ излучателя такого типа упирается в принципиальные физические ограничения, а именно локализацию тока до значений, приводящих к крутому падению внешней квантовой эффективности и насыщению выходной оптической мощности.

Список литературы

1. Chernyakov et al. Experimental study of electroluminescence and temperature distribution
2. in high-power AlGaInN LEDs & LED arrays. Microelectronics Reliability 79 (2017) 457–461
3. CBM-120-UV Product Datasheet <https://www.luminus.com/products/uva>
4. M. Bogdanov et al. Current spreading, heat transfer, and light extraction in multipixel LED array. phys. stat. solidi (c), No. 6, 2070–2072 (2008)

Технология изготовления планарных фотонных интегральных схем на основе нитрида кремния

Абанин А. И.^{1,2}, Р.М. Рязанов², А.Д. Голиков³

¹Ульяновский государственный университет

²ФГБНУ НПК «Технологический центр»

³Университет науки и технологий МИСИС

e-mail: aai-2000@mail.ru

Микрокольцевые резонаторы широко применяются в фотонных интегральных схемах (ФИС) для создания различных устройств фотоники: фильтров, генераторов оптических частотных гребенок, гироскопов, узкополосных лазеров, сенсоров [1]. Применение ФИС позволяет отказаться от использования дискретных волоконных компонентов, что в свою очередь обеспечивает миниатюризацию, снижение стоимости и повышенную стабильность таких устройств.

В настоящее время активно развиваются несколько технологий, позволяющих создавать ФИС с МКР и другими пассивными оптическими устройствами. Наиболее широко используются платформы на основе нитрида кремния (Si_3N_4) и кремния на изоляторе (КНИ). Однако, несмотря на целый ряд достижений, демонстрируемых на основе КНИ, пассивные устройства из нитрида кремния обладают рекордно низкими оптическими потерями, а меньший контраст показателя преломления ($|\Delta n| \approx 2$ для Si_3N_4 и $|\Delta n| \approx 0,5$ для КНИ) обеспечивает меньшую чувствительность устройств из нитрида кремния к производственным дефектам, таким как шероховатость поверхности волновода, что делает платформу нитрида кремния более привлекательной для реализации массового производства ФИС. [2] Однако существенным препятствием для применения ФИС является отсутствие производственной технологии, позволяющей обеспечить массовое производство таких устройств. Таким образом, целью данной работы является разработка технологических подходов к изготовлению фотонных интегральных схем на основе Si_3N_4 , работающих в телекоммуникационном диапазоне длин волн и включающих в свой состав микрокольцевые резонаторы (МКР).

С применением оборудования отечественного производства НПК «Технологический центр» была отработана технология формирования пленок SiO_2 и Si_3N_4 с толщиной 2,7 мкм и 450 нм соответственно. Слой SiO_2 формировался методом термического окисления, слой Si_3N_4 – методом химического осаждения из газовой фазы (LPCVD). Получение слоев проводилось на поверхности монокристаллических кремниевых пластин диаметром 100 мм. Сформированные многослойные структуры использовались для изготовления ФИС с МКР.

Каждый образец включал в себя ряды кольцевых резонаторов с волноводами и устройствами для ввода/вывода излучения, различающихся геометрическими параметрами элементов. Проектирование элементов и шаблонов для литографии осуществлялось в среде программирования Python. Изготовление проводилось с применением электронно-

лучевой литографии. Измерения спектральных характеристик изготовленных структур проводились на специализированном стенде [3].

С использованием полученных результатов измерений спектральных характеристик изготовленных структур были рассчитаны основные параметры МКР: собственная добротность (Q), свободный спектральный диапазон (FSR), величина оптических потерь в резонаторе. Определено влияние технологических режимов и геометрических характеристик резонатора на оптические характеристики ФИС. Определено оптимальное расстояние зазора между кольцевым резонатором и волноводом, обеспечивающее наилучшие параметры.

Результаты показали, что изготовленные образцы ФИС с МКР характеризуются $Q > 2,5 \cdot 10^5$ и FSR = 3 нм. Таким образом, отработанная технология изготовления планарных высокодобротных кольцевых резонаторов на подложках Si/SiO₂/Si₃N₄ открывает возможность для проведения дальнейших разработок и изготовления фотонных интегральных схем различного назначения на отечественном производстве НПК «Технологический центр».

Список литературы

1. R. C. Williamson and R. D. Esman, "RF photonics," J. Lightw. Technol., vol. 26, no. 9, pp. 1145–1153, May/Jun. 2008.
2. N. Daldosso, M. Melchiorri, F. Riboli, M. Girardini, G. Pucker, M. Crivellari, P. Bellutti, A. Lui, and L. Pavesi, "Comparison among various Si₃N₄ waveguide geometries grown within a CMOS fabrication pilot line," J. Lightwave Technol. 22, 1734–1740, 2004.
3. An, Pavel, Kovalyuk, V., Golikov, A, Zubkova, E, Ferrari, Simone, Korneev, Alexander, Pernice, Wolfram, Gol'tsman, G.N., Experimental optimisation of O-ring resonator Q-factor for on-chip spontaneous four wave mixing. Journal of Physics: Conference Series. 1124. 051047. 10.1088/1742-6596/1124/5/051047, 2018.

Импульсные характеристики однопереходных и 3-х переходных фотопреобразователей лазерного излучения

Калиновский В. С.¹, Толкачев И.А.¹, Контрош Е.В.¹, Прудченко К.К.¹, Юферев В.С.¹, Иванов С.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kontrosh@mail.ioffe.ru

В настоящее время активно развивается такое научно-техническое направление, как радиофотоника. Одним из основных и важнейших элементов в ней является мощный импульсный фотопреобразователь (ФП), который используется, например, в радиофотонных активных фазированных антенных решётках (РОФАР) [1]. Эффективность работы РОФАР определяется совокупностью параметров: электрической мощностью фотопреобразователя, быстродействием и соответствием с параметрами внешней нагрузки, например, антенны, а также автономностью энергосистемы, создающей полную

гальваническую развязку между излучателем - антенной решёткой и основным генерирующим оборудованием. В этом случае ФП должен в фотовольтаическом режиме (без обратного напряжения) эффективно преобразовывать субнаносекундные оптические импульсы с минимальной задержкой. В различных источниках приводятся конструкции ФП, работающие в диодном режиме, при приложении обратного смещения. К ним относятся: *p-i-n* ФП [2], униполярные ФП (UTC) [3], модифицированные униполярные ФП (MUTC) [4], в которых ключевой особенностью является наличие нелегированного (*p-i-n*, PD и UTC ФП) или слаболегированного (MUTC) микронного или субмикронного *i*-слоя.

Перспективным и более эффективным преобразованием лазерного излучения является использование монокристаллических многослойных фотопреобразователей (МП ФП). МП ФП состоят из последовательно включённых через туннельные диоды фотоактивных *p-i-n* субэлементов с одинаковой шириной запрещённой зоны, но с разными толщинами фотоактивных слоёв, уровнями и профилем их легирования. Монокристаллическое соединение субэлементов в МП ФП позволяет повысить уровень оптического возбуждения, снизить электрические и оптические потери, обеспечить увеличение амплитуды электрического сигнала и лучшее согласование с нагрузкой.

Целью данной работы является исследование и сравнение импульсных характеристик однопереходных и трехпереходных *p-i-n* AlGaAs/GaAs ФП, работающих в фотовольтаическом режиме при возбуждении из многомодового оптоволокна лазерными импульсами длительностью 140 пс на длине волны 850 нм при разной плотности мощности. Структура ОП ФП состояла из *p*-слоя толщиной 0.7 мкм и $N_A \geq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, *i*-слоя толщиной 1 мкм и $N_D \sim 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и *n*-слоя толщиной 0.5 мкм и $N_D \leq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Субэлементы ТП ФП имели аналогичные уровни легирования, а их толщины определялись исходя из условия равенства генерируемых в них фототоков [5].

В ходе работы было выполнено измерение и численное моделирование параметров фотооткликов ОП и ТП ФП при возбуждении их субнаносекундными импульсами с постоянной частотой при разных уровнях плотности мощности лазерного излучения. Показано что, в исследованной *p-i-n* структуре ОП ФП при плотности мощности $\sim 5.3 \text{ кВт/см}^2$ наблюдается насыщение амплитуды фотоотклика при сильном уширении его длительности. Расчёты показали, что это уширение объясняется коллапсом встроенного электрического поля, наступлением режима насыщения и уменьшения напряжённости электрического поля в *i*-слое практически до нуля. В результате получаем ограничение роста амплитуды на уровне $\sim 1 \text{ В}$ с существенным увеличением длительности выходного электрического импульса ОП ФП до $\sim 10 \text{ нс}$. Напротив, в трёхпереходном ФП коллапс поля при плотности лазерного излучения 5.3 кВт/см^2 не возникает, амплитуда электрического импульса возрастает в 2.7 раз при длительности $\sim 740 \text{ пс}$. Проведенные измерения и расчеты достаточно хорошо согласуются друг с другом.

Список литературы

1. Д.Ф. Зайцев, В.М. Андреев, И.А. Биленко, и др., Радиотехника, т. 85, № 4, 2021 г., с. 153–164.

2. Rawat, M. Saif Islam, Proc. SPIE 12880, Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXXII, 128800Q (2024); <https://doi.org/10.1117/12.3003413>.
3. Maes, S. Lemey, G. Roelkens, et al. APL Photonics 8, 016104, (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0119244>.
4. Y. Peng, K. Sun, Y. Shen, et al. Optics express 28 (19), 28563-28572, (2020). <https://doi.org/10.1364/OE.399102>.
5. В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, И.А. Толкачев, К.К. Прудченко, С.В. Иванов, Письма в ЖТФ, 2024, том 50, вып. 22, р. 35-38.

Высокотемпературные фотодиоды на основе ДГС N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP

Климов А. А.¹, Кунков Р.Э.¹, Лухмырина Т.С.¹, Матвеев Б.А.¹, Ременный М.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: a.klimov@mail.ioffe.ru

Фотоприемники, работающие в среднем ИК диапазоне длин волн (3-4 мкм), используются в различных приборах газового анализа и низкотемпературной пирометрии, таких как: инфракрасные датчики метана и природного газа; алкотестеры и алкозамки, работающие на принципах инфракрасной спектроскопии; датчики пожарной безопасности; быстродействующие пирометры [1].

Конкуренция между средневолновыми фотоприемниками, получаемыми на основе гетероструктур из полупроводниковых твердых растворов HgCdTe, InAsSbP и пленок на основе PbS, стимулирует исследования, направленные на разработку фотоприемников с параметрами, превосходящими существующий уровень.

Ранее мы сообщали о разработке и исследовании поверхностно облучаемых фотодиодов (ФД) на основе ДГС N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP с вводом излучения через тонкий слой P-InAsSbP, выращенных на подложках n⁺-InAs (100) методом ЖФЭ, фоточувствительных в спектральной области $\lambda = 2\div 4$ мкм и работающих в интервале температур 200-500 К [2, 3]. Было показано, что предложенные решения по конструкции эпитаксиальной структуры N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP и чипа ФД на её основе обеспечили достижение значений токовой чувствительности и обнаружительной способности $S_i = (1.6\div 1.75)$ А/Вт, $D^* = 1.5 \times 10^{10}$ см²Гц^{1/2}/Вт (22 °С), на ~50% превосходящие существующий уровень вышеуказанных параметров. Одним из нежелательных свойств ФД, представленных в [2, 3], было уменьшение значения S_i более чем на два порядка при увеличении температуры от 300 до 500 К ($S_i = 0.01$ А/Вт, $T = 500$ К), что ограничивало возможность использования таких ФД в инфракрасных датчиках, работающих без принудительного охлаждения.

Данная работа посвящена исследованию причин, приводящих к уменьшению токовой чувствительности с ростом температуры в поверхностно облучаемых ФД на основе ДГС N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP, фоточувствительных в спектральной области $\lambda = 2\div 4$ мкм в интервале температур 200-500 К. Показано, что предложенные решения по конструкции

чипа фотоприемника обеспечили более слабую, чем ранее, температурную зависимость параметров ФД, что обеспечило возможность уверенной работы ФД при $T=500$ К при достижении значения $S_i=0.1$ А/Вт.

Список литературы

1. Сотникова Г.Ю., Александров С.А., Гаврилов Г.А., Средневолновая ИК пирометрия с использованием фотодиодов на основе InAs и InAsSb (обзор), Успехи прикладной физики, 2022, том 10, № 4, с.389.
2. Ременный М.А., Климов А.А., Кунков Р.Э., Лухмырина Т.С., Матвеев Б.А., Усикова А.А., Поверхностно облучаемые фотодиоды для спектральной области $\lambda = 2 - 4.5$ мкм на основе ДГС N-InAsSbP/InAs(Sb)/P-InAsSbP. XXVII международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 29-31 мая 2024 г. Сборник тезисов, стр. 76.
3. Климов А.А., Кунков Р.Э., Лухмырина Т.С., Матвеев Б.А., Ременный М.А. Поверхностно облучаемые фотодиоды для спектральной области $\lambda=2-4$ мкм на основе ДГС N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP. Молодежная конференция ФизикА.СПб, 21 – 25 октября 2024 г. Сборник тезисов, стр. 188.

Встроенное пьезоэлектрическое поле и Оже-рекомбинация через глубокие центры: влияние на эффективность лазеров и светодиодов на InGaN/GaN

Самосват Д. М.¹, Карпова А.А.¹, Зегря Г.Г.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: samosvat@yandex.ru

Полупроводниковые гетероструктуры на основе InGaN/GaN широко используются при создании светодиодов и лазеров в синей и зеленой области спектра. Тем не менее, в этих приборах существует ряд проблем, которые не решены. Для светодиодов на основе InGaN/GaN такими проблемами являются так называемый «спад эффективности» и так называемая проблема green gap. Эффект «спада эффективности» относится к падению внутренней квантовой эффективности (ВКЭ) с ростом тока инжекции. Проблема green gap относится к низкой ВКЭ для светодиодов зеленой области спектра. В случае лазеров на нитридах существует ряд нерешённых проблем: зависимость пороговых характеристик лазера от числа КЯ, от тока утечки, от топологии КЯ, от встроенного электрического поля, от ширины барьерного слоя, от величины последовательного сопротивления.

Поскольку КЯ на основе InGaN/GaN имеют структуру вюрцита, в них отсутствует центр инверсии, а значит может присутствовать встроенное пьезоэлектрическое поле. В настоящей работе впервые дается анализ всех возможных безызлучательных процессов рекомбинации и встроенного пьезоэлектрического поля на эффективность лазеров и светодиодов на основе InGaN/GaN.

В работе показано, что наряду с межзонной Оже-рекомбинацией (ОР) в КЯ может присутствовать и другой канал рекомбинации, а именно рекомбинация через глубокие

центры. Возможно 4 типа такого процесса ОР за счет прямого кулоновского взаимодействия, и еще 4 типа с учетом обменного взаимодействия. Кроме того, существует еще 8 процессов с участием барьерных носителей заряда. Это означает, что с ростом мольной доли индия возрастает число глубоких уровней [1] и скорость рекомбинации по этому каналу становится выше. При этом, как показано, именно этот процесс ОР оказывает ключевое влияние на величину максимума ВКЭ в зависимости от концентрации инжектированных носителей заряда. Как показано в настоящей работе, коэффициент такого процесса ОР растет с ростом пьезоэлектрического поля при равномерном распределении глубоких уровней, что связано с более сильной локализацией носителей заряда в области квантовой ямы.

В настоящей работе вычислены скорости беспорогового и квазипорогового процессов ОР зона - зона в присутствии встроенного пьезоэлектрического поля [2]. Показано, что с увеличением пьезоэлектрического поля коэффициенты беспорогового и квазипорогового процессов падают. Получено аналитическое выражение для матричного элемента беспорогового и квазипорогового процессов в присутствии пьезоэлектрического поля. Показано, что максимум кривой ВКЭ зависит от скорости процесса ОР через глубокие центры, а его дальнейший спад в основном определяется процессом межзонной Оже-рекомбинации.

Также в настоящей работе проанализировано влияние пьезоэлектрического поля и ОР через глубокие центры на пороговые характеристики лазеров на квантовых ямах. Дается анализ влияния параметров КЯ (числа КЯ, толщины барьеров) в лазерной структуре и канала Оже-рекомбинации через глубокие центры на пороговые и мощностные характеристики лазеров на КЯ InGa_N/Ga_N.

Список литературы

1. Jana Stránská Matějová, Alice Hospodková, Tereza Košutová, Tomáš Hubáček, Matěj Hývl and Václav Holý, Journal of Physics D: Appl. Phys., 55, 25, 255101 (2022).
2. Dmitiy Samosvat, Anastasia Karpova, Georgy Zegrya, Appl. Phys. A, 131, 99 (2025)

Моделирование оптического спектрального фильтра на основе мультиплексированных трёхслойных КПЖК дифракционных структур

Чубаров Д. М.¹, Алтухов Ю. А.¹, Растрыгин Д. С.¹, Долгирев В. О.¹, Шарангович С. Н.¹

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

e-mail: chudarovtt20@gmail.com

На современном этапе развития науки значительное число исследователей сосредоточено на создании инновационных технологий в области дифракционной оптики. Основной целью этих разработок является не только поиск новых методов управления световыми потоками, но и обеспечение экономической эффективности производственных процессов. В частности, многослойные неоднородные голографические дифракционные структуры

(МНГДС) представляют собой перспективное направление для применения в активно развивающейся отрасли дифракционной оптики, а именно в интегральной оптике, где они могут быть использованы в качестве оптических спектральных фильтров.

Для фильтрации оптического спектра излучения можно использовать дифракционные решетки, записанные методом голографии в пленках с толщинами 10–20 мкм, содержащих капсулированные полимером нематические жидкие кристаллы (КПЖК) [1], разделенные между собой буферными слоями. При считывании таких структур посредством оптического излучения, возникает интерференция световых лучей между дифракционными слоями. Этот процесс обуславливает формирование специфического типа угловой селективности, выражающегося в виде набора локальных максимумов и минимумов. Их количество и ширина определяются числом дифракционных и буферных слоёв, а также их толщинами. Принимая локальные максимумы как полосу пропускания для конкретных длин волн при отклонении от брэгговской дифракции, данные структуры можно использовать в WDM сетях связи, в качестве спектральных фильтров или в интегральной оптике, например, для микроволновых радаров с фотонной решёткой [2, 3].

Однако, в настоящее время существует проблема узкой спектральной полосы пропускания для дифракционных структур, поэтому актуальным является поиск способа увеличения пропускной способности МНГДС. Одним из таких способов является метод мультиплексирования. За счет последовательной записи нескольких решеток в МНГДС возможно кратное уширение их угловых и спектральных характеристик.

Применение капсулированных полимером нематических жидких кристаллов в составе дифракционных слоев МНГДС под воздействием внешнего электрического поля, позволит управлять дифракционными характеристиками, например, уровнем дифракционной эффективности (ДЭ) [4, 5].

Таким образом, целью данной работы является исследование дифракционных характеристик мультиплексированных трехслойных КПЖК дифракционных структур.

В данной работе по разработанной математической модели дифракции света на мультиплексированных МНГДС с КПЖК [4] проведено численное моделирование, в ходе которого было выявлено, что при последовательной записи двух решеток в МНГДС, число спектральных каналов по уровню -3 дБ увеличилось с 3 до 5 локальных максимумов по сравнению с обычной МНГДС. Вместе с тем, при воздействии напряженностью внешнего электрического поля (выше критической напряженности Фредерикса) на 3-й дифракционный слой, возможно изменить оптические свойства в этом слое, тем самым снизить дифракционные эффекты. Благодаря этому, селективный отклик преобразуется до уровня двухслойной структуры, вследствие чего ширина локальных максимумов изменяется, в данном случае на 0.2 нм, причем при уменьшении толщины буферного слоя спектральная полоса пропускания канала уширится еще больше. Данное преобразование можно расценивать как один из способов одновременного динамического управления шириной спектральной полосы пропускания для всех каналов.

Список литературы

1. Лойко В. А., Зырянов В. Я., Конколович А. В. и др. Пропускание света слоем капсулированного полимером жидкого кристалла при неоднородном сцеплении на поверхности капель // Оптика и спектроскопия. Т. 120, № 1. С. 158–168, 2016.
2. Pan S., Ye X., Yamei Z. et al. Microwave photonic array radars // IEEE Journal of microwaves. Vol. 1, No. 1, P. 176–190, 2021.
3. Reza M., Serafino G., Otto T. et al. Design and performance estimation of a photonic integrated beamforming receiver for scan-on-receive synthetic aperture radar // Journal of lightwave technology. Vol. 39, No. 24, P. 7588–7599, 2021.
4. Dolgirev V.O., Sharangovich S.N., Rastrygin D.S. Diffraction of light on inhomogeneous multilayer holographic diffraction structures in photopolymer liquid crystal compositions // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. Vol. 86, No. 1, P. 18–23, 2022.
5. Dolgirev V.O., Sharangovich S.N., Rastrygin D.S. Diffraction of light on multiplexed multilayer holographic diffraction structures with varying periods // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. Vol. 88, No. 3, P. S408–S412, 2024.

Портативный оптоэлектронный датчик вибрации на основе автодинного эффекта в лазерных диодах

Рыбалтовский А. В.¹, Мамаев И.С.¹, Ковалев А.В.¹

¹Национальный исследовательский университет ИТМО

e-mail: rybaltovskiiav@gmail.com

Диагностика вибраций важна для предотвращения поломок оборудования и повышения эффективности в различных отраслях. Разработанный портативный датчик позволяет проводить оценку вибраций крупногабаритного оборудования на безопасном расстоянии и без потери мобильности оператора. Автодинный эффект, используемый в этих датчиках, обеспечивает простоту, высокую точность и широкий диапазон измерений. Датчик позволяет измерять частоту, амплитуду, скорость и ускорения вибрация на расстоянии до 0,5 м. Простота оптической схемы даёт датчику преимущества перед аналогами в массогабаритных характеристиках.

Автодинный эффект – это метод интерферометрии, в котором луч лазера направляется на объект, и отраженный (или рассеянный) свет возвращается обратно в лазерный резонатор и интерферирует с лазерным полем в резонаторе. Интерференция приводит к модуляции как амплитуды (АМ), так и частоты (FM) лазерного излучения [1, 2]. Величины АМ и FM пропорциональны косинусу и синусу фазового сдвига в зависимости от расстояния до объекта. Изменения амплитуды (мощности) лазера детектируются с помощью фотодиода (PD), встроенного в лазерную систему. Фотодиод служит для измерения интерференционного сигнала.

Сложность обработки автодинного сигнала заключается в том, что он состоит из 4 составляющих: несущей (DC-компонента), амплитудной модуляции, частотной модуляции и шума. Сам сигнал при умеренной обратной оптической связи выглядит как чередующийся

раз в полупериод набор максимумов и минимумов пилообразной формы. Набор пиков разделяется медленной огибающей. Несущая составляющая сигнала определяется постоянным уровнем мощности лазера. АМ выражается в изменении величины максимумов и минимумов сигнала. Амплитуда модуляции связана с амплитудой вибрации объекта. FM проявляется как изменение частоты следования интерференционных полос. Если объект движется с постоянной скоростью, то полосы будут следовать равномерно. Если скорость меняется (например, при синусоидальной вибрации), то полосы будут "сжиматься" и "растягиваться". На автодинный сигнал оказывают влияние шумы лазера, фотодиода и спекл-шумы. Для определения всех параметров вибрации из автодинного сигнала необходимо определить с высокой точностью максимумы пилообразных пиков, которые имеют различные амплитуду, продолжительность и временной интервал следования.

Точность определения параметров синусоидальной вибрации составляет 90% в диапазоне 10-500 Гц.

Список литературы

1. Donati S. Vibration Measurements by Self-Mixing Interferometry: An Overview of Configurations and Benchmark Performances // Vib. 2023, Vol. 6, Pages 625-644. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. Т. 6, № 3. С. 625–644.
2. Bertling K. и др. Laser feedback interferometry: a tutorial on the self-mixing effect for coherent sensing // Adv. Opt. Photonics, Vol. 7, Issue 3, pp. 570-631. Optica Publishing Group, 2015. Т. 7, № 3. С. 570–631.

Исследование спектральных и пространственных характеристик излучения длинноволновых вертикально-излучающих лазеров для систем визуализации, обнаружения и определения дальности

*Копытов П. Е.¹, Ковач Я. Н.^{1,2}, Блохин С. А.², Бобров М. А.², Блохин А. А.²,
Воропаев К. О.², Бабичев А. В.¹, Гладышев А. Г.³, Андриюшкин В. В.^{1,3}, Новиков И. И.^{1,3},
Карачинский Л. Я.^{1,3}, Егоров А. Ю.³*

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³ООО «Коннектор Оптикс»

e-mail: kopytovpe@itmo.ru

Длинноволновые вертикально-излучающие лазеры (ДВИЛ) являются перспективными источниками излучения для систем обнаружения и визуализации. Помимо высокого быстродействия, их отличительными чертами являются высокое качество выходного пучка, проявляющееся в его симметричности и малой расходимости, а также низкие пороговые значения тока и энергопотребления. Кроме того, узкая ширина спектральной линии излучения и температурная зависимость длины волны излучения на уровне 0.07 нм/К, в совокупности с относительно небольшой себестоимостью, компактными размерами и

высокой надежностью ДВИЛ делает их привлекательным выбором для различных приложений трехмерной визуализации и систем обнаружения и определения расстояния (лидары) [1]. Для реализации ДВИЛ с использованием концепции заращенного туннельного перехода (ЗТП) используются три основных подхода: гибридная интеграция оптического резонатора InAlGaAs/InP с металл-диэлектрическими зеркалами на основе CaF_2/ZnS или AlF_3/ZnS (ГИ-ДВИЛ), интеграция оптического резонатора InAlGaAs/InP с высококонтрастными решетками (ВКР-ДВИЛ) и технология спекания оптического резонатора на основе системы материалов InAlGaAsP/InP с полупроводниковыми распределенными брэгговскими отражателями (РБО) на основе системы материалов AlGaAs/GaAs (СП-ДВИЛ) [2]. В данной работе представлен анализ модификации модового состава и картины дальнего поля излучения СП-ДВИЛ в зависимости от параметров мезы ЗТП.

В рамках концепции ЗТП задается не только область инжекции носителей заряда (т.н. токовое ограничение), но и модовый состав лазера (т.н. оптическое ограничение). Поверхностный рельеф в слоях туннельного перехода после процесса эпитаксиального заращивания не планаризуется полностью (зависит от метода эпитаксии). А после двойного спекания пластин верхний РБО вне области ЗТП оказывается частично смещен относительно области с мезой ЗТП, что ведет к формированию поперечного волноводного эффекта. В рамках модели [3] контраст эффективного показателя преломления Δn зависит от перепада высот поверхностного рельефа после заращивания (т.е. глубины травления и степени планаризации). Большой контраст $\Delta n \geq 0.02$ ограничивает предельный размер мезы ЗТП, при котором реализуется лазерная генерация через фундаментальную моду, и, как следствие, ограничивает оптическую мощность излучения в одномодовом режиме СП-ДВИЛ. Малый контраст $\Delta n \leq 0.01$ позволяет расширить диапазон размеров мезы ЗТП, но ведет к росту оптических потерь в непрокачиваемых частях активной области и возникновению эффекта насыщающегося поглотителя (в зависимости от температуры и актуального спектрального рассогласования спектра усиления и резонансной длины волны микрорезонатора), который усиливается при уменьшении размера мезы ЗТП.

Анализ пространственного распределения лазерного излучения в дальней зоне (т.н. картины дальнего поля) показал, что при малом контрасте эффективного показателя преломления форма выходного пучка СП-ДВИЛ с большим размером мезы ЗТП имеет форму максимально близкую к форме гауссового пучка с полной расходимостью излучения порядка 10° на полувысоте. Однако уменьшение размера мезы ЗТП с 8 мкм до 4 мкм ведет к возникновению асимметрии формы оптического пучка при сохранении одномодового режима генерации и падению эллиптичности с 0.95 до 0.86. Повышение контраста эффективного показателя преломления лишь усиливает асимметрию формы выходного пучка одномодовых СП-ВИЛ и снижает эллиптичность до 0.76, при этом многомодовые СП-ВИЛ имеют более сложную (зависящую от рабочего тока) форму выходного оптического пучка с расходимостью более 20° .

Таким образом, при проектировании индивидуальных и матричных излучателей на основе ДВИЛ выбор параметров мезы ЗТП потенциально позволяет обеспечить компромисс

между высокой выходной оптической мощностью, малой расходимостью оптического излучения и высоким быстродействием.

Список литературы

1. Padullaparthi B.D. et al., VCSEL industry : communication and sensing, Wiley-IEEE Press, 352 p., 2021.
2. Babichev et al., Photonics, 10 (3), 268 (2023).
3. G.R. Hadley, Opt. Lett., 20 (13), 1483 (1995).

Гетерогенная интеграция кремниевой фотонной интегральной схемы с активными элементами

Сауров М. А.^{1,2}, М.А. Ладугин³, Н.В. Гультиков³, В.В. Светухин¹

¹НПК «Технологический центр»

²НИУ МИЭТ

³АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

e-mail: michael15-52@mail.ru

В последнее время широкое применение находят фотонные интегральные схемы (ФИС) на основе нитрида кремния (Si_3N_4) [1], обладающего рядом преимуществ: низкие оптические потери, большой диапазон пропускания от видимого до среднего ИК-излучения, отличные нелинейные свойства и незначительное двухфотонное поглощение [2]. Свойства Si_3N_4 позволяют широко применять его в квантовой фотонике [3], узкополосных лазерах [4], генерации частотных гребенок [5], оптической связи [6] и многих других приложениях. Основной задачей на данный момент является осуществление преобразования электрических сигналов в оптические и обратно в рамках одной фотонной интегральной схемы. Одним из возможных путей решения данной задачи является изготовление микросборок из лазерных диодов (преобразование электрических сигналов в оптические), фотонной интегральной схемы и р-і-п фотодиодов (преобразование оптических сигналов в электрические), что позволяет интегрировать фотонную интегральную схему с классической КМОП технологией.

С целью решения этой задачи, были выполнены экспериментальные исследования по изготовлению и сборке активных и пассивных фотонных элементов. Полупроводниковые гетероструктуры для лазерных диодов на основе системы материалов AlGaAs/GaAs, излучающих в диапазоне 0,83-0,85 мкм, были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии. Составы эмиттерных и волноводных слоев AlGaAs, а также толщина волновода и активной области подбирались таким образом, чтобы обеспечить возможность получения диаграммы направленности излучения в плоскости перпендикулярной р-п-переходу по уровню 0.5 от максимума около 30-35 град. Для снижения безизлучательной рекомбинации на границе между полупроводниковым кристаллом и оптическим покрытием была применена технология ионной обработки излучающей грани в вакуумной камере напылительной установки непосредственно перед напылением оптического покрытия. Длина

волны электролюминесценции лазерных диодов составила 835 нм. Габариты кристалла лазера – 300х600 мкм.

P-i-n фотодиоды были изготовлены на сильнолегированных p⁺ подложках толщиной 325 мкм. Слаболегированный i-слой толщиной 170 мкм наносился на подложку методом газофазной эпитаксии. Верхний сильнолегированный p⁺ слой толщиной 300 нм был сформирован с помощью ионной имплантации. На верхний слой и на подложку снизу наносились омические контакты из Al. Габариты кристалла диода составляют 1.5х1.5 мм. Токи утечки диодов при обратном смещении $U_{обр} = 10$ В в среднем составили 10 пА.

Тестовые образцы фотонных интегральных схем с волноводами различных конструкций были изготовлены на основе подложек Si/SiO₂/Si₃N₄. Для выращивания пленок Si₃N₄ высокого качества и достижения низких оптических потерь в интегральных структурах применялось химическое осаждение из парогазовой фазы при пониженном давлении (LPCVD). Для формирования структур волноводов и достижения минимальных оптических потерь за счет уменьшения шероховатости использовался метод травления Si₃N₄ толщиной 0,4-0,45 мкм через твердую маску SiO₂.

По итогу данной работы были изготовлены микросборки на основе лазерных диодов, тестовых образцов фотонных интегральных схем и p-i-n фотодиодов. Продемонстрирована возможность совмещения полученных фотонных интегральных схем различных конструкций с активными элементами, а также преобразования электрического сигнала в оптический и обратно в рамках одного изделия, габариты которого позволяют разместить его в стандартных металлокерамических корпусах микросхем.

Список литературы

1. Shekhar S. et al. Roadmapping the next generation of silicon photonics //Nature Communications. – 2024. – Т. 15. – №. 1. – С. 751.
2. Roeloffzen C. Silicon Nitride in Silicon Photonics //PROCEEDINGS OF THE IEEE. – 2018. – Т. 106. – №. 12.
3. Arrazola J. M. et al. Quantum circuits with many photons on a programmable nanophotonic chip //Nature. – 2021. – Т. 591. – №. 7848. – С. 54-60.
4. Jin W. et al. Hertz-linewidth semiconductor lasers using CMOS-ready ultra-high-Q microresonators //Nature Photonics. – 2021. – Т. 15. – №. 5. – С. 346-353.
5. Okawachi Y. et al. Octave-spanning frequency comb generation in a silicon nitride chip //Optics letters. – 2011. – Т. 36. – №. 17. – С. 3398-3400.
6. Pfeifle J. et al. Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs //Nature photonics. – 2014. – Т. 8. – №. 5. – С. 375-380.

МОС-гидридная эпитаксия для современных задач фотоники

Ладугин М. А.¹, Мармалюк А. А.¹

¹АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

e-mail: laduginma@niipolyus.ru

Аннотация. В данной работе приведены результаты успешного применения метода МОС-гидридной эпитаксии для получения полупроводниковых гетероструктур АЗВ5 на подложках GaAs и InP с целью создания на их основе современных приборов фотоники и оптоэлектроники.

Ключевые слова: МОС-гидридная эпитаксия, полупроводниковая гетероструктура, квантовая яма, лазерный диод, фотоприемник, модулятор, интегральная фотоника

Полупроводниковые лазеры, фотоприемники, модуляторы, транзисторы и другие современные приборы давно и широко используются в ключевых областях науки и техники. Выходные характеристики таких приборов во многом определяются конструкцией гетероструктур и технологией их получения. Причем значительные успехи при создании полупроводниковых приборов как в дискретном, так и интегральном исполнении были достигнуты благодаря развитию и совершенствованию эпитаксиальных нанотехнологий. В последнее время среди возможных методов формирования эпитаксиальных гетероструктур на первый план выходит МОС-гидридная эпитаксия. Большая гибкость в выборе исходных материалов, широкий диапазон варьирования параметров роста, возможность получения резких гетерограниц и сверхтонких квантоворазмерных слоев, хорошая масштабируемость процесса роста для увеличения количества одновременно обрабатываемых пластин, снижение себестоимости единицы изделия делают этот метод незаменимым при организации промышленного производства.

В настоящей работе представлены результаты применения метода МОС-гидридной эпитаксии для формирования полупроводниковых гетероструктур на подложках GaAs и InP в системе материалов АЗВ5 с целью создания на их основе современных приборов фотоники и оптоэлектроники. Последовательно описан процесс проектирования, изготовления и исследования квантоворазмерных приборов, работающих на межзонных и внутризонных переходах в квантовых ямах и сверхрешетках. Показано, что тщательный контроль толщины и упругих напряжений слоев, резкости гетерограниц и заданного профиля легирования позволяет создавать высокоэффективные лазеры (лазерные линейки и матрицы, РОС-лазеры, лазер-тиристоры) и фотоприемники (р-і-п диоды и однозарядные UTC-диоды).

Обсуждаются перспективы развития технологии МОС-гидридной эпитаксии для современной фотоники и оптоэлектроники, включая задачи интегральной фотоники.

Поверхностные явления

Селективное определение компонентов газовых смесей C_3H_8 - H_2 и H_2 - CH_4 при исследовании электропроводности полупроводникового сенсора на основе SnO_2 в режиме термомодуляции

Казаков С. А.¹, Дугин А.А.¹, Гагиев Т.С.¹, Гревцев М.А.¹, Соколов А.В.², Арефьева О.А.³, Шишкин А.Ю.³, Хворов В.Н.³

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ООО «НИИИТ»

³ООО «НПО «ПРИБОР»

e-mail: kazakov59@mail.ioffe.ru

Принцип действия полупроводникового электронного газового датчика основан на изменении электрической проводимости при адсорбции газообразных веществ на его рабочей поверхности. При действии на полупроводник различных газообразных компонентов имеет место наложение сигналов друг на друга, поэтому при эксплуатации резистивного сенсора требуется селективно определять концентрации отдельных компонентов. Предварительная калибровка датчика на детектируемые компоненты по метрологически достоверным газовым смесям позволяет получать соответствующие концентрационные зависимости и коэффициенты перекрестной чувствительности датчика к компоненту газовой смеси. Эксперименты, проведенные в режиме термомодуляции, показывают, что температуры максимальной чувствительности сенсора для разных газообразных веществ отличаются. Этот экспериментальный факт связан с физической природой детектируемой молекулы газа и с физической природой используемого газочувствительного слоя сенсора [1]. Полупроводниковый материал может быть дополнительно модифицирован различными легирующими добавками для увеличения чувствительности датчика к тому или иному детектируемому компоненту многокомпонентной газовой смеси. В данной работе предложен алгоритм селективной обработки данных измерений температурной зависимости полупроводникового сенсора на основе SnO_2 при действии на него газовых смесей C_3H_8 - H_2 и H_2 - CH_4 . Он основан на предположении о том, что суммарный сигнал в смеси представляет собой линейную комбинацию вкладов отдельных компонентов. Разработанный алгоритм селективной обработки позволяет по полученным калибровкам для отдельных компонентов и коэффициентам перекрестной чувствительности датчика к тому или иному компоненту газовой смеси селективно определять эти компоненты путем решения линейной системы уравнений с учетом величины текущего сигнала проводимости сенсора, находящегося в исследуемой газовой двухкомпонентной смеси. Калибровочные данные бинарных калибровок аппроксимировались по модели нелинейной регрессии [3], что позволило минимизировать погрешности измерений еще и с учетом текущей влажности атмосферного воздуха.

Список литературы

1. Myasnikov I.A., Sukharev V.Ya., Kupriyanov L.Yu., Zavvalov S.A. Semiconductor sensors in physicochemical research. Moscow, Nauka Publ., 1991, 327 p. (In Russ.)
2. Чистяков В.В., Казаков С.А., Гревцев М.А., Соловьев С.М. Письма ЖТФ, 2021, т.47, вып.6, с.15-18, DOI: <http://dx.doi.org/10.21883/PJTF.2021.06.50751.18564>

Ионно-плазменная дезактивация внутриконтурного оборудования реакторных установок

Петровская А. С.¹, Цыганов А.Б.¹

¹ООО "ИнноПлазмаТех"

e-mail: anita3425@yandex.ru

Одной из актуальных проблем ядерной энергетики, возникающей при выводе из эксплуатации реакторов, а также при их плановых остановах, является дезактивация внутриконтурного оборудования. Радиоактивные загрязнения внутренних поверхностей реакторных установок состоят из отложений в виде активированных продуктов коррозии. Как правило, радиоактивными отложениями на металлоконструкциях из нержавеющей стали являются сложные соединения в виде шпинелей и смешанных ферритов кобальта и никеля [1]. Для дезактивации внутриконтурного оборудования реакторов широко применяются радиохимические методы, включающие использование кислотных растворов и приводящие к увеличению в десятки раз объемов вторичных жидких радиоактивных отходов и повреждению трубопроводов. Выбор типа раствора, его концентрации и режима дезактивации сложным и неоднозначным образом зависит от характера радиоактивного отложения и вида дезактивируемого металла. Поэтому актуальной задачей является разработка технологий дезактивации, обладающих более высокими технико-экономическими показателями по сравнению с традиционными методами.

Для решения данной проблемы нами разрабатывается «сухая» ионно-плазменная технология, свободная от использования химических растворов и позволяющая собирать радиоактивные отложения в твердой форме, что сокращает объемы вторичных радиоактивных отходов и экономические затраты в десятки раз по сравнению с жидкостными методами. Также, в этом процессе мы можем получать полезный продукт – твердый концентрат, содержащий γ -излучающий изотоп Co-60 для радиационной стерилизации различных продуктов и медицинских изделий. Физические принципы ионно-плазменной технологии заключается в зажигании укороченного разряда в инертном газе между загрязненной радионуклидами поверхностью, которая является катодом, и параллельной ей коллекторной пластиной (анод). Укороченный разряд взаимодействует с обрабатываемой поверхностью, при этом удаление радиоактивного осадка реализуется за счет ионного и термического распыления поверхностного слоя с последующим диффузионным осаждением в твердой форме на аноде. В данной работе выполнена серия экспериментов по подбору рабочих параметров ионно-плазменной технологии для распыления модельных сплавов различного химического состава (латунь, мель, нержавеющая сталь, алюминий, титан,

цирконий). Получены рабочие параметры технологии: давление аргона $P \sim 0.01-1$ атм., напряжение $V = (300-1000)$ В, плотность тока разряда $J = (0.001-1)$ А/см², расстояние между обрабатываемой поверхностью и анодом-коллектором $d = (0,3-3)$ мм. В эксперименте продемонстрирована работоспособность технологии - осаждение распыленных атомов модельных сплавов на поверхность металлической пластины-коллектора (анода) из никеля, подтвержденное при исследовании морфологии и элементного состава на электронном микроскопе Merlin Zeiss с X-ray микроанализом поверхности экспонированных в разряде анодов. В зависимости от параметров разряда и времени его воздействия на обрабатываемую поверхность, относительная концентрация осажденных атомов (латунь, мель, нержавеющая сталь, алюминий, цирконий) на никелевый электрод-коллектор (анод) варьируется в диапазоне от 2 до 40 атомных %.

Разрабатываемая технология также применима для дезактивации облученного реакторного графита. Экономический эффект от внедрения ионно-плазменной технологии для Российской Федерации при выводе из эксплуатации реакторов РБМК может составить более 400 млрд.руб., т.к. на старых технологиях запланирован их вывод из эксплуатации в течении не менее 25 лет при непроизводительном сохранении значительной численности обслуживающего персонала. Ранее достигнутые результаты исследования плазменной технологии для дезактивации реакторного графита были доложены по приглашению секретариата МАТАТЭ на техническом совещании «Technical Meeting on Processing Technologies for Irradiated Graphite Waste», Вена, Австрия, 5-9 Августа 2024 года. Технология запатентована совместно с ГК «Росатом» и АО «Концерн Росэнергоатом» [2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00321, <https://rscf.ru/project/24-29-00321/>.

Список литературы

1. С.Н. Орлов, А.А. Змитродан, В.В. Кривобоков, Теплоэнергетика, 5, 32 (2021). DOI: 10.1134/S0040363621040044
2. А.С. Петровская, А.Б. Цыганов, М.Р. Стахив, Патент РФ №2711292 «Способ дезактивации элемента конструкции ядерного реактора», EP 19888171.6, US 20210272715 CA3105179A1, CN112655056A и др. государств.

Исследование влияния размеров искусственных дефектов на механические свойства полимерных покрытий

Осинов С. В.¹, Никоноров А.А.¹, Рузаев Д.С.¹, Максимова О.Г.¹

¹Череповецкий государственный университет

e-mail: alan.turing1912@yandex.ru

Борьба с коррозией металлических изделий является приоритетной задачей во многих отраслях на протяжении всего времени. Одним из методов борьбы с коррозией металлопроката является нанесение на него различных полимерных покрытий. В таких отраслях, как строительство, наиболее популярны и эффективны текстурированные полимерные

покрытия. Их поверхность представляет собой морщинистые структуры с характерными размерами порядка 25–45 мкм. Образование таких морщин происходит следующим образом: при формировании покрытия морщинистые домены увеличиваются из-за диффузии и в результате собираются в некоторую структуру, геометрия которой в основном зависит от размеров искусственных дефектов – кристаллических гранул лакокрасочного покрытия. Центрами возникновения коррозии являются трещины полимерного покрытия, в которые проникает влага. Таким образом, покрытия, обладающие большей механической прочностью, обеспечивают большую антикоррозионную стойкость. Целью данной работы является исследование влияния размеров искусственных дефектов на механическую прочность полимерного покрытия металлопроката.

Размеры морщин зависят от значения модуля Юнга покрытия, что показано в работе [1]. Для определения геометрии поверхностных структур использовалась расширенная трехсекционная модель полимерной цепи [2], основанная на методе среднего поля. Рассмотрен механизм адгезии ассоциата с гранулой. С помощью метода, предложенного в работе [3], вычислена свободная энергия системы. Показано, что зависимость свободной энергии ассоциата от его ширины имеет минимум, определяющий геометрию поверхностных структур. Получены зависимости ширины ассоциата и количества ассоциатов, прикрепленных к грануле, от её размера. Установлено, что существует зависимость между размером гранулы и модулем Юнга покрытия.

Таким образом, ключевым результатом работы является полученная зависимость между размерами искусственных дефектов и модулем Юнга покрытия, что может быть использовано для улучшения антикоррозионных свойств металлических изделий.

Список литературы

1. J. Genzer, J. Groenewold, *Soft Matter*, 2 (4), 310 (2006). DOI: 10.1039/B516741H
2. O.G. Maksimova, V.V. Smirnov, S.V. Osipov, E.V. Menshikov, V.I. Egorov, A.V. Maksimov. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1697, 1, 012252 (2020). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012252>
3. С.В. Осипов, А.В. Максимов, Е.В. Меньшиков, О.Г. Максимова, *Физика твердого тела*. т. 12, стр. 2205–2207 (2023). DOI: 10.61011/FTT.2023.12.56761.5071k

Адсорбция калия на поверхности $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}(0001)$

Лапушкин М. Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: lapushkin@ms.ioffe.ru

Настоящее время широко применяются различные полупроводниковые устройства, созданные на основе нитридов III группы. Среди них можно выделить материалы на основе соединений AlGaIn различной стехиометрии. Созданные полупроводниковые устройства из материалов на основе соединений AlGaIn позволяют разрабатывать излучающие в ультрафиолете светодиоды, солнечно-слепые фотодиоды, биосенсоры и т.д.. Хорошие

термические характеристики соединений AlGa_{0.5}N позволяют использовать их при создании мощных транзисторов и изделий для СВЧ электроники [1-3]. Изменение стехиометрии AlGa_{0.5}N изменяет электронные свойства материала, что расширяет область их применения. Напыление атомов щелочных металлов на поверхность AlGa_{0.5}N модифицирует состояние поверхности и ее электронные свойства, что позволяет создавать различные сенсоры и возможно использовать в качестве катализаторов.

В работе проведен расчет 2D-слоя Al_{0.5}Ga_{0.5}N(0001) с адсорбированным калием. 2D-слой Al_{0.5}Ga_{0.5}N(0001) моделировался 10-слойной пленкой состоящий из бислоев AlGa_{0.5}N. Поверхностная ячейка состояла из 2 атомов галлия и алюминия расположенных друг против друга, над которыми был расположен атом калия. Один атом калия приходится на 4 поверхностных атома. Релаксации подвергались только два верхних бислоя AlGa_{0.5}N. Положение остальных бислоев AlGa_{0.5}N было зафиксировано, что было сделано для моделирования объема AlGa_{0.5}N. Расчет был выполнен из первых принципов в рамках теории функционала плотности, реализованной в пакете программ Quantum Espresso с использованием обменно-корреляционного функционала описанного в аппроксимации локальной плотности. Сходимость составила $1 \cdot 10^{-7}$ Ry.

Для чистой поверхности 2D-слоя Al_{0.5}Ga_{0.5}N(0001) наблюдается реконструкция поверхности, так что атомы галлия приподняты над поверхностными атомами алюминия. Для поверхностного бислоя AlGa_{0.5}N смещение атомов намного меньше. На уровне Ферми образуется зона поверхностных состояний, сформированная в основном N 2*p* и Ga 4*sp* электронами, что указывает на металлизацию поверхности. Адсорбция атомов калия приводит к незначительной реконструкции поверхности. Энергия адсорбции атомов калия составляет 1.65 эВ. Связь адсорбированного калия осуществляется за счет связи сформированной валентными электронами AlGa_{0.5}N и K. Адсорбция атомов калия приводит к формированию ниже уровня Ферми зоны поверхностных состояний. Зона поверхностных состояний калия сформирована из гибридизированных состояний K 4*s-4p* с N 2*p* и Ga 4*sp*.

Список литературы

1. Z. Wang, G. Wang, X. Liu, S. Wang, T. Wang, S. Zhang, J. Yu, G. Zhao, L. Zhang, Two-dimensional wide band-gap nitride semiconductor GaN and AlN materials: properties, fabrication and applications, J. Mater. Chem. C, vol.9, 17201-17232, 2021
2. Y. Huang, Y. Li, D. Xiang, A Review of Recent Research Advances on AlGa_{0.5}N-Based Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes IEEE Access, vol.11, 1, 2023.
3. A. Kumar, S. Paliwal, Dheeraj Kalra, A. Varghese, S. Tripathy, S.K. Ghoshal, Development of AlGa_{0.5}N/GaN MOSHEMT biosensors: State-of-the-art review and future directions, Mat.Sci. Sem. Proc., vol. 174, 108225, 2024

Получение пористой поверхности на германии путем воздействия наносекундными лазерными импульсами

Рогалин В. Е.¹, Железнов В.Ю.¹, Малинский Т.В.¹, Миколуцкий С.И.¹, Хомич Ю.В.¹, Ямщиков В.А.¹, Сергеев А.А.², Ивакин С.В.², Каплунов И.А.³, Иванова А.И.³, Андреева М.С.⁴, Кропотов Г.И.⁵

¹ИЭЭ РАН,

²БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,

³ТвГУ,

⁴МГУ,

⁵ООО «Тидекс».

e-mail: v-rogalin@mail.ru

При воздействии интенсивного лазерного импульса в прозрачных материалах могут возникать поры вследствие селективного взаимодействия излучения с поглощающими центрами [1, 2]. На поверхностях непрозрачных материалов также возможно создание пористой структуры в результате кипения расплава и его быстрого остывания.

Создание пористых структур на ряде изделий полупроводниковой электроники и оптики актуально с целью изменения значений коэффициентов отражения, индикатрис отражения и некоторых других характеристик. Пористый германий перспективен для анодов Li-ion батарей, а также солнечной энергетики.

Пористая поверхность, может быть интересна и при осаждении, адгезии примесей или пленок при производстве гетероструктур и других конструкционных материалов.

Существуют несколько методов получения пористой поверхности на Ge [3]. Это методы ионной имплантации, термического и химического травления, воздействия частотно-импульсного лазерного излучения.

В данной работе исследовалось создание пористых структур на поверхности Ge с целью интенсификации процессов диффузионной сварки [4]. Одним из важных применений монокристаллического германия в ИК оптике являются герметичные окна фотоприемных устройств, наиболее эффективно работающих при криогенных температурах. Обычно входные окна привариваются к колбе с приемником методом диффузионной сварки.

Модификация поверхности свариваемых деталей лазерными импульсами позволяет снизить температуру и длительность процесса [4], что крайне важно для рассматриваемой проблемы. Ведь для Ge, как полупроводника, повышение температуры приводит к снижению оптического пропускания из-за примесей, появляющихся при химическом взаимодействии с окружающей средой.

Для подготовки детали требуется создать пористую структуру только на ее кромке, не повреждая оптическую поверхность. Существующие химические и термические пути травления, хотя и позволяют получить пористую структуру, но на всей поверхности образца; к тому же существует вероятность загрязнения и повреждения оптической поверхности. Лазерное воздействие позволяет получить пористую структуру на заранее

определенной зоне поверхности образца, а использование масок дает возможность исключить обработку оптической области.

В настоящей работе, с целью получения пористой структуры на полированной поверхности Ge осуществлено воздействие частотно-импульсного ИК излучения наносекундного Nd:YAG лазера [5] в воде. На кромке изделия сформирована пористая структура. Определена оптимальная плотность энергии лазерного импульса для получения пористого Ge, которая составляет 20 - 32 Дж/см².

Постановка задачи, лазерное воздействие, профилометрия и обсуждение результатов, выполнены при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00727.

Список литературы

1. Левинзон Д.И., Ровинский Р.Е., Рогалин В.Е., Рыкун Е.П., Трайнин А.Л., Ценина И.С., Шейхет Э.Г., Изв. АН СССР (сер. физ.), 1979, **43**, 2001.
2. Рогалин В.Е., Самойлова Т.И., Тищенко Н.А., Шаскольская М.П. ФТТ, 1980, **22**, 3549.
3. Третьяков С.А., Иванова А.И., Каплунов И.А, Патент РФ 2 813 191 от 09.08.2023.
4. Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. ФХОМ. 2024. 2. С. 22.
5. Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Рогалин В.Е., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А., Сергеев А.А., Ивакин С.В., Каплунов И.А., Иванова А.И. Неорганические материалы. - 2024. **60**. 555.

Компьютерное моделирование эффектов облучения ионами аргона в Bi₂Se₃

Байдак С. Т.¹, Лукоянов А. В.^{1,2}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН

²УрФУ

e-mail: baidak@imp.uran.ru

Квантовые материалы представляют новый класс соединений, они обладают необычными физическими свойствами и имеют большое прикладное значение для совершенно различных областей [1]. К подобным материалам относятся, например, полуметаллы и полупроводники с топологическими особенностями зонной структуры. Соединение Bi₂Se₃ относится к классу топологических изоляторов, особенностью данного типа материалов является наличие проводящих поверхностных состояний при изолирующих объемных состояниях. Данное поведение топологических изоляторов является следствием сильного спин-орбитального взаимодействия, которое модифицирует зонную структуру [2], открывая щель для объемных состояний, оставляя при этом поверхностные состояния с линейной дисперсией в районе уровня Ферми. Поверхностные состояния топологических изоляторов устойчивы ко внешним возмущениям, наличие дефектов и небольшого количества примесей не способно полностью устранить их. Однако недавно было экспериментально

обнаружено, что облучение поверхности Bi_2Se_3 ионами аргона оказывает заметное влияние на электронные и транспортные свойства материала [3]. Одним из результатов облучения стало увеличение электросопротивления и уменьшение концентрации носителей заряда, что, в свою очередь, можно интерпретировать как сдвиг уровня Ферми вниз по энергии в сторону валентной зоны. В данной работе выполнено моделирование эффектов облучения ионами аргона топологического изолятора Bi_2Se_3 при помощи первопринципных методов. Теоретические расчеты электронной структуры проводятся в рамках теории функционала плотности в базисе плоских волн и функций Ванье при помощи программных пакетов Quantum ESPRESSO [4] и WannierTools [5]. В самосогласованных расчетах электронной плотности используются ультрамягкие псевдопотенциалы с обменно-корреляционным функционалом в виде GGA. В расчетах учитывается спин-орбитальное взаимодействие, которое приводит к открытию энергетической щели величиной 0.67 эВ в зонной структуре для объемного соединения. И, наконец, в рамках первопринципных методов показано, как именно изменяются поверхностные состояния Bi_2Se_3 в результате внешнего возмущения. Понимание подобных эффектов очень важно для потенциального применения топологических изоляторов в электронике. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-72-00168.

Список литературы

3. Keimer and J. E. Moore, Nat. Phys. 13, 1045 (2017).
1. V. V. Marchenkov et al., Micromach., 14, 1888 (2024).
2. V. V. Marchenkov et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B 561, 165633 (2025).
3. P. Gianozzi et al., J. Phys.: Condens. Matter. 29, 465901 (2017).
4. Q.S. Wu et al., Comput. Phys. Commun. 224, 405 (2017).

Изменение морфологии поверхности органических пленок под действием лазерного излучения

Туриев А. М.¹, Березов А.В.¹, Дзагоев А.Т.¹

¹СОГУ им. К.Л. Хетагурова

e-mail: ra6jt@mail.ru

Пленки производных перилена (PTCDA и PTCDI) широко используются в составе различных устройствах оптоэлектроники [1], которые часто представляют собой многослойные структуры, наносимые последовательно. При этом, качество каждого последующего наносимого слоя, в частности, зависит от состояния поверхности предыдущего. Исследование состояния поверхности перед нанесением следующего слоя, важный этап в реализации многослойных структур.

В качестве образцов использовались пленки толщиной 80 -120 нм, вакуумно-напыленные на грань (111) арсенида галлия из ячейки Кнудсена. Измерение топографии поверхности пленок проведено на атомно-силовом микроскопе INTEGRA-Aura NT MDT.

В работе представлены результаты исследования изменения морфологии поверхности пленок PTCDA и PTCDI под действием импульсного лазерного излучения с энергией кванта 2.34 эВ (λ_1) и 1.17 эВ (λ_2). Процесс облучения пленок сопровождается десорбцией частиц с поверхности. Импульсная методика облучения позволяет *in situ* исследовать продукты десорбции [2]. Приводятся масс-спектры общего десорбционного потока частиц, измеренные при облучении пленок различными длинами волн лазерного излучения с целью сопоставить их с АСМ картинками топографии поверхности. Набранный таким образом материал впоследствии позволил оценивать состояние поверхности в процессе облучения.

Облучение в области прозрачности (λ_2) приводит к нагреву подложки и отжиг пленки происходит со стороны подложки, и как показано на приводимых в докладе АСМ картинах в случае тонких пленок происходит увеличение неровностей поверхности пленки. Этот вариант используется, если необходимо увеличение удельной площади соприкосновения с осаждаемой пленкой.

При изменении длины волны лазерного излучения (λ_1) поглощение осуществляется самой пленкой и происходит изменение морфологии поверхности облученной части пленок. Сравнительный анализ топографических измерений участков поверхности пленок до и после воздействия излучением с длиной волны λ_1 показал, что начиная с некоторого порогового значения плотности мощности происходит выравнивание поверхности пленки. Этот процесс сопровождается десорбцией фрагментов молекул, которые для более подробного изучения выделяются из общего десорбционного потока. Состав и интенсивность фрагментов молекул отражает состояние поверхности, которое затем исследуется методиками АСМ. Сопоставление масс-спектров фрагментов с АСМ картинками позволило оценивать состояние морфологии поверхности пленки по наблюдаемым масс-спектрам фрагментов молекул.

Работа выполнена в рамках проекта № 2019-220-07-8022 Минобрнауки РФ. Приложение 2.4.

Список литературы

1. Елисеев А.А., Лукашин А.В. Функциональные наноматериалы // Под ред. академика Ю.Д.Третьякова.- М, ФИЗМАТЛИТ, 2010, - 456 с.
2. A.M.Turiev, I.V.Tvauri, A.T.Shanaeva. Study of desorption products under laser irradiation of the surface of organic films, Nano Hibrids and Cjmplsposites. 2020. T. 28. P. 84-90.

Газочувствительные свойства композитов состава $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Co}_x\text{O}_y/\text{NiO}$: влияние морфологии и режимов термической обработки

Соколов Д. В.¹, Стенькин Ю.А.¹, Болотов В.В.¹, Ивлев К.Е.¹

¹ОНЦ СО РАН

e-mail: classicsub-zero@mail.ru

Газовые сенсоры на основе смешанных оксидов переходных металлов актуальны в плане управления селективностью к токсичным и горючим газам. Для смешанных оксидных структур перспективными являются оксиды металлов с высокой каталитической активностью при адсорбции летучих паров – оксиды железа, кобальта, никеля [1,2]. Среди данных материалов в оксиде кобальта при термической обработке выше 600°C происходят обратимые переходы между CoO и Co_3O_4 [3], имеющие различную электропроводность при адсорбции газов, а значит и газовую чувствительность. В данной работе представлены результаты исследования морфологии и газочувствительных свойств композитов состава $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Co}_x\text{O}_y/\text{NiO}$ к неорганическим и органическим газам после отжига при температурах 650-1000°C.

Исследуемые композиты были получены путем термического разложения смеси насыщенных растворов соответствующих нитратов в массовом соотношении 1:1:1 при 120°C на воздухе в течение 2 ч. Отжиг проводился последовательно на воздухе в течение 1 ч при следующих температурах: 650°C, 950°C и 1000°C.

Морфология композитов исследовалась на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6610 LV. Сенсорные характеристики изучались при комнатной температуре путем регистрации изменения сопротивления образца в среде следующих анализируемых газов с концентрацией 500 ppm: диоксид азота (NO_2), аммиак (NH_3), гидразин (N_2H_2), водород (H_2), сероводород (H_2S), сернистый газ (SO_2), а также пары этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), бензола (C_6H_6), фенола ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$), муравьиной кислоты (HCOOH), формальдегида (HCHO), ацетальдегида (CH_3CHO), ацетона (CH_3COCH_3), метилциана (CH_3CN) и ртути (Hg).

Величина отклика к газам определялась как $S = \pm(R/R_0)^{\pm 1}$, где плюс/минус использовался в случае роста/уменьшения сопротивления, R_0 и R – стабильное сопротивление образца до и после напуска газа, соответственно.

При воздействии типичного газа-окислителя (NO_2) для всех образцов наблюдается уменьшение сопротивления, в то время как адсорбция типичных газов-восстановителей (NH_3 , H_2S) ведет к увеличению сопротивления. Это указывает на p-тип проводимости данных композитов. Вследствие наличия высокоомных фаз Fe_2O_3 и NiO , суммарное сопротивление будет определяться токопротеканием в проводящем Co_xO_y и между энергетическими барьерами в гетеропереходах между оксидами.

Исследуемый композит при 650°C обладает значительной селективностью к H_2S ($S \approx 1,50$), к остальным газам отклик менее 1,05. Последующие термические обработки

$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Co}_x\text{O}_y/\text{NiO}$ ведут к сдвигу в соотношении оксидов $\text{CoO}:\text{Co}_3\text{O}_4$ и заметному изменению характера газовой чувствительности. При 950°C в композите отклик к H_2S значительно снижается до 1,06 и усиливается чувствительность к SO_2 с 1,01 до 1,13. В случае обработки композита при 1000°C общая чувствительность ко всем газам заметно снижается, максимальный газовый отклик не превышает 1,06. Стоит отметить, что наибольшим откликом к парам Hg обладает композит на стадии 950°C и составляет $\approx 1,09$. Таким образом, дальнейший отжиг (1000°C) не приводит к заметному улучшению сенсорных характеристик. Также с увеличением температуры отжига происходит увеличение размеров гранул композитов от десятых долей до единиц мкм, что также может служить причиной общего снижения газовой чувствительности.

Таким образом, последовательный отжиг $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Co}_x\text{O}_y/\text{NiO}$ -композитов изменяет общую картину газовой чувствительности благодаря значительному увеличению гранул от $\sim 0,1$ до ~ 1 мкм и соотношению оксидов $\text{CoO}:\text{Co}_3\text{O}_4$. Термическая обработка $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Co}_x\text{O}_y/\text{NiO}$ при 650°C может быть использована для получения H_2S -селективных материалов в сенсорах. Выбор оптимальной температуры в области 950°C и длительности отжига может позволить синтезировать композит с максимальной чувствительностью к SO_2 и парам ртути.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации 121021600004-7), используя оборудование Центра коллективного пользования Омского научного центра СО РАН.

Список литературы

1. Guo J. X., Wu S. Y., Zhong S. Y., Zhang G. J., Yua X. Y., Wu L. N., Exploring promising gas sensing and highly active catalysts for CO oxidation: transition-metal (Fe, Co and Ni) adsorbed Janus MoSSe monolayers, *Physical Chemistry Chemical Physics*, том. 23, 11004-11014, 2021.
2. Joshi S., Kamble V. B., Kumar M., Umarji A. M., Srivastava G., Nickel Substitution Induced Effects on Gas Sensing Properties of Cobalt Ferrite Nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds*, том. 654, 460-466, 2016.
3. Cardenas-Flechas L. J., Freire P. T. C., Paris E. C., Moreno L. C., Joya M. R., Temperature-induced structural phase transformation in samples of Co_3O_4 and $\text{Co}_{3-x}\text{Ni}_x\text{O}_4$ for CoO , *Materialia*, том. 18, № 101155, 2021.

Моделирование профиля светового пятна на экране полевого проектора одиночного эмиттера из полупроводника

Мутыгуллин Б. Э.^{1,2}, Мицкевич А.А.², Колосько А. Г.³, Филиппов С.В.³, Попов Е.О.³

¹СПбПУ Петра Великого

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³СПбГУТ им. Бонч-Бруевича

e-mail: agkolosko@mail.ru

Полевые катоды являются необходимым элементом вакуумной электроники, так как наряду с термокатадами представляют собой источники свободных электронов. Оптимизация многоострижных полевых катодов использует локальные характеристики отдельных эмиссионных центров для расчёта макроскопических характеристик и выработки рекомендаций по изменению структуры катода. Современные методы литографии позволяют создавать проводящие и полупроводниковые массивы острий с заданной геометрией, которые дают различные эмиссионные токи [1].

Анализ потока электронов, исходящий с поверхности катода, проводится как правило с применением полевого проектора – двухэлектродное устройство, одним из электродов которого является прозрачная проводящая пластина (стекло с ITO покрытием), обладающая люминофорными свойствами (со стороны катода на неё наносят слой люминофора) [2]. Локальные потоки электронов от отдельных эмиссионных центров отображаются на таком экране в виде светящихся пятен, совокупность которых формирует общую картину свечения. По яркости и расположению пятен можно оценить равномерность эмиссионной поверхности катода, а также эмиссионные свойства составляющих его эмиттеров, включая локальные вольт-амперные характеристики [3].

Трудность получения корректных локальных характеристик по картинам свечения полевого проектора связана с тремя «паразитными» эффектами [4]: разлёт электронов в стороны при движении от катода к аноду, возникновение светящегося ореола вокруг основного пятна свечения, перекрытие пятен свечения соседних эмиттеров. Все эти эффекты мешают корректно распределить общий эмиссионный ток по отдельным эмиттерам.

Для решения этой проблемы нами был предложен алгоритм деконволюции светящихся пятен, зарегистрированных на картине свечения [5]. Одним из элементов алгоритма является математическое моделирование конкретной формы полевого эмиттера.

В представленной этими тезисами работе было осуществлено моделирование кремниевое эмиттера, созданного методом субмикронной ультрафиолетовой литографии в виде восьмигранной пирамидки. На основе подобных структур в будущем планируется создание компактного рентгеновского аппарата с адресной матрицей [1].

Моделирование в программном пакете COMSOL позволило получить разбиение поверхности вершины эмиттера на треугольники равной площади (это позволяет рассчитать

полный эмиссионный ток) и величины напряжённости электрического поля в центрах этих треугольников, а также траектории движения отдельных электронов от катода к аноду.

По напряжённости поля были найдены соответствующие плотности тока (с применением теории Страттона эмиссии из полупроводников [6]). Траектории полёта электронов позволили получить распределение эмиссионного тока по аноду.

Построенный график зависимости плотности тока от расстояния до центра системы на аноде представляет собой модель светящегося пятна на люминофоре реального полевого проектора. Зависимость достаточно хорошо описывается полиномом второго порядка (парабола). Подобная зависимость была получена в результате моделирования эмиссии из углеродной нанотрубки в работе [7].

Моделирование отскока электронов от поверхности люминофора, вызывающее эффект возникновения ореола [4], привело к получению формулы, описывающей зависимость яркости ореола от яркости центра светящегося пятна. Эта зависимость будет применена нами в дальнейшем для проведения численной деконволюции пятен на картине свечения многоострийного катода.

Разрабатываемый алгоритм позволит корректировать локальные эмиссионные характеристики не только кремниевых катодов, но также и других видов многоострийных систем, включая нанокompозитные катоды из углеродных нанотрубок.

Список литературы

1. Разработка технологических принципов создания системы микрофокусных рентгеновских трубок на основе кремниевых автоэмиссионных нанокатодов. Н.А. Дюжнев, Г.Д. Демин, Н.А. Филиппов, И.Д. Евсиков, П.Ю. Глаголев, М.А. Махибо-рода, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко, С.В. Филиппов, А.Г. Колосько, Е.О. Попов, Беспалов В.А. ЖТФ. 89, 12 (2019), С. 1836 – 1842.
2. Field Emission Electronics. N.V. Egorov, E.P. Sheshin. Springer Series in Advanced Microelectronics. Vol. 60 (2017), 568 p. DOI: 10.1007/978-3-319-56561-3.
3. Comparison of macroscopic and microscopic emission characteristics of large area field emitters based on carbon nanotubes and graphene. E.O. Popov, A.G. Kolosko, S.V. Filippov, E.I. Terukov, R.M. Ryazanov, E.P. Kitsyuk. J. Vac. Sci. Technol. B. 38, 4 (2020), pp. 043203-1 – 10. DOI: 10.1116/6.0000072.
4. Formation of Rings around a Field-Emission Image and Possible Applications of This Effect. К.Н. Никольский, А.С. Батурин, А.И. Князев, Р.Г. Чесов, Е.П. Шешин. ЖТФ. 74, 2 (2004), С. 110 – 113. ISSN 0044-4642. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/8190>.
5. Анализ картин полевого эмиссионного проектора и вопросы корректного определения локальных токовых характеристик многоострийного катода. Колосько А.Г., Попов Е.О., Филиппов С.В., Мутыгуллин Б.Э. ПЖТФ. 50, 24 (2024), С. 26 – 31.
6. Dynamics of the aging process of field emission from an array of p-type pyramidal Si emitters. A.G. Kolosko, G.D. Demin, E.O. Popov, S.V. Filippov, I.D. Evsikov, B.V. Lobanov, N.A. Djuzhev. Sensors and Actuators A: Physical. 386 (2025), pp. 116356-1 – 10.

7. Ring patterns in high-current field emission from carbon nanotubes. M. Marchand, C. Journet, C. Adessi, S.T. Purcell. Phys. Rev. B. 80, 24 (2009), pp. 245425-1 – 6. DOI: 10.1103/PhysRevB.80.245425.

Термоциклирование поверхности меди в дообляционном режиме при нагреве УФ лазерными наносекундными импульсами

Малинский Т. В.¹, Роголин В.Е., Жаховский В.В., Иногамов Н.А., Колобов Ю.Р., Манохин С.С., Неласов И.В., Перов Е.А., Петров Ю.В., Хомич Ю.В.р А.А.¹, Соавтор Б.Б.²

¹ИЭЭ РАН

e-mail: t.malinsky@yahoo.com

Исследованы механизмы формирования особенностей рельефа полированной поверхности образцов меди толщиной 10 мм при воздействии частотно- импульсного лазерного излучения (длина волны 355 нм, длительность 10 нс, частота повторения 10 Гц) в дообляционном режиме. Ранее, в экспериментах [1-5] было установлено, что при воздействии лазерного излучения (плотность энергии порядка 0,1–1,0 Дж/см²) на поверхности образцов в области лазерного пятна возникает необратимое поднятие поверхности (выступы), происходящее без изменения фазового состава материала, в конденсированном состоянии. Данное явление было названо оптикопластическим эффектом.

Сочетанием методов оптической профилометрии, конфокальной сканирующей лазерной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии на тонких фольгах (ламелях), вырезанных из приповерхностного слоя сфокусированным ионным пучком в колонне растрового электронного микроскопа [6], выявлена природа создаваемой структуры. Показано, что в локальных областях вблизи границ зерен формируется характерная система выступов и впадин. Разница высот достигает до 500 нм. При этом в тонком приповерхностном слое (~ 2 μm), прогреваемом за время импульса до предплавления температуры, вблизи границ зерен обнаруживаются следы развития пластической деформации в виде микродвойников деформации, дислокаций и малоугловых дислокационных границ. За время между импульсами быстрое охлаждение приповерхностных слоев приводит к фиксации формоизменения за счет необратимой пластической деформации. При росте числа импульсов, как и плотности энергии, степень формоизменения (высота выступов) поэтапно увеличивается.

Проведенное молекулярно-динамическое моделирование показало, что основным фактором развития наблюдаемых экспериментально выступов на поверхности образцов является анизотропия теплового расширения различно ориентированных зерен (кристаллитов) металла при циклическом нагреве до предплавления температур и последующем охлаждении. Теоретический анализ показал, что термомеханические напряжения в нагретом

слое превышают предел текучести меди и релаксируют за счет упруго-пластической деформации приповерхностного слоя.

Полученные результаты позволяют углубить понимание физических особенностей процессов деградации структуры поверхности и приповерхностных слоев металлов и сплавов при термоциклировании. В частности, результаты могут быть использованы, при разработке методов повышения эксплуатационной стойкости металлооптики.

Постановка задачи, лазерное воздействие, профилометрия и обсуждение результатов, выполнены при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00727.

В части исследования тонкой структуры приповерхностного слоя меди работа выполнена по теме Государственного задания FFSG-2024-0018, № государственной регистрации 124020700089-3.

Список литературы

1. Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, В.Е. Рогалин, Ю.В. Хомич, В.А. Ямщиков, И.А. Каплунов, А.И. Иванова, ПЖТФ, 2020, 46(16), 51-54. DOI: 10.21883/PJTF.2020.16.49856.18157
2. Т.В. Малинский, В.Е. Рогалин, ЖТФ, 2022, **92(2)**, 268-273. DOI: 10.21883/JTF.2022.02.52016.225-21
3. Т.В. Малинский, В.Е. Рогалин, В.А. Ямщиков, ФММ, 2022, **123(2)**, 192–199, DOI: 10.31857/S0015323022020073
4. Т.В. Малинский, В.Е. Рогалин, В.Я. Шур, Д.К. Кузнецов, ФММ, 2023, **124(7)**, 653–659. DOI: 10.31857/S0015323022600721
5. Y. V. Khomich, T. Malinskiy, V. Rogalin, V. Yamshchikov, I. Kaplunov, Acta Astronautica 2022, **194**, 434–441. doi:10.1016/j.actaastro.2021.11.033.
6. V. Zhakhovsky, Y. Kolobov, S. Ashitkov, N. Inogamov, I. Nelasov, S. Manokhin, V. Khokhlov, D. Ilnitsky, Y. Petrov, A. Ovchinnikov, O. Chefonov, D. Sitnikov, Physics of Fluids, 2023, 35(9), 096104. DOI: 10.1063/5.0165622

Использование энергетических параметров при исследовании структурных особенностей грунтобетона на основе органоминерального реактивного связующего

Соколова Ю. В.¹, Фролова М. А.¹, Айзенштадт А. М.¹

¹САФУ имени М.В. Ломоносова

e-mail: yu.sokolova@narfu.ru

Предварительные исследования, представленные в работах [1], показали эффективность внедрения технологического решения, разработанного для усиления исторических дорог и заключающегося в устройстве грунтобетонного основания путем введения в глинистый грунт органоминерального реактивного связующего на основе использования многотоннажных отходов промышленного производства. Установлено, что композиция, содержащая 40 %-ный водный раствор глиоксали в количестве 0,1 %, кору, механоактивированную до удельной адсорбционной поверхности 1000–1200 м²/кг, – 1 % и карбидный ил – 15 %, позволяет получить

грунтобетон с требуемыми значениями эксплуатационных характеристик. Изучен механизм структурообразования в сложной дисперсной грунтобетонной системе с использованием комплекса научно-исследовательских методов, в частности, микроструктурного анализа с точки зрения морфометрического подхода, основанного на определении размера, формы, характера поверхности и количественного соотношения частиц. Выявлено, что улучшение эксплуатационных характеристик при модифицировании обусловлено образованием фазовых контактов между минеральными частицами глинистого грунта [2]. Однако следует отметить, что для глинистых грунтов как многофазных многокомпонентных алюмосиликатных полидисперсных систем, характеризующихся специфическими физико-химическими свойствами и поверхностными явлениями, целесообразнее исследовать микроструктурные особенности с применением энергетических параметров, которые связаны с природой взаимодействующих частиц, результатом этого контакта и позволяют выполнить расчет энергии структуры в целом [3-5].

Таким образом, целью исследования являлся анализ структурных особенностей укрепленного грунта с использованием энергетического подхода.

В качестве энергетических характеристик были выбраны удельная поверхностная энергия (для твердых конденсированных систем численно равная поверхностному натяжению), постоянная Гамакера, поверхностная энергия и полная энергия взаимодействия. Поверхностное натяжение определяли методом Оунса-Вендта-Рабеля-Кьельбле (ОВРК). Энергетические показатели микроструктуры рассчитывали на основе положений теории Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека (ДЛФО).

Установлено, что при введении в глинистый грунт органоминерального связующего поверхностная энергия уменьшается примерно в 70 раз, а полная энергия структуры увеличивается в среднем в 1,1 раза, что обусловлено уменьшением удельной площади поверхности и пористости композита и усилением дисперсионного взаимодействия между частицами грунта.

Таким образом, используемые энергетические показатели микроструктуры позволили оценить характер взаимодействия составляющих компонентов исследуемой органоминеральной композиции и подтвердили формирование монолитной устойчивой к внешним воздействиям грунтобетонной структуры.

Исследования выполнены на уникальной научной установке «Физикохимия поверхности нанодисперсных систем» при финансовой поддержке Российского научного Фонда, проект № 23-13-20013.

Список литературы

1. Соколова Ю. В., Нелюбова В. В., Айзенштадт А. М., Строкова В. В., Реология грунтобетонных смесей на основе полимер-органического связующего с минеральным модификатором, Строительные материалы, № 12, 26-32, 2022.
2. Соколова Ю. В., Фролова М. А., Айзенштадт А. М., Королев Е. В., Структурообразование в дисперсной системе «глинистый грунт – карбидный ил», Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал, том. 16, № 4, 375-382, 2024.
3. Осипов В. И., Соколов В. Н., Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств, М.: ГЕОС, 578, 2013.

4. Яковлева А. А., Мальцева Г. Д., Кристаллохимические аспекты оценки энергии взаимодействия частиц глинистых минералов, Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых, том. 41, № 1 (62), 99-114, 2018.
5. Осипов В. И., Соколов В. Н., Карпенко Ф. С., Физико-химическая механика дисперсных пористых материалов – новый подход к оценке механической устойчивости глинистых грунтов, Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, № 4, 50-63, 2024.

Приборы и материалы ТГц и СВЧ диапазона

Моделирование спектров СВ, распространяющихся на суб-терагерцовых частотах в плёнках ЖИГ.

Хрошин Д. А., Устинов А.Б.

СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: daniil.khroshin@gmail.com

В настоящее время ТГц технологии находят широкое применение в областях неразрушающего контроля, биомедицины, охраны, астрономии и телекоммуникации [1,2,3]. Заостряя внимание на последней, хочется отметить, что освоение этого диапазона частот является естественным следствием необходимости в передаче непрерывно увеличивающегося числа данных. Проблемной областью этих частот являлся «ТГц зазор», находящийся между 0.1 – 10 ТГц [4], так как в нём сильно не хватало таких приборов, как генераторы или приемники. К данному моменту времени существует ряд работ, предлагающих свои идеи для «заполнения зазора», например - закладывание в основу действия такого прибора анизотропию антиферромагнитной среды [5-7], использование джозефсоновских переходов [8,9] и т.д.

Целью настоящей работы является исследование влияния толщины ферромагнитной плёнки на вид дисперсионной характеристики спиновых волн (СВ) и отыскание таких её значений, которые обеспечат частоту колебания намагниченности в диапазоне от 0.1 до 0.5 ТГц.

На данный момент спектр СВ в магнитной плёнке хорошо изучен [10], благодаря чему известно, что изменение её параметров или структуры приводят к трансформации спектра, в частности, к частотному сдвигу дисперсионных кривых.

Для поиска спектра в ограниченных образцах, кроме решения задачи с классическими электродинамическими граничными условиями (ГУ) для системы уравнений Максвелла, требуется учёт дополнительных ГУ для уравнения движения намагниченности, сформулированных Радо и Уиртменом [11]. В рамках этой работы рассматривается два крайних случая этих условий: свободные и закреплённые поверхностные спины. Спектры дипольно-обменных СВ были рассчитаны с помощью метода тензорных функций Грина [12] в приближении теории возмущений [10]. Внешнее поле подмагничивания направлено нормально относительно поверхности плёнки. Для дальнейших расчётов были взяты

величины намагниченности насыщения $M = 1750$ Гс и константы неоднородного обменного взаимодействия $\alpha = 3.1 \cdot 10^{-12}$ см⁻² характерные для плёнки из железо-иттриевого граната (ЖИГ). Внутреннее постоянное поле - $H_{int} = 3500$ Э - в два раза больше намагниченности насыщения. Построение спектра проводилось для моды низшего типа.

В результате моделирования было продемонстрировано отличие между спектрами СВ, полученными при условии свободных и закреплённых поверхностных спинов, и отражено влияние толщины плёнки на вид дисперсионной характеристики. Решение показывает, что при свободных поверхностных спинах собственная частота колебаний моды низшего типа не зависит от толщины плёнки, в отличие от противоположного случая, в котором она обратно пропорциональна квадрату толщины. Таким образом, для плёнки с закреплёнными поверхностными спинами были определены толщины, необходимые для переноса собственной частоты колебания в область между 0.1 до 0.5 ТГц, которым соответствуют значения 12.9 нм и 5.5 нм.

Список литературы

1. Leitenstrofer, A., Moskalenko, A. S., Kampfrath, T., Junichiro, K., Castro-Camus, E., Peng, K., Qureshi, N., Turchinovich, D., Tanaka, K. et al. The 2023 terahertz science and technology roadmap// *Journal Phys. D: Appl. Phys.* 56 (2023).
2. John F Federici et al. THz imaging and sensing for security applications — explosives, weapons and drugs // *Semicond. Sci. Technol.* 20 (2005).
3. Ashish Y. Pawar, Deepak D. Sonawane, Kiran B. Erande, Deelip V. Derle. Terahertz technology and its applications// *JPR Solutions: Drug invention today* 5. – p.157 – 163 (2013).
4. Carlo Sirtori. Bridge for the terahertz gap. // *Nature, Applied Physics*, 417 – p.132 – 133 (2002).
5. R. Safin, E. E. Kozlova, D. V. Kalyabin and S. A. Nikitov. Detection of terahertz electromagnetic waves using conduction antiferromagnets. // *Technical Physics Letters*, Vol. 47, No. 11, p. 814–817 (2021).
6. A. Safin, V. Puliafito, M. Carpentieri, G. Finocchio, S. Nikitov, P. Stremoukhov, A. Kirilyuk, V. Tyberkevych and A. Slavin. Electrically tunable detector of THz-frequency signals based on an Antiferromagnet. // *Appl. Phys. Lett.* 117, (2020).
7. Safin, A., Nikitov, S., Kirilyuk, A., Tybekevych, V., Slavin, A. Theory of Antiferromagnet-Based Detector of Terahertz Frequency Signals// *Magnetochemistry* 8, 26, (2022).
8. L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter et al. Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors. // *Science* 318, 1291 – 1293 (2007).
9. Xiao Hu and Shi-Zeng Lin. Phase dynamics in a stack of inductively coupled intrinsic Josephson junctions and terahertz electromagnetic radiation. // *Supercond. Sci. Technol.* 23 (2010).
10. Kalinikos, B.A. and Slavin, A.N. Theory of dipole-exchange spin waves spectrum for ferromagnetic films with mixed exchange boundary conditions// *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 19 (1986).
11. Rado, G.T. Observation of exchange interaction effects in ferromagnetics by spin wave resonance / G.T. Rado, J.R. Weertman // *Phys. Rev.* – V. 94, № 5. – P. 1386. (1954).

12. Vendik, O.G., Chartorizhsky, D.N. Dispersion equation for nonuniform oscillations of the magnetization in a ferromagnetic plate// J. SOV Phys. Solid State 12, №5. – p. 1538–1540 (1970).

О влиянии межпиксельного расстояния пространственного модулятора терагерцового излучения на качество фантомных изображений

Благова Т. В.¹, Хасанов И.Ш.¹

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук

e-mail: blagova.tv@ntcup.ru

Терагерцовая (ТГц) визуализация перспективна для применения в медицинской диагностике [1], неразрушающем контроле [2] и системах безопасности [3], поскольку позволяет получать детальные изображения внутренней структуры и состава объектов без использования ионизирующего излучения. Это обеспечивается высокой чувствительностью ТГц излучения к молекулярным особенностям материалов и его способностью проникать через большинство пластиков и других диэлектриков, непрозрачных для видимого диапазона. Несмотря на очевидные преимущества, современная реализация многопиксельных ТГц камер сталкивается с существенными технологическими ограничениями [4]. Существующие устройства характеризуются недостаточной чувствительностью, низкой метрологической точностью и малым числом пикселей, что ограничивает их практическое применение вне лабораторных условий. Для обхода этих ограничений в последние годы получили развитие методы однопиксельной визуализации [5], среди которых особое место занимает метод фантомных изображений (ghost imaging), реализуемый с помощью высокочувствительных однопиксельных приёмников и пространственных модуляторов излучения. Однако для повышения качества получаемых изображений, требуется учитывать, что в ТГц диапазоне визуализация ограничена дифракционными эффектами, так как размеры пикселей модулятора сопоставимы с радиусом диска Эйри. Нами было продемонстрировано, что корреляционный анализ паттернов фантомной визуализации позволяет обоснованно выбирать стратегии сканирования и определять оптимальные ортогональные базисы для составления паттернов (такие как базисы Адамара, Хаара и т.д.) [6]. Применение корреляционного анализа способствует минимизации избыточных измерений и позволяет ранжировать паттерны по устойчивости к дифракционным искажениям, что позволяет эффективно реализовывать алгоритмы сжимающих измерений (compressive sensing), при сохранении высокого качества реконструируемого изображения [7]. В данном исследовании особое внимание уделено влиянию на качество фантомных изображений межпиксельного расстояния. Предлагаемый анализ позволяет оптимизировать геометрические параметры пикселей пространственных модуляторов. Полученные результаты открывают перспективы для разработки новых архитектур пикселей

пространственных модуляторов, способных обеспечить оптимальное сочетание высокой разрешающей способности, быстродействия и чувствительности.

Список литературы

1. Smolyanskaya O.A. et al. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids // Progress in Quantum Electronics. — 2018. — V. 62.- P. 1-77.
2. Zhong S. Progress in terahertz nondestructive testing: A review //Frontiers of Mechanical Engineering. — 2019. — Т. 14. — №. 3. — С. 273-281.
3. Николаев Н. В. и др. Применение терагерцовых (субтерагерцовых) досмотровых комплексов в интегрированных системах безопасности //Вопросы безопасности. — 2021. — №. 4. — С. 39-49.
4. Kundu B.K., Pragti. THz Image Processing and Its Applications // Generation, Detection and Processing of Terahertz Signals / ed. Acharyya A., Biswas A., Das P. Singapore: Springer Singapore. 2022. — Vol. 794. — P. 123–137.
5. Guerboukha H., Nallappan K., Skorobogatiy M. Toward real-time terahertz imaging // Adv. Opt. Photon., AOP. 2018. — Vol. 10. № 4. — P. 843–938.
6. Благова Т.В., Хасанов И.Ш. Применение корреляционного анализа паттернов пространственного модулятора терагерцового излучения для повышения качества фантомных изображений // Учёные записки физфака МГУ. — 2024. — № 5. — С. 2450401.
7. Khasanov I. S., Blagova T. V. Optimization of Compressive Ghost Imaging in the Terahertz Range Using Correlation-Based Ranking in Optical System Transmission //2024 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). – IEEE, 2024. – С. 1-5.

Теплоэлектрические процессы в мощных нитрид-галлиевых транзисторах с каскодной структурой

Гавриков А. А.¹, Смирнов В.И., Сергеев В.А.

¹ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

e-mail: a.gavrikov@ulireran.ru

Современные нитрид-галлиевые (GaN) HEMT-транзисторы (HEMT–High Electron Mobility Transistor) работают в частотном диапазоне, составляющем десятки гигагерц, и способны обеспечить выходную мощность сотни ватт. Большая рассеиваемая в транзисторах мощность вызывает нагрев кристалла транзистора, что сопровождается потоками тепла от кристалла к корпусу и далее через радиатор в окружающую среду. Эффективность отвода тепла характеризуется тепловым сопротивлением «переход-корпус» R_{TjC} . Для транзисторов, имеющих сложную структуру (например, кристалл-термокомпенсационная пластина-корпус-радиатор) важно знать компоненты теплового сопротивления всего пути, по которому распространяется тепловой поток.

В последнее десятилетие в силовой электронике нашли широкое применение HEMT-транзисторы с каскодной схемой управления, состоящие собственно из GaN HEMT-транзистора, работающего в режиме обеднения, и низковольтного кремниевого (Si) MOSFET,

исток которого соединен с затвором HEMT-транзистора, а исток последнего — со стоком MOSFET. Управление HEMT-транзистором осуществляется напряжением на затворе MOSFET, а ток протекает последовательно через каналы HEMT и MOSFET. Это усложняет задачу измерения компонент теплового сопротивления такой комплексной структуры, поскольку значения сопротивлений открытого канала $R_{DS(on)}$ и их температурные коэффициенты для HEMT и MOSFET могут существенно различаться.

Возможностью измерения компонент теплового сопротивления таких сложных полупроводниковых изделий обладает модуляционный метод [1], основанный на нагреве объекта импульсами греющего тока с изменяющейся по гармоническому закону длительностью. После каждого импульса производится измерение температурочувствительного параметра (ТЧП), линейно связанного с температурой кристалла, что позволяет определить переменную составляющую температуры перехода $T_j(t)$, сдвинутую по фазе относительно греющей мощности $P(t)$ на угол ϕ . Отношение амплитуд $T_j(t)$ и $P(t)$ определяют модуль теплового импеданса Z_T , а отношение мнимой и вещественной Фурье-трансформант температуры перехода – тангенс фазы ϕ теплового импеданса. Если измерить зависимость вещественной части теплового импеданса $Re Z_T(\nu)$ от частоты модуляции греющей мощности, то на основе анализа зависимости $Re Z_T(\nu)$ можно определить компоненты теплового сопротивления.

Объектом исследования являлся GaN-транзистор NTP8G206N-D производства ON Semiconductor ($P = 96$ Вт; $I_D = 17$ А; $R_{DS(on)} = 150$ мОм; $RT_{jc} = 1,55$ К/Вт) [2]. Измерения компонент теплового сопротивления производились с помощью аппаратно-программного комплекса, в котором реализован модуляционный метод [3]. Транзистор нагревался последовательностью импульсов тока, период следования которых составлял 500 мкс. Измерения проводились при греющих токах от 8 до 16 А. В измеренных частотных зависимостях $Re Z_T(\nu)$ наблюдались особенности в виде «пологих» участков, положение которых позволяло определить компоненты теплового сопротивления. Было установлено, что значение компоненты RT_{jc} для кристалла с HEMT-транзистором увеличивается с ростом греющего тока $I_{гр}$. При $I_{гр} = 8$ А значение $RT_{jc} = 1,34$ К/Вт, а при $I_{гр} = 16$ А значение $RT_{jc} = 1,92$ К/В. Этот результат указывает на нелинейный характер зависимости температуры в канале HEMT-транзистора от рассеиваемой в нем мощности, установленный в работе [4].

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (госзадание FFWZ-2025-0001).

Список литературы

1. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Shorin A.M // Microelectronics Reliability. – 2018. – V.80. – pp. 205–212.
2. NTP8G206N Power GaN Cascode Transistor 600 V, 150 mΩ // <https://datasheets.su/DS/OnSemi/NTP8G206N-D.pdf>
3. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – V. 33. – № 7 – pp. 6211–6216.

4. Sodan V., Kosemura D., Stoffels S. // IEEE Transactions on Electron Devices. –2016. – V. 63. – № 6 – pp. 2321–2327.

Диод с барьером Шоттки 1-кВ класса на основе оксида галлия

Яковлев Н. Н.¹, Алмаев А.В.¹

¹НИТГУ

e-mail: nik_mr_x@mail.ru

I. Введение

В настоящее время необходимость повышения эффективности работы систем связи, электротехнического оборудования, контроллеров индуктивных моторов и источников питания, требует разработки компонент силовой электроники, отличающиеся от приборов на основе Si, GaN и SiC более высокими характеристиками. В качестве базового материала таких компонент представляет интерес β -Ga₂O₃. Коммерческие кристаллы β -Ga₂O₃ являются более совершенными в сравнении с другими широкозонными полупроводниками (GaN и SiC). Достигнута плотность дислокаций для кристаллов β -Ga₂O₃ - 10^4 см⁻² [1-3].

Оценки показали, что Baliga и Johnson figures of merit, используемые для выбора полупроводника при создании силовых металл-оксид-полупроводник полевых транзисторов (MOSFET), β -Ga₂O₃ примерно в 3000 раз выше, чем у Si. Также по этим параметрам β -Ga₂O₃ значительно превосходит широкозонные GaN и SiC. Возможность легирования оксид галлия мелкими донорами до концентрации 10^{21} см⁻³ является значительным преимуществом перед ультра-широкозонными Al_{0,7}Ga_{0,3}N и алмазом [4-5].

Первые публикации, посвященные силовым приборам на основе β -Ga₂O₃ появились в 2010 году. За десятилетие были разработаны ДБШ и полевые транзисторы различных конструкций, с латеральным и вертикальным транспортом, со встроенным и индуцированным каналом [6-7]. К 2024 году для приборов на основе β -Ga₂O₃ было достигнуто значение пробивного напряжения 5000 В и отношение токов при открытом и закрытом канале $>10^{10}$. Примечательно, что приборы демонстрировали отсутствие дрейфа характеристик при нагреве до 300 °С [7-8].

Стоит отметить, что исследованиями Ga₂O₃ и разработка на его основе приборов силовой электроники позволит снизить потери при преобразовании электроэнергии вплоть до 70 %.

II. Проведенное исследование

В качестве подложки при изготовлении ДБШ были использованы коммерческие пластины непреднамеренно легированного (UID) β -Ga₂O₃ (Тамуга согр., Якония) толщиной 650 мкм концентрацией доноров $N_d \sim 10^{17}$ см⁻³. На поверхность UID β -Ga₂O₃ пластин при

помощи фотолитографии формировались вертикальные столбики, диаметром 0,4 мм. Слой NiO толщиной ~ 0,2 мкм формировался методом высокочастотного магнетронного напыления на установке Edwards Auto-500. В качестве мишени использовался Ni частотой 99,99%, напыление проходило в аргон-кислородной среде. После нанесения слоя NiO и удаления фоторезиста полученные структуры были подвергнуты отжигу при температуре $T_{\text{анн}} = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ в атмосфере воздуха в течение 30 минут. После этого на поверхность UID $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ при помощи вакуумного термического напыления были нанесены сплошные слои Ti толщиной 20 нм и Ni толщиной 100 нм. После напыления слоев Ti/Ni структура была подвергнута быстрому отжигу при $T_{\text{анн}} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в вакууме в течение 1 минуты. С обратной стороны структуры, на поверхность слоя NiO при помощи вакуумного термического напыления был нанесен Ni анод толщиной 80 нм и защитный слой Au толщиной 20 нм. Пластина была разделена на отдельные образцы на установке дисковой резки.

Полученные образцы диодов были протестированы на испытательном стенде. В ходе проведенных тестов были измерены ВАХ и ВФХ диодов. На первом этапе тестирование измерения проводились при низком напряжении до 2 В с шагом 0.02 В, для определения электрофизических характеристик полученных структур с высокой точностью. Диоды демонстрируют выпрямляющие свойства. Выпрямительное отношение при $\pm 2\text{ В}$ составляет $6.2 \cdot 10^{10}$ (отн. ед.). Был проведен анализ ВАХ для оценки коэффициента идеальности n , плотности силы тока насыщения диодов J_s и высоты потенциального барьера Φ_b . Экспериментальные и расчетные* параметры ДБШ согласно TE модели: Коэффициент идеальности* $n = 1.35$; Высота барьера Шоттки* Φ_b (эВ) = 1,72; Плотность тока насыщения* J_s ($\text{А}/\text{см}^2$) = $8,05 \cdot 10^{-12}$; Плотность тока утечки при -2 В ($\text{А}/\text{см}^2$) = $1.27 \cdot 10^{-11}$; Коэффициент выпрямления по току при $\pm 2\text{ В}$ (отн. ед.) = $6.2 \cdot 10^{10}$; Напряжение пробоя V_{br} (В) = 1019.

Образцы ДБШ на основе Ga_2O_3 были проанализированы при комнатной температуре и в темноте с помощью термоэмиссионной модели. Получены значения высоты барьера Шоттки, коэффициента идеальности и плотность тока насыщения составила 1,72 эВ, 1,35 и $8,05 \cdot 10^{-12}\text{ А}/\text{см}^2$ соответственно. Диоды показали высокий коэффициент выпрямления – $6,2 \cdot 10^{10}$ отн. ед. при приложенном напряжении $\pm 2\text{ В}$ и напряжение пробоя 1019 В со значение плотности тока утечки $\sim 10^{-11}\text{ А}/\text{см}^2$. И могут быть использованные в силовой электронике.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0021.

Список литературы

1. Sheoran, H. A comprehensive review on recent developments in ohmic and schottky contacts on Ga_2O_3 for device applications / Kumar, V., Singh, R. // ACS Appl. Electron. Mater. – 2022. – Vol. 4(6).
2. Fu B. A review of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystal defects, their effects on device performance and their formation mechanism / Jia Z., Mu W., Yin Y., Zhang J., Tao X. // Journal of Semiconductors – 2019. – Vol. 40.

3. Bennett S.E. Dislocations and their reduction in GaN / Materials Science and Technology – 2010. – Vol. 26(9).
4. Kaneko K. Growth characteristics of corundum-structured α -(Al_xGa_{1-x})₂O₃/Ga₂O₃ heterostructures on sapphire substrates / Suzuki K., Ito Y., Fujita S. // J. Cryst. Growth. – 2016. – V. 436. – P. 150–154.
5. Dong L. Effects of oxygen vacancies on the structural and optical properties of β -Ga₂O₃ / Jia, R., Xin, B., Peng, B., Zhang Y. // Scientific Reports. – 2017. – V. 7(40160).
6. Zeng K. 1.85 kV Breakdown Voltage in Lateral Field-Plated Ga₂O₃ MOSFETs / Vaydai A., Singiseti U. // IEEE Electron Device Lett. – 2018. – V. 39. – P. 1385–1388.
7. Green A. J. β -Ga₂O₃ MOSFETs for radio frequency operation / IEEE Electron Device Lett. – 2017. – V. 38(6). – P. 790–793.
8. Yang J. 2300V Reverse Breakdown Voltage Ga₂O₃ Schottky Rectifiers / Ren, F., Tadjer, M., Pearton, S.J., Kuramata A. // ECS Journal of Solid-State Sci. and Tech. – 2016. – V. 7(5). – P. 92–96.

Дипольная и квазинейтральная неустойчивые моды в биполярном эффекте ганна

Слободнюк А. С.¹, М.С. Иванов, П.Б. Родин

¹СПБАУ РАН

e-mail: slobodnyuk.alexandr@yandex.ru

В отличие от классического монополярного эффекта Ганна [1], позволившего создать генераторы СВЧ (диоды Ганна), биполярный эффект Ганна в последние десятилетия неожиданно проявил себя в импульсной силовой электронике. Ионизирующие биполярные домены Ганна, известные как коллапсирующие домены [2], оказались эффективным механизмом генерации неравновесных носителей в слабом среднем электрическом поле, ответственным за субнаносекундное переключение и lock-on эффект в целом ряде приборов на основе арсенида галлия [2-6]. В настоящее время анализ биполярных доменов Ганна опирается исключительно на численное моделирование. Аналитические подходы к описанию биполярного эффекта Ганна ограничены ранними работами Гельмонта и Шура [7] по линейному анализу устойчивости и квазинейтральным волнам. Предсказания этих работ оказались недостаточными для понимания физики биполярных доменов Ганна [2-6].

В биполярном случае дисперсионное уравнение, описывающее развитие возмущений однородного распределения электрического поля и плотности носителей заряда, имеет две ветви решений. Эти ветви предположительно отвечают дипольным и квазинейтральным возмущениям концентраций электронов и дырок, развитие которых приводит к формированию сильнополевых доменов (сходных с монополярными доменами Ганна) и квазинейтральных волн (возможных только в биполярном случае), соответственно [7]. В настоящей работе выполнена ревизия линейного анализа устойчивости [7] с учетом современных представлений об ОДП электронов в сильных электрических полях в GaAs [8]. В нашей работе не только количественно определены инкременты нарастания возмущений обоих типов в зависимости от поля и волнового вектора возмущения, но также впервые

вычислены собственные векторы этих возмущений. Знание собственного вектора возмущения (т.е. соотношения между амплитудами возмущений электронной и дырочной концентрации) определяет возмущение плотности заряда и, таким образом, позволяет определить, в какой мере это возмущение может рассматриваться как дипольное или квазинейтральное.

Показано, что в соответствии с результатами [7] одна из ветвей решения действительно с хорошей точностью отвечает квазинейтральным возмущениям.

Однако инкременты нарастания для этой моды на несколько порядков меньше, чем для дипольной моды. Как следствие, квазинейтральные возмущения неспособны внести вклад в развитие неустойчивости.

Анализ второй ветви решения, традиционно рассматриваемой как дипольная (или доменная), показывает, что отвечающие ей собственные возмущения имеют смешанный характер. В зависимости от величины электрического поля и значения волнового вектора возмущение может быть как дипольным, так и квазинейтральным. Таким образом, атрибуция этой ветви как дипольной в целом неверна. Например, в биполярном случае ОДП электронов может приводить к неустойчивости при общей положительной дифференциальной проводимости образца, которой отвечает интервал полей от 12 до 55 кВ/см. Соответствующие возмущения квазинейтральны, но отвечают второй («дипольной») ветви.

Наибольшие инкременты нарастания отвечают дипольным флуктуациям в области полей от 4 до 10 кВ/см. Этот вывод коррелирует с тем, что численное моделирование биполярного эффекта Ганна в приборах обнаруживает именно домены сильного поля, отдаленно сходные с монополярными доменами Ганна, а не квазинейтральные волны.

Список литературы

1. J. B. Gunn, Solid State Commun. **1**, 88 (1963).
2. S.N. Vainshtein *et al.*, J. Appl. Phys. **97**, 024502 (2005).
3. L. Hu *et al.*, J. Appl. Phys. **115**, 094503 (2014).
4. A.R. Chowdhury *et al.*, J. Appl. Phys. **123**, 085703 (2018).
5. [5] А.В.Рожков и др., Изв. РАН, Серия физич. **87**, 873 (2023).
6. M.S. Ivanov *et al.*, Solid St. Commun. **379**, 115420 (2024).
7. [7] Б.Л. Гельмонт, М.С. Шур, ФТП **5**, 1082 (1971).
8. S.N. Vainshtein *et al.*, APL **92**, 062114 (2008).

Многоэлектродные эмиттеры на основе одностенных углеродных нанотрубок

Зайцев В. А.¹, Афанасьев С. А.¹, Моисеев С. Г.^{1,2}, Рожлейс И.А.¹, Санников Д. Г.¹

¹УлГУ

²УФирЭ им. В. А. Котельникова РАН

e-mail: elaliemic@mail.ru

Исследования показывают, что теория Фаулера-Нордгейма (ФН) хорошо описывает экспериментальные зависимости для металлических эмиттеров в виде острия, при условии, что его радиус кривизны составляет более 100 нм [1]. При значениях радиуса эмиттера менее 10 нм (сравнимых с шириной потенциального барьера, а также с длиной волны де Бройля в объеме эмиттера) плотности тока по ФН существенно превышают расчетные плотности тока (учитывающие конкретный трехмерный вид потенциального барьера и эффект размерного квантования). Для малых эмиттеров следует учитывать особенности в плотности состояний, характер резистивного нагрева эмиттера, влияние размерного квантования, термоэлектрические эффекты и т.д. Применение углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве полевых эмиттеров (устройств, испускающих электроны под действием поля) открывает новые горизонты в электронике и нанотехнологиях. УНТ-эмиттеры могут стать основой для энергоэффективных дисплеев, компактных рентгеновских аппаратов и гибкой электроники. По сравнению с многостенными нанотрубками одностенные УНТ (ОУНТ) имеют высокую локализацию электрического поля на острие из-за малого диаметра, и, как следствие, меньшее рабочее напряжение и высокую плотность тока на единицу площади. Среди основных трудностей в разработке полевых эмиттеров на основе ОУНТ – проблемы создания достаточно больших токов полевой эмиссии, долговечности и сложности контроля хиральности, длины и чистоты нанотрубки. В работе [2] численно исследован процесс автоэлектронной эмиссии с торца многостенной одиночной углеродной нанотрубки, размещенной в вакуумной камере. Для периода эмиссии электронов найдена эмпирическая закономерность вида $T = \text{const} \cdot V^{-3}$, позволяющая получить падающие зависимости ФН. Определенные с помощью найденной закономерности значения работы выхода электронов и коэффициента усиления электрического поля близки к полученным экспериментально в работе [3]. В настоящей работе мы исследуем линейную цепочку электронных эмиттеров на основе УНТ. Мы находим оптимальные расстояния между эмиттерами, при которых эмиссия наиболее сильна. Исследуются зависимости условий эмиссии от анодного напряжения для УНТ разных длин, диаметров и индексов хиральности. При этом полученные значения напряженности электрического поля будут использоваться для расчета плотности тока эмиссии в соответствии с уравнением ФН. Планируется провести анализ зависимости коэффициента усиления поля и плотности тока от расстояния между эмиттерами, а также сопоставить полученные результаты с известными экспериментальными данными.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00880).

Список литературы

1. Г. Н. Фурсей, Автоэлектронная эмиссия. СПб, Лань, 2012. 320 с.
2. И.А. Рожлейс, В.Г. Тертышникова, Д.Г. Санников. Опт. и спектроск., 132 (11), 1142 (2024)
3. G. Zhao, J. Zhang, Q. Zhang, H. Zhang, O. Zhou, L.C. Qin, and J. Tang. Appl. Phys. Lett., 89, 193113 (2006).

Квазиэллиптический волноводный полосно-пропускающий фильтр

Крутиев С. В.¹, Губский Д.С.¹, Букин С.П.¹

¹ЮФУ

e-mail: skrutiev@sfedu.ru

Современные системы радиосвязи с каждым днем предъявляют все более жесткие требования к прямоугольности и узкополосности применяемых фильтров. Эти требования обусловлены растущей плотностью каналов связи, увеличением пропускной способности и повышением качества сигналов, что требует высокой точности в их фильтрации. В связи с этим, для обеспечения необходимой эффективности работы фильтров, становится важным учитывать такие параметры, как форма амплитудно-частотной характеристики и способность фильтров настраиваться на определенные частотные диапазоны с минимальными потерями в полосе пропускания.

Одним из распространенных методов достижения квази-прямоугольной характеристики является введение в неё управляемых или перестраиваемых нулей передачи. Это возможно за счет использования геометрических особенностей конструкции фильтров, таких как специфические формы волноводов или резонаторов, которые позволяют точно настраивать параметры фильтра. Благодаря таким подходам удастся получить фильтры с улучшенными характеристиками, соответствующие требованиям по узкополосности и прямоугольности, что, в свою очередь, способствует более эффективному разделению каналов и минимизации интерференции.

Как известно, прямоугольные волноводы являются одними из наиболее популярных компонентов при разработке фильтров, что обусловлено их рядом значительных преимуществ. Среди них можно выделить низкие потери сигнала, способность работать при высоких мощностях и простоту подключения к другим элементам радиосистемы. Использование прямоугольных волноводов позволяет добиться высокой степени точности в передаче сигналов на заданных частотах и уменьшить потери энергии, что делает их незаменимыми в тех областях, где требуется высокая надежность и эффективность работы фильтров.

Кроме того, прямоугольные волноводы имеют уникальные свойства, такие как возможность работы на определенных частотах с минимальными искажениями, что важно для систем радиосвязи, где требования к стабильности и четкости передачи данных являются

критичными. Внедрение новых технологий и материалов в конструкцию таких волноводов позволяет улучшать характеристики фильтров, делая их более гибкими и адаптируемыми к меняющимся условиям эксплуатации.

В данной работе представлен и проведен электродинамический анализ широкополосного волноводного полосно-пропускающего фильтра с низкими потерями на прямоугольном волноводе WR-137 с квазиэллиптической амплитудно-частотной характеристикой четвертого порядка. В классическую топологию сложенного квадруплета введена электрическая перекрестная связь, реализованная с помощью легко изготавливаемой емкостной диафрагмы. В работе проведено сравнение амплитудно-частотной характеристики классического волноводного фильтра на четырех резонаторах с предложенной конструкцией селективного устройства. Проведен электродинамический анализ зависимости геометрических размеров созданного фильтра от частоты.

На станке с числовым программным управлением (ЧПУ), путем технологии фрезерования металла был изготовлен фильтр, электродинамические характеристики которого с высокой точностью совпали с результатами компьютерного моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета ("Приоритет 2030").

Список литературы

1. Sergey V. Krutiev; Daria V. Lonkina; Svetlana S. Efremova; Andrey S. Ipatiev *Electrodynamic Analysis and Synthesis of Bandpass Filters on a Rectangular Waveguide with Complex Thin Resonant Diaphragms in the Form of a Double-Shaped C- aperture* // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 28 June 2021 - 02 July 2021,. DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494046
2. Krutiev S. V., Lonkina D. V., Makhno P. V., Kleshchenkov A. B., Makhno V. V. *Design and Fabrication of Compact Waveguide Filter with Complementary Split-ring Resonators (CSRR)* // 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 25- 29 April 2022,. DOI: 10.1109/PIERS55526.2022.9792588
3. Zemlyakov, V.V., Zargano, G.F., Krutiev, S.V., Tyaglov, M.Y. *Electrodynamic Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide* // Radiophysics and Quantum Electronics, 2019, 61(12), pp. 915-923,. DOI: 10.1007/s11141-019-09947-0
4. Zemlyakov Viacheslav, Krutiev Sergey, Tyaglov Mikhail, Shevchenko Valery *A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture* // International Journal of Circuit Theory and Applications, 2019, 47(1), pp. 55-64,. DOI: 10.1002/cta.2566

Численное моделирование коэффициента передачи активного кольцевого резонатора с ультратонким магнетонным кристаллом

Ведерников Л. С.¹, Хрошин Д.А.², Фомина Е.А.³, Устинов А.Б.⁴

¹СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: lsv89314@mail.ru

Современные тенденции развития СВЧ-электроники все больше требуют создания компактных, высокоэффективных и функционально гибких устройств, способных работать в широком диапазоне частот. Среди таких устройств особое место занимают активные кольцевые резонаторы (АКР) с использованием ферромагнитных пленок, что обусловлено их уникальными характеристиками, делающими их перспективными для разработки новых классов высокотехнологичных устройств. На основе АКР разрабатываются фильтры [1-3], СВЧ-генераторы [4,5] и физические резервуары для нейроморфных вычислений [6]. Для дальнейшего прогресса в этом направлении представляется перспективным использование в АКР магнетонных кристаллов (МК) – периодических магнитных пленочных структур [7]. Целью настоящей работы является численное моделирование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) АКР с использованием одномерного сверхтонкого пленочного магнетонного кристалла.

Магнетонный кристалл с петлей обратной связи представляет собой активный кольцевой резонатор, схема которого аналогична представленной в работе [8]. Мы провели численное моделирование для трех различных толщин магнетонных кристаллов L_1 : 400 нм, 800 нм и 1600 нм. В ходе моделирования мы предполагали, что пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) имеет намагниченность насыщения $M_0 = 139$ А/м. Канавки на поверхности ферромагнитной пленки имеют глубину $h = 0,2 \cdot L_1$ нм и длину $d_2 = 50$ мкм. Общее количество канавок составляет $N = 10$, а период равен $\Lambda = 150$ мкм. Для возбуждения поверхностных спиновых волн (ПСВ) в МК пленка ЖИГ намагничивается однородным магнитным полем напряженностью $H = 119366,2$ А/м. Полуширина ферромагнитного резонанса составляет $\Delta H = 39,79$ А/м. Входная и выходная антенны разнесены на расстояние $d = N \Lambda = 3$ мм. Для учета потерь на возбуждение и прием спиновых волн предполагалось, что ширина входной и выходной антенн составляет 50 мкм, а длина антенн — 1 мм.

Спектр поверхностных спиновых волн рассчитывался по фазочастотной характеристике спиновых волн в МК, полученной с помощью метода Т-матриц [9]. Амплитудно-частотная характеристика активного кольцевого резонатора описывается выражением из работы [10].

Амплитудно-частотная характеристика магнетонного кристалла демонстрирует характерные запрещенные зоны на частотах, где выполняется условие $k = \pi n / \Lambda$, где $n = 1, 2, 3$ и т.д. С уменьшением толщины пленки ЖИГ растут потери на распространение спиновых волн, вызванные уменьшением их групповой скорости, а запрещенные зоны сближаются. Это

ведет к тому, что для более тонкой пленки в определенном диапазоне частот наблюдается большее количество запрещенных зон.

При введении в цепь обратной связи спин-волновой линии задержки ее амплитудно-частотная характеристика изменяется. Для толщин $L_1 = 1600$ нм и 800 нм резонансные пики видны по всей кривой, в том числе и внутри запрещенных зон, на частотах, для которых выполняется условие $\varphi = 2\pi n$. Однако для толщины $L_1 = 400$ нм такие резонансные пики практически не наблюдаются. Это связано с большими потерями спиновых волн в магнетонном кристалле, из-за которых резонансные свойства кольца практически отсутствуют.

Полученные результаты могут быть полезными при разработке магнетонных СВЧ генераторов [11,12] и физических резервуаров [6].

Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант № FSEE-2025-0008).

Список литературы

1. V. E. Demidov, B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov and P. Edenhofer, "Active narrow-band magnetostatic wave filter", Electronics Letters, vol. 35, issue 21, pp. 1856-1857, October 1999.
2. Порохнюк А. А. и др. Исследование оптимальной фильтрации СВЧ-сигнала многополосным спин-волновым кольцевым резонатором //Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – №. 18. – С. 17-27.
3. Fetisov Y. K., Kabos P., Patton C. E. Active magnetostatic wave delay line //IEEE transactions on magnetics. – 1998. – Т. 34. – №. 1. – С. 259-271.
4. Castera J. Tunable magnetostatic surface-wave-oscillators //IEEE Transactions on Magnetism. – 1978. – Т. 14. – №. 5. – С. 826-828.
5. Uehara G., Katakura H., Naito S. Magnetostatic wave oscillator //Japanese journal of applied physics. – 1988. – Т. 27. – №. 11A. – С. L2108.
6. Ustinov A. B., Haponchik R. V., Kostylev M. A current-controlled magnonic reservoir for physical reservoir computing //Applied Physics Letters. – 2024. – Т. 124. – №. 4.
7. M. A. Morozova, O. V. Matveev, D. V. Romanenko, V. V. Balaeva, S. A. Gusev, N. S. Gusev, S. A. Nikitov, "Gap solitons in nanoscale YIG magnonic crystals", Physical Review B, 110(10), 104408 (2024).
8. А. В. Багаутдинов, А. Б. Устинов, "Наведенный нелинейный сдвиг частоты активного кольцевого резонатора на магнетонном кристалле", Письма в ЖТФ, 49(13), 16-20 (2023).
9. A. V. Chumak, A. A. Serga, B. Hillebrands, M. P. Kostylev, "Scattering of backward spin waves in a one-dimensional magnonic crystal", Applied Physics Letters, vol. 93, issue 2, July 2008.
10. Никитин А. А. и др. Теоретическое исследование резонансных свойств активного кольца на основе слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик //Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – №. 7. – С. 98-101.
11. A.A. Nikitin, I.Yu. Tatsenko, M.P. Kostylev, A.B. Ustinov, "Microwave magnonic micro-oscillator based on a nm-thick YIG film," J. Appl. Phys. 135, 123906 (2024).
12. А.С. Бир, Д.В. Романенко, С.В. Гришин, С.А. Никитов, "Генерация многочастотного сигнала в магнетонном кольцевом автогенераторе на основе супертонкой пленки железо-иттриевого граната", Письма в ЖТФ, 51 (6), 19-23 (2025).

Примеси и дефекты в твердом теле

Применение композитных подложек 6H-SiC/3C-SiC(001) для синтеза кубического поли типа карбида кремния методом сублимации

Мясоедов А. В.¹, Мынбаева М.Г.¹, Приображенный С.Ю.^{1,2}, Амельчук Д.Г.¹,
Лебедев С.П.¹, Лебедев А.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: amyasoedov88@gmail.com

Карбид кремния (SiC) выделяется множеством привлекательных электрических и механических свойств, таких как высокое поле пробоя, высокая теплопроводность и стабильность, что делает материал, представляющим интерес для силовой полупроводниковой электроники. В настоящее время для выращивания объемного SiC используется модифицированный метод Лели, который позволяет получать подложки только двух наиболее стабильных гексагональных политипов – 4H и 6H. В то же время метастабильный кубический политип (3C) обладает рядом преимуществ по сравнению с гексагональными политипами, включая более высокую подвижность носителей, что делает его особенно привлекательным.

Процесс гетерополитипной эпитаксии кристаллов кубического политипа с использованием доступных гексагональных монокристаллических подложек карбида кремния сталкивается с двумя основными проблемами, ограничивающими этот подход. Первая – это «паразитные» включения других политипов, которые могут ухудшать электрические характеристики получаемых структур. Вторая проблема связана с наличием двух возможных последовательностей зарождения кристаллитов (ABC и ACB), что приводит к образованию дефектных границ между соответствующими областями, так называемых Double Position Boundaries (DPB) дефектов [1].

На сегодняшний день для получения структур 3C-SiC широко применяют химическое осаждение из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition, CVD) с использованием монокристаллических подложек кремния с ориентацией (001). Гетероэпитаксия обеспечивает получение плёнок кубического политипа карбида кремния свободных от включений других политипов и позволяет избежать образования DPB дефектов. При этом у данного подхода есть ограничения, связанные с температурой плавления кремния (1414 °C), а также со значительным рассогласованием параметров решётки, что приводит к высокой дефектности

пленок. Кроме того, различие в коэффициентах теплового расширения накладывает ограничения на предельную толщину пленок, что важно учитывать при разработке новых устройств на их основе.

В данной работе будут представлены результаты исследования толстых слоёв 3C-SiC с ориентацией (001), полученных методом сублимации в вакууме порошкообразного карбида кремния в вакууме с использованием экспериментальных композитных подложек, полученных в нашей лаборатории. Композитные подложки представляют собой комбинацию 6H-SiC пластины с перенесённым на неё тонким (8-10 мкм) затравочным CVD-слоем 3C-SiC(001). Эффективная площадь поверхности такой подложки на данный момент составляет 7×7 мм². Процесс переноса слоя карбида кремния с кремниевой подложки подробно описан в работе [2].

Процессы сублимационной эпитаксии проводились в течение 60-120 минут в вакуумной камере с индукционным нагревом при температуре 1700-1800 °C и при остаточном давлении на уровне $5 \cdot 10^{-6}$ – $6 \cdot 10^{-6}$ Торр. Кристаллическое совершенство выращенных слоёв исследовано методом просвечивающей электронной микроскопии. Основным результатом является демонстрация того, что использование композитных подложек 3C-SiC/6H-SiC с ориентацией затравочного CVD слоя (001) позволяет выращивать гомоэпитаксиальные слои 3C-SiC свободные от политипных включений. Также показано, что, по сравнению с традиционным методом CVD роста на Si подложках, предложенный подход гомоэпитаксиального выращивания на композитных подложках, демонстрирует возможность получения толстых (свыше 30 мкм) слоёв SiC кубического политипа при более высоких температурах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00232, <https://rscf.ru/project/24-22-00232/>

Список литературы

1. Z. Y. Xie, J. H. Edgar, B. K. Burkland, J. T. George, and J. Chaudhuri, *J. Cryst. Growth*, vol. 224, no. 3–4, pp. 235–243, 2001
2. М. Г. Мынбаева, Д. Г. Амелчук, А. Н. Смирнов, И. П. Никитина, С. П. Лебедев, В. Ю. Давыдов, А. А. Лебедев, *ФТП*, Т. 56, вып. 11, стр. 1094, 2022

Использование углерода для формирования дискретных зон на основе алюминия при их термомиграции в кремнии

Середин Б. М.¹, Попов В.П., Степченко А.Д., Малибашев А.В., Заиченко А.Н.

¹ЮРГПУ (НПИ)

e-mail: seredinboris@gmail.com

Метод термомиграции (ТМ) позволяет под действием градиента температуры получать в пластинах кремния сквозные замкнутые эпитаксиальные каналы (ячейки), представляющие интерес для силовой электроники. Экспериментальные исследования ТМ системы

пересекающихся линейных зон через пластину кремния выявили особый дефект, проявляющийся в образовании бугорков шаровидной формы на каналах на стартовой поверхности пластины [1,2]. Эти бугорки, состоящие из кремния, возникали при ТМ зон через пластину. Размер бугорков во много раз превышал толщину и ширину используемых линейных зон и достигал 1–3 мм в диаметре. Количество таких дефектов на пластине кремния диаметром 150 мм обычно не превышало 10 штук. Наличие даже одного бугорка приводило к браку всей пластины с множеством ячеек на посттермомиграционной обработке. Авторы работ [1,2] выбором размеров линейных зон, варьированием температурно-временных режимов, изменением концентрации кислорода в защитной атмосфере на основе азота оптимизировали процесс ТМ, но не достигли полного устранения бугорков и не предложили механизм их возникновения.

В настоящей работе изучено и объяснено образование бугорков при ТМ системы непересекающихся замкнутых линейных зон в виде колец или квадратов [3,4], предложен способ устранения дефекта. Методика экспериментов и оборудование описаны в работах [3,4]. Опыты показали, что для несоединенных зон бугорки возникают не на всех зонах (около 40%) и только один бугорок на одну замкнутую зону независимо от условий ТМ. При погружении зоны кристаллизация затруднена из-за отсутствия центров кристаллизации на открытой поверхности зоны. Об этом свидетельствует поперечное сечение зоны с плавными очертаниями, вытянутое в направлении движения. Однако после завершения погружения скорость кристаллизации начинает превышать скорость растворения, что приводит к сжатию зоны в направлении движения, появлению огранки на фронте растворения и возникновению избыточного давления в жидкой фазе. Это может вызвать нарушение кристалла в наиболее слабом месте и выдавливанию капли расплава, инициирующей дефект в виде бугорка.

Для устранения таких дефектов на стартовую поверхность пластины с подготовленными алюминиевыми зонами наносили углерод в виде сажи толщиной не менее 0.1 мкм путем сжигания углеводородов (стеарин, керосин, пропан-бутановая смесь) вблизи упомянутой поверхности. В результате достигнуто полное устранение бугорков на стартовой поверхности формируемых при ТМ каналов и соответствующих им дефектов на финишной поверхности пластины после ТМ. Попытки нанесения слоя мелкодисперсного углерода с размером частиц (0.5–1.0; 10–15 мкм) не дали положительных результатов: зоны при ТМ разрывались на множество частей. Сажа, полученная из пламени, обеспечивала хорошую адгезию и контакт с алюминием. Размер кристаллитов сажи ~ 2–9 нм, что значительно меньше размеров частиц углерода в других используемых материалах. Возможно сажа, нанесенная «горячим» методом, создает центры кристаллизации при ТМ, облегчает и ускоряет погружение жидких зон, что предотвращает появление обсуждаемых дефектов.

Список литературы

1. Lu B., Gautier G., Valente D., Morillon B., Alquier D. Etching optimization of post aluminum-silicon thermomigration process residues // *Microelectronic Engineering*, 2016. V. 149. P. 97. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2015.10.004>

2. A.Audebert, B. Morillon, B. Le Borgne, G. Gautier. Optimizing aluminium/silicon temperature gradient zone melting process for power device periphery // International Semiconductor Conference (CAS), 2024. <https://doi.org/10.1109/CAS62834.2024.10736804>
3. Seredin, B.M., Popov, V.P., Malibashev, A.V. et al. Effect of silicon anisotropy on the stability of thermomigration of linear zones // Silicon, 2024. V. 16, P. 3453–3460. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02921-0>.
4. Б. М. Середин, В. П. Попов, А. В. Малибашев, А. Д. Степченко. Трансформация кольцевой зоны на основе алюминия при ее термомиграции в кремнии в направлении $\langle 100 \rangle$ // Физика и техника полупроводников, 2024, Т. 58, № 9, С. 489–492. <https://doi.org/10.61011/FTP.2024.09.59308.6414A>.

Особенности фотопроводимости монокристаллов $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $0.50 \leq x \leq 0.95$

Бабаева Р. Ф.¹, Абдинов А.Ш.², Амирова С.И.², Рагимова Н.А.², Расулов Э.А.²

¹UNEC Азербайджанский Государственный Экономический Университет,

²БГУ Бакинский Государственный Университет

e-mail: babayeva.rena@unec.edu.az

Монокристаллы $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [1] как полупроводник с варьируемой шириной запрещенной зоны является перспективным материалом для оптоэлектроники и физики твердого тела.

Однако, несмотря на успехи, достигнутые в развитии технологии получения и обработки кристаллов этого материала, имеются и принципиальные трудности при изготовлении приборов на их основе, главным образом в связи с наличием большого количества неконтролируемых дефектов различного типа и происхождения. Поэтому изучение происхождения, типа и механизмов влияния на физические свойства дефектов в монокристаллах $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ имеет значительный практический интерес. Немаловажное значение имеет этот вопрос и с чисто научной точки зрения, т.к. полученные при этом результаты могут помочь выяснению механизма образования и взаимодействия дефектов с носителями тока при различных условиях.

Исходя из того, что одним из наиболее информативных методов изучения дефектов в полупроводниках является исследование фотоэлектрических явлений [2], нами при температурах 77–350 К, длинах волны и интенсивности света с 0.40–4.00 мкм и $10^1\text{--}5 \cdot 10^2$ Лк, соответственно нами экспериментально исследована фотопроводимость монокристаллов $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $0,50 \leq x \leq 0,95$. В качестве объектов исследований брались две группы образцов $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с одинаковыми составами. В первой группе наблюдается удовлетворительное согласование, а во второй группе при $T \leq 273$ К значительное отклонение электрофизических свойств от теории, разработанной для пространственно-однородного кристаллического полупроводника с точечными дефектами [3]. Причем с ростом содержания Cd в растворе это отклонение увеличивается [4].

Экспериментально снимались основные характеристики фотопроводимости в обеих группах образцов.

Установлено, что для них при $T \leq 273$ К характеристики фотопроводимости тоже отличаются. В частности, спектр фотопроводимости для первой группы образцов состоит из основного максимума и находящегося далеко от него длинноволнового слабого пика. На спектре фотопроводимости второй группы образцов между основным максимумом и длинноволновым пиком недалеко от основного максимума наблюдается еще один слабый пик, амплитуда которого для разных образцов отличается. В некоторых образцах этот максимум проявляется даже в виде плато. В первой группе образцов установление и исчезновения (кинетика) фотопроводимости имеют быстрый характер - определяются временем жизни неравновесных носителей заряда. Во второй группе образцов исчезновения фотопроводимости имеет медленно-релаксирующий характер - наблюдается остаточная фотопроводимость [5]. Величина времени жизни неравновесных носителей заряда в обеих группах образцов от температуры зависит немонотонно - с повышением температуры сначала (при относительно низких T) несколько увеличивается, а далее (при более высоких T) резко уменьшается. При низких температурах и слабых освещенностях люкс-амперные характеристики (ЛАХ) фотопроводимости этих групп образцов тоже отличаются. Начальный участок ЛАХ фотопроводимости второй группы образцов имеет степенной характер с показателем степени $\kappa = 2-4$ для разных образцов, а для первой группы образцов на этом участке ЛАХ $\kappa = 1$.

Показано наличие в обеих группах образцов неконтролируемых собственных точечных дефектов и примесных центров, а также случайных макроскопических дефектов [6] во второй группе образцов, которые могут возникать в результате флуктуации состава и собственных дефектов, включая и выделение второй фазы, образующихся в процессе роста кристалла, а также вследствие последующих операций изготовления отдельных образцов.

Предложена энергетическая модель, качественно удовлетворительно объясняющая полученные экспериментальные результаты.

Список литературы

1. Бовина Л.А., Шаронов Ю.П., Твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x \geq 0,20$ и приборы на их основе, Аналитический обзор за 1969-1978 гг., Б.М., №2364, 1105, 40 с., 1980.
2. Рывкин С.М., Фотоэлектрические явления в полупроводниках, М.: Физматлит, 494 с., 1963.
3. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г., Физика полупроводников, М.: Наука, 685 с., 1990.
4. Мулина (Егорова) Л.Н., Абдинов А.Ш., Салаев Э.Л., Новрузова Ф.М., Сеидли Г.С., Электрические свойства монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ при $0,54 \leq x \leq 0,92$, ДАН Аз.ССР, Том 40, В.1, 27-28, 1984.
5. Шейнкман М.К., Шик А.Я., Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках, ФТП, Т. 10, в. 2, 209-232, 1976.
6. Шик А.Я., Фотопроводимость случайно-неоднородных полупроводников, ЖЭТФ, Т. 68, Вып. 5, 1859-1867, 1975.

Влияние температуры облучения на скорость удаления носителей в GaN.

Лебедев А. А.¹, В.В.Козловский^{1,2}, Д.А. Малевский¹, К.С.Давыдовская¹,
М.Е.Левинштейн¹, А.Е. Николаев¹

¹ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН

²СПбПУ Петра Великого

e-mail: shura.lebe@mail.ioffe.ru

Полупроводники с большой величиной запрещенной зоны часто рассматриваются как материалы для создания приборов высокотемпературной электроники [1-3]. Поэтому становится важным исследовать влияние температуры на различные характеристики данных приборов, например, радиационную стойкость. Для оценки радиационной стойкости полупроводников часто используют параметр скорость удаления носителей (h_e).

$$h_e = [(Nd-Na)_0 - (Nd-Na)]/dD, \quad (1)$$

где $(Nd-Na)_0$ – исходная концентрация некомпенсированных доноров в полупроводнике до облучения, $(Nd-Na)$ – концентрация некомпенсированных доноров после облучения; dD – доза облучения.

Ранее нами было показано, что в случае карбида кремния увеличение температуры облучения примерно до 500 С приводит к снижению скорости удаления носителей почти на порядок по сравнению с h_e при комнатной температуре [4]. Обнаруженный эффект связывался с увеличением подвижности вакансий с ростом температуры, что сопровождается значительным увеличением вероятности рекомбинации образующихся первичных радиационных дефектов. В результате концентрация образующихся компенсирующих радиационных дефектов значительно снижается. Для GaN зависимость скорости удаления носителей от температуры ранее не изучалась.

Отметим, что при исследовании значительно более полно изученного широкозонного полупроводника (карбид кремния, SiC) наблюдался значительный разброс в определенных значениях величины h_e даже в случае облучения при комнатной температуре [5-6]. Возможно это было связано с различным примесным составом использованных для экспериментов образцов [7-8]. Поэтому в наших экспериментах использовались эпитаксиальные слои, полученные в одном технологическом эксперименте и на одной подложке.

Для исследований использовались слои нитрида галлия толщиной $d = 2$ мкм, выращенные на сапфировых подложках методом MOVPE. Исходная концентрация $(Nd-Na)_0$ при комнатной температуре, равнялась $1.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для проведения вольт-фарадных измерений на поверхности эпитаксиальных слоев были сформированы высокотемпературные диоды Шоттки диаметром ~600 мкм методом электронно-лучевого напыления Pt (50 nm)/Au (150 nm). Омические контакты формировались напылением металлов Ti/Al/Ti/Au (30nm/150nm/60nm/150nm) после обработки поверхности в плазме аргона.

Облучение проводилось электронами с энергией 0,9 МэВ и протонами с энергией 15 МэВ. Температура облучения 200 °С. Максимальная доза составляла $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при протоном и $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при электроном. После каждой дозы облучения проводилось измерение вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик. На основе полученных экспериментальных данных были рассчитаны значения h_e обоих типов для облучения. Для облучения протонами величина составила $h_e = 20.3 \text{ см}^{-1}$; для облучения электронами $h_e = 0.1 \text{ см}^{-1}$. Все полученные экспериментальные данные, а также литературные данные для облучения при комнатной температуре для SiC представлены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость скорости удаления носителей от температуры для SiC и GaN.

T	K	30	5			
,		0	0			
			0			
M	S		G	Si		Ga
a	i		a	C[		N,
t	C		N	9]		на
e	[		[			ст
p	9		1			оя
i	]		0			щ
a			]			ая
l						ра
						бо
						та
h	c	эле	~	0.	0	0.
e	m	кт	0	47	,	1
	-	ро	.		0	
	1	ны	0		2	
	,		7			
h	c	пр	~	15	1	20
e	m	от	6	0	3	,3
,	-	он	0			
	1	ы				
	,					

Как видно из таблицы, радиационная стойкость GaN несколько уступает радиационной стойкости SiC. При этом характер температурной зависимости скорости удаления носителей схожий для обоих полупроводников – нагрев до 200°С приводит к уменьшению величин h_e примерно в 3-4 раза для SiC и 4-7 для GaN.

Таким образом проведенные исследования показали, что в GaN, также, как и в SiC наблюдается значительное снижение скорости удаления носителей в случае облучения при повышенных температурах. Этот результат важен для GaN, как перспективного материала для создания приборов высокотемпературной электроники.

Список литературы

1. X. Liu, P. Zou, H. Wang, Yu. Lin, J. Wu, Z. Chen, X. Wang, Sh. Huang. IEEE Trans. Electron Dev., **70**, 3748 (2023).
2. M. Matys, K. Kitagawa, T. Narita, T. Uesugi, J. Suda, T. Kachi. Appl. Phys. Lett., **121**, 203507 (2022).
3. D. Khachariya, Sh. Stein, W. Mecouch, M. HaydenBreckenridge, Sh. Rathkanthiwar, S. Mita, B. Moody1, P. Reddy, J. Tweedie, R. Kirste, K. Sierakowski, G. Kamler, M. Bockowski, E. Kohn, S. Pavlidis, R. Collazo, Z. Sitar. Appl. Phys. Express, **15**, 101004 (2022).
4. А. А. Лебедев, В. В. Козловский, М. Е. Левинштейн, К. С. Давыдовская, Р. А. Кузьмин, ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2024, № 9, с. 58–63
5. E. Omotoso, W.E. Meyer, F. D. Aurret, A.T. Paradzah, M. Diale, S.M.M. Coelho, P.J. Janse, van Rensburg. Mater. Sci. Semicond. Process., **39**, 112 (2015).
6. Z. Luo, T. Chen, J.D. Cressler, D.C. Sheridan, J.R. Williams, R.A. Reed, P.W. Marshall. IEEE Trans. Nucl. Sci., **50**, 1821 (2003).
7. S.J. Pearton, F. Ren, E. Patrick, M.E. Law, A.Y. Polyakov. ECS J. Solid State Sci. Tech., **5** (2), Q35 (2016).
8. S.J. Pearton, R. Deist, F. Ren, Lu Liu, A.Y. Polyakov, J. Kim. J. Vac. Sci. Technol. A, **31** (5), 050801 (2013).
9. С.Ю. Давыдов, К.С. Давыдовская, В.В. Козловский, А.А. Лебедев ФТП, 2024, том 58, вып. 9
10. V. V. Kozlovski, A. E. Vasil'ev, A. A. Lebedev, E. E. Zhurkin, M. E. Levinshtein, A. M. Strelchuk, D. A. Malevsky, A. V. Sakharov, and A. E. Nikolaev, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2024, Vol. 18, No. 6, pp. 1577–1581.

Влияние локального ближнего порядка в неупорядоченных твердых растворах V-Ti на энергию образования вакансий

Мирзоев А. А.¹, Верховых А.В.²

¹ЮУрГУ (НИУ)

e-mail: mirzoevaa@susu.ru

Ванадиевые сплавы системы V-Ti являются перспективными кандидатами в качестве конструкционных материалов первой стенки термоядерного реактора, поскольку демонстрируют хорошее сочетание прочности, пластичности и радиационной стойкости, а также имеют быстрый спад наведенной активности (от года до нескольких лет) [1], что решает проблему утилизации данных материалов. Облучение сплавов V-Ti приводит к образованию большого количества точечных дефектов (вакансий и внедренных атомов), а контакт

с областью водородно-гелиевой плазмы приводит к высоким концентрациям атомов водорода и гелия внутри материала, в результате чего они подвергаются таким повреждениям, как гелиевое распухание и водородное охрупчивание [2]. Понимание физической картины, стоящей за указанными эффектами пока еще неудовлетворительно, поскольку экспериментальное исследование облученных материалов ядерной энергетики является весьма дорогостоящей и длительной процедурой. По этой причине в последние годы появилась тенденция к получению таких данных с использованием *ab initio* компьютерного моделирования. В работе [3] Боев и др. изучили взаимодействие атомов Ti с вакансиями в ОЦК V. Было показано, что атом титана и вакансия сильно притягиваются, кроме того образуются высокостабильные тройные комплексы Ti-Вакансия-Ti. Основываясь на этих результатах, показывающих, что вакансии и атомы титана взаимодействуют достаточно сильно, мы решили подробно изучить вопрос о влиянии ближнего порядка в сплавах V-Ti на энергию образования вакансий. В ходе данной работы в рамках теории функционала плотности в программном пакете VASP были рассчитаны энергии образования вакансий в зависимости от того, какой атом удаляется из решетки -титан (Ti-вакансия) или ванадий (V-вакансия). Было обнаружено, что как для вакансий V-типа, так и Ti-типа энергия образования вакансии монотонно понижается с ростом числа атомов титана в ближайшем окружении вакансии от 0 до 4. При этом для вакансий V-типа снижение происходит от значения 2.47 эВ до 1.48 эВ, тогда как для вакансий Ti-типа снижение происходит от 1.05 эВ, до 0.03 эВ. Столь сильное различие для двух типов вакансий связано с тем, что при растворении примеси титана в ОЦК-V ее атомный радиус превосходит атомный радиус атома ванадия. Это следует из роста равновесного значения объема ячейки чистого ОЦК-ванадия при помещении в нее примесного атома титана. Такое различие атомных радиусов приводит к возникновению локального напряжения в кристаллической матрице вблизи атомов Ti, с чем и связан обнаруженный эффект. Полученный результат, понижение энергии образования вакансии Ti-типа почти до нуля при большом количестве ближайших соседей Ti, может оказаться важным при радиационном воздействии на сплавы V-Ti. Действительно, при содержании в сплаве порядка 5 ат.% титана вероятность обнаружить среди 8 ближайших соседей атома титана 3 атома того же сорта не столь уж мала. Однако ясно, что предсказанный эффект будет непросто обнаружить в эксперименте, вероятнее всего он может себя проявить лишь при изучении радиационного воздействия на сплавы V-Ti различного состава.

Список литературы

1. Kurtz R.J. et al., Recent progress on development of vanadium alloys for fusion, J. Nucl. Mater. Vol.329, 47-55, 2004
2. Чернов И. И., Стальцов М.С. Поведение гелия и водорода в сплавах ванадия — перспективных конструкционных материалах первой стенки термоядерных реакторов: обзор. Часть 1. Цветные металлы, No. 11, pp. 77–86, 2016.
3. Boev A.O. et al. Interaction of Ti and Cr atoms with point defects in bcc vanadium: A DFT study. Journ.of Nucl. Materials, Vol. 492, P. 14-21, 2017

Дислокационная структура индентированных объемных кристаллов AlN

О.А. Гогина^{1,2}, Ю.В. Петров^{1,2}, Е.В. Убийвовк^{1,2}, О.Ф. Вывенко², Т.С. Аргунова¹, С.С. Нагальок¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

² СПбГУ

e-mail: o_gogina@mail.ru

В последние годы нитрид алюминия (AlN) с привлёк внимание во всем мире как широкозонный полупроводник с превосходными характеристиками, которые в совокупности с развитыми эффективными методами выращивания объемных кристаллов AlN создают широкие перспективы применения в областях высокоэффективных оптоэлектронных, а также мощных и высокочастотных электронных устройств, сверхвысоковольтных силовых электронных приборов, датчиков предупреждения и наведения, а также систем дезинфекции в глубоком УФ-диапазоне [1].

Процесс роста кристаллов и производства электронных компонент часто сопровождается введением дислокаций, которые могут влиять на функциональные электронные свойства материала, что обуславливает необходимость наличия правильных представлений об их основных характеристиках таких, как типы и системы скольжения дислокаций, структура их ядер, подвижность при воздействии различных механических напряжений, температуры и присутствия инжектированных носителей заряда.

Среди тринитридов с гексагональной решеткой вюрцита, родственных AlN, электронные и механические свойств дислокаций лучше всего изучены в GaN, чему посвящены десятки работ. Что касается AlN, то подобные сведения для этого материала очень скудны – опубликована лишь одна работа по дислокациям в прессованных порошках [2] и одна работа по наноиндентированию тонкой пленки с высокой плотностью ростовых дислокаций (10^9 - $10^{10}/\text{см}^2$) [3]. В настоящей работе впервые проведены исследования дислокационной структуры, возникающей при индентировании объемных и бездислокационных кристаллов AlN.

Кристаллы AlN были выращены сублимационным сэндвич-методом по механизму сублимации и реконденсации из паровой фазы порошка AlN высокой чистоты на затравке (0001) из монокристаллического 6H-SiC диаметром 60 мм. Толщина полученного слоя AlN достигла 1.8 мм [4]. Для исследований были приготовлены образцы с плоской поверхностью ростовой базисной и поперечной призматической (10-10) ориентациями, которые подвергались воздействию индентора Виккерса с нагрузками вплоть до 10 Н. С индентированной базисной поверхности последовательно удалялись слои с шагом 1 мкм, что позволило получить трехмерную картину распределения дислокаций.

Исследования дислокационной структуры проводились методом катодolumинесценции (КЛ) в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). На полученных панхроматических картах КЛ дислокации проявлялись как темные контрасты, соответствующие

повышенной безызлучательной рекомбинации избыточных носителей заряда, так как дополнительных люминесцентных спектральных полос в исследованном спектральном диапазоне обнаружено не было.

Было установлено существенное отличие дислокационной структура индентированного AlN по сравнению с известным для GaN и состоящее в отсутствии в AlN генерации и распространения дислокаций в базисной и призматических системах скольжения, характеризующихся минимальной для данного типа решетки вектором Бюргерса, которые должны быть основными согласно критерию Пайерлса. Напротив, основными системами скольжения являются две пирамидальные с плоскостями скольжения (10-12) и (10-11) и направлением дислокаций $\langle 1-210 \rangle$, $\langle 10-10 \rangle$, $\langle 1-123 \rangle$. Объяснением такой структурной особенности является в 4-5 раз большая энергия образования дефекта упаковки в AlN [5,6], чем в GaN, что обуславливает в первом нерасщепленный характер ядер дислокаций.

Список литературы

1. Yu R. et al. Ultrawide-bandgap semiconductor AlN crystals: growth and applications. *Journal of Materials Chemistry C*. 9(6), 1852-1873.
2. Azzaz M. et al. TEM observations of dislocations in aluminium nitride after high temperature deformation. *Materials Science and Engineering*, 71(1-3), 30-38.
3. Yonenaga I., Shima T., Sluiter M. H. F. Nano-indentation hardness and elastic moduli of bulk single-crystal AlN. *Japanese journal of applied physics*, 41(7R), 4620.
4. Мохов Е. Н., Вольфсон А. А., Казарова О. П. Выращивание объемных кристаллов AlN и GaN сублимационным сандвич-методом. *Физика твердого тела*, 61(12), 2298-2302.
5. Suzuki K. S. K., Ichihara M. I. M., Takeuchi S. T. S. High-resolution electron microscopy of extended defects in wurtzite crystals. *Japanese journal of applied physics*, 33(2R), 1114.
6. Stampfl C., Van de Walle C. G. Energetics and electronic structure of stacking faults in AlN, GaN, and InN. *Physical Review B*, 57(24), R15052.

Комплексы собственных точечных дефектов в кремнии, сформированные в результате ионной имплантации ксенона высоких энергий и постимплантационных отжига

*Маслова Н. А.¹, Данилов Д. В.^{1,2}, Вывенко О. Ф.¹, Скуратов В. А.³, Володин В. А.⁴,
Калядин А. Е.², Соболев Н. А.²*

¹СПбГУ

²ФТИ им. А. Ф. Иоффе

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

⁴ИФП СО РАН, Новосибирск

e-mail: st068118@student.spbu.ru

Облучение ионами пластин кремния широко используется для модификации их физических и электрических свойств. Использование в качестве облучающих частиц тяжелых элементов с высокими энергиями (МэВ) позволяет создавать в приповерхностной области

кремния особые виды микродефектов - треки, которые не только являются эффективными геттерами для присутствующих в кристалле примесей, но и обладают аномально высокой электропроводностью вдоль линии трека [1], что представляет несомненный интерес для полупроводниковой микроэлектроники. Механизм образования данных дефектов в приповерхностной области пластины неотъемлемо связан с генерацией собственных точечных дефектов под действием облучения. При ионной имплантации легких элементов с энергиями сотни кэВ, не приводящей к трекообразованию, распределение собственных точечных дефектов хорошо изучено: в приповерхностной области наблюдается избыток вакансий, в то время как максимум собственных междоузельных атомов приходится на проекционную глубину имплантации [2]. Между тем, подобные исследования для МэВ имплантации тяжелых ионов, несмотря на широкий практический интерес, практически отсутствуют.

Для исследования распределения собственных точечных дефектов в подобных образцах в пластины n-Cz-Si с уровнем легирования 10^{15}см^{-3} произведена имплантация ионов ксенона с энергией 167 МэВ и дозой $5 \cdot 10^{11}\text{см}^{-2}$. После этого для устранения радиационных дефектов пластины отжигались в вакууме по одному часу при температурах 400°C, 500°C и 600°C. Подобные температуры, недостаточные для формирования протяженных дефектов, способствовали образованию комплексов собственных дефектов, которые впоследствии идентифицировались при помощи люминесцентных и электрофизических методов. Измерения катодолюминесценции (КЛ) проводилось на предварительно полированном торце пластины, который дополнительно протравливался для удаления нарушенного в процессе полировки слоя. Даная конфигурация позволила профилировать сигнал КЛ по глубине имплантации (на торце пластины). Электрофизические исследования (вольт-амперные характеристики, вольт-фарадные характеристики, нестационарная спектроскопия глубоких уровней (DLTS)) производились с использованием золотых Шоттки-контактов, термически напыленных на предварительно отполированный косой шлиф пластины. В результате этого удалось последовательно установить характеристики ловушек, локализованных как внутри области имплантации, так и за ее пределами.

Спектры катодолюминесценции, полученные при ~70 К в диапазоне длин волн 1100нм – 1600нм, показали помимо нескольких широких максимумов, наличие узкой интенсивной линии 1250нм. Её энергетическое положение близко к линии люминесценции W' дефектов, связываемых с кластерами собственных междоузельных атомов (СМА) [3]. Подобные центры ранее наблюдали в имплантированных пластинах кремния с такими же температурами постимплантационного отжига, однако при несколько меньших температурах эксперимента – до 50 К. Профилирование интенсивности данной линии по глубине пластины показало аномальное поведение - заметная люминесценция наблюдалась на глубинах, в 5 раз превышающих проекционную длину имплантации, а максимум её интенсивности находится на удвоенной проекционной длине. Данные наблюдения не могут быть объяснены только в рамках ускоренной диффузии и требуют отдельного рассмотрения процессов, происходящих на каждом этапе термообработок. Результаты DLTS подтверждают неоднородное распределение точечных дефектов по глубине, продемонстрированное

люминесцентными исследованиями, и показывают наличие в приповерхностной области глубоких уровней, соответствующих дивакансионным комплексам [4], а также кислород-вакансионным комплексам [5], которые отсутствуют за пределами области имплантации.

Список литературы

1. Ф. Ф. Комаров, «Дефектообразование и трекообразование в твердых телах при облучении ионами сверхвысоких энергий», Успехи физических наук, т. 173, вып. 12, сс. 1287–1318, 2003
2. Danilov I., Boudinov H., de Souza J. P., Drozdov Y. N. Spatial separation of vacancy and interstitial defects formed in Si by oxygen-ion irradiation at elevated temperature // Journal of Applied Physics. – 2005. – Т. 97, № 7.
3. - Черкова С. Г., Скуратов В. А., Володин В. А. Люминесцентные свойства высокоомного кремния, облученного тяжелыми ионами высоких энергий //Физика и техника полупроводников. – 2019 – Т. 53 – №. 11 – С. 1467-1470.
4. Libertino S., La Magna A. //Materials science with ion beams. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009. – С. 147-212
5. Schmidt D. C. et al. //Journal of Applied Physics. – 2000. – Т. 88. – №. 5. – С. 2309-2317.

Электрон-ядерное взаимодействие вакансий бора в гексагональном нитриде бора

Дмитриева Е. В.¹, Мамин Г.В.¹, Мурзаханов Ф.Ф.¹

¹КФУ, Казань

²ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

e-mail: dev600@mail.ru

Вакансионные центры в полупроводниковых кристаллах представляют значительный интерес для развивающихся квантовых технологий благодаря своим спиновым и оптическим свойствам. Заметным преимуществом центров окраски гексагонального нитрида бора (hBN) по сравнению с аналогичными материалами, такими как алмаз и карбид кремния, является наличие ядер с магнитными моментами, окружающих вакансии бора. Подобная конфигурация способствует проведению многоимпульсных квантовых операций, задействующих несколько кубитов или спиновых подуровней. Взаимодействие между ядерными магнитными моментами и электронным спином вакансий бора ($S = 1$) обеспечивает согласованное управление и манипулирование кубитами. Особенно перспективным является внедрение hBN в сферу квантового зондирования, где представленная матрица может быть использована для разработки высокочувствительных сенсоров, способных обнаружить незначительные локальные изменения температур, магнитных/электрических полей, давления и т.д. [1]

С целью создания стабильных вакансионных центров кристалл hBN был облучен потоком электронов с энергией 2 МэВ при комнатной температуре, при этом размеры кристалла – $0.90 \times 0.54 \times 0.05$ мм³. Эксперименты методом электронного парамагнитного резонанса проводились на спектрометре Bruker Elexsys E680 в W-диапазоне (94 ГГц) при

оптическом возбуждении с использованием диодного лазера ($\lambda = 532$ нм, $P = 100$ мВт). Для детального изучения сверхтонких и квадрупольных взаимодействий при $T = 25$ К использовался метод импульсного двойного электрон-ядерного резонанса (ДЭЯР).

Спиновый гамильтониан охватывает пять различных типов взаимодействий: электронное Зеемановское, расщепление в нулевом магнитном поле, ядерное Зеемановское, сверхтонкое и ядерное квадрупольное взаимодействия. В случае параллельной ориентации ($c \parallel \mathbf{B}_0$) спиновый гамильтониан для изучаемой системы выражается в виде [2]

$$\mathbf{H} = g\mu_B B_0 S_z + D \left(S_z^2 - \frac{S(S+1)}{3} \right) - \gamma \frac{h}{2\pi} B_0 I_z + \\ + \sum_{i=1}^3 \left(A_{xx} S_x I_{x(i)} + A_{yy} S_y I_{y(i)} + A_{zz} S_z I_{z(i)} + \frac{C_q}{4I(2I-1)} \left(3I_{z(i)}^2 - I(I+1) + \eta \left(I_{x(i)}^2 - I_{y(i)}^2 \right) \right) \right)$$

В данной работе получены следующие экспериментальные результаты для ядер азота ^{14}N ($I = 1$, 99.6 %), находящихся в первой координационной сфере вакансии бора: спиновых дефект обладает расщеплением в нулевом магнитном поле $D = 3550$ МГц (126.8 мТл) и g -фактором = 2.004. Методом спектроскопии ДЭЯР определены основные компоненты тензора сверхтонкого взаимодействия $A_{xx} = 45.0$ МГц, $A_{yy} = 46.5$ МГц и $A_{zz} = 87$ МГц, константа квадрупольной связи $C_q = 1.96$ МГц и параметр асимметрии $\eta = -0.07$. Изученные сверхтонкие и квадрупольные взаимодействия между спинами позволят более точно прогнозировать и описывать поведение квантовых состояний в электрон-ядерных регистрах. Полученные результаты будут способствовать успешной реализации когерентного переноса электронной спиновой намагниченности вакансии бора в ядерную подсистему в пределах ближайшей сферы (квантовая память) по каналам сверхтонких взаимодействий.

Список литературы

1. Vaidya S. et al. Quantum sensing and imaging with spin defects in hexagonal boron nitride //Advances in Physics: X. – 2023. – Т. 8. – №. 1. – С. 2206049.
2. Gracheva I. N. et al. Symmetry of the hyperfine and quadrupole interactions of boron vacancies in a hexagonal boron nitride //The Journal of Physical Chemistry C. – 2023. – Т. 127. – №. 7. – С. 3634-3639.

Магнито-оптическая спектроскопия возбужденного состояния центров окраски в SiC для применения в термометрии

Учаев М. В.¹, К. В. Лихачев, А. М. Скоморохов, Р. А. Бабунц, П. Г. Баранов

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: uchaev.maximm@gmail.com

В широкозонном полупроводнике карбиде кремния (SiC) облучением может быть создано семейство квартетных спиновых центров окраски со спином $S = 3/2$, для которых осуществляется механизм оптически индуцированного выстраивания населенностей

спиновых уровней основного состояния при комнатной температуре и выше [1-4]. Параметр тонкой структуры возбужденного состояния D' этих центров зависит от температуры, что дает возможность применения в термометрии.

Для характеристики возбужденного состояния спиновых центров в рамках данной работы используется полностью оптический метод регистрации сигналов антипересечения спиновых уровней (level anticrossing – LAC) по изменению интенсивности фотолуминесценции (ФЛ). При помощи данного метода были зарегистрированы температурные зависимости спектров LAC различных спиновых центров в карбиде кремния политипов 4H-, 6H-, 15R-SiC. Измерения проводились в температурном диапазоне от 10 К до 350 К. Выявлено влияние сверхтонкого взаимодействия на расщепление энергетических уровней возбужденного состояния центров V2. Определена температурная чувствительность метода, при использовании различных политипов карбида кремния. Проведено температурное картирование на кристалле 4H-SiC с градиентом температуры порядка одного градуса Цельсия.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FFUG-2024-0046 «Спин-фотонные полупроводниковые системы для квантовой электроники».

Список литературы

1. P. G. Baranov, I. V. Il'in, E. N. Mokhov, M. V. Muzafarova, S. B. Orlinskii, and J. Schmidt, JETP Lett. 82, 441 (2005).
2. P. G. Baranov, A. P. Bundakova, I. V. Borovykh, S. B. Orlinskii, R. Zondervan, and J. Schmidt, JETP Lett. 86, 202 (2007).
3. P. G. Baranov, A. P. Bundakova, A. A. Soltamova, S. B. Orlinskii, I. V. Borovykh, R. Zondervan, R. Verberk, and J. Schmidt, Phys. Rev. B 83, 125203 (2011).
4. W. F. Koehl, B. B. Buckley, F. J. Heremans, G. Calusine, and D. D. Awschalom, Nature 479, 84 (2011).

Оптические исследования структурных дефектов в объемном теллуриде германия

Давыдов В. Ю.¹, Смирнов А.Н.¹, Елисеев И.А.¹, Константинов П.П.¹, Шабалдин А.А.¹, Бурков А.Т.¹

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: valery.davydov@mail.ioffe.ru

Теллурид германия (GeTe) является основой наиболее эффективных материалов для термоэлектрических генераторов, преобразующих тепло в электроэнергию. Недавние исследования показали, что эффективность этих материалов можно повысить, что существенно расширит сферу экономически обоснованного использования термоэлектрических устройств [1,2]. Однако стабильность и воспроизводимость этих новых материалов пока недостаточны для их практического применения. Известно, что электронные свойства GeTe в значительной степени определяются высокой концентрацией структурных дефектов – вакансий германия. Это приводит к тому, что в чистом стехиометрическом GeTe

концентрация носителей заряда (дырок) составляет порядка 10^{21} см^{-3} [3]. Высокая концентрация дефектов влияет как на электронные, так и на тепловые свойства – теплопроводность, а также на структурную стабильность материала, которые в совокупности определяют эффективность и практическую ценность материала для термоэлектрических применений. В данной работе мы используем методы оптической спектроскопии (фотолюминесценция и КРС-спектроскопия) для изучения связи между концентрацией структурных дефектов, концентрацией носителей заряда и электронной и фононной структурой теллурида германия.

Образцы для исследований были приготовлены методом прямого сплавления с последующим гомогенизирующим отжигом при температуре 770 К в течение 170 часов. Измерения колебательных и электронных характеристик кристаллов методами микро-комбинационного рассеяния света (μ -КРС) и микро-фотолюминесценции (μ -ФЛ) проводились с помощью спектрометра LabRAM HREvo UV-VIS-NIR-Open (Horiba, France). Для возбуждения спектров μ -КРС и μ -ФЛ использовалась линия $\lambda = 632.8 \text{ нм}$ (1.96 эВ) He–Ne-лазера. Спектры μ -КРС и μ -ФЛ были измерены в диапазоне температур 5–300 К.

Для изменения концентрации вакансий и связанной с ними концентрации дырок, была выполнена термообработка исходных образцов GeTe (отжиг образцов при температурах 600–800 К). Предварительные результаты изучения электронного транспорта показали, что длительный отжиг образцов GeTe при температуре 600–650 К (ниже температуры структурного превращения ромбоэдрической структурной модификации GeTe в кубическую) приводит к снижению концентрации носителей заряда и к повышению подвижности, а при кратковременном отжиге при температуре 800–820 К (выше температуры структурного превращения) концентрация дырок возрастает, и их подвижность падает. Это «высокотемпературное состояние» с повышенной концентрацией носителей заряда является метастабильным и сохраняется при термоциклировании образцов в интервале 300–800 К со скоростью больше 1 К/мин.

Чтобы пролить свет на природу обнаруженных явлений, в работе были выполнены комплексные исследования колебательных и электронных свойств исходных образцов GeTe и образцов одинакового состава, отожженных при температурах 650 и 820 К. В спектрах КРС, полученных при криогенных температурах для исходного образца GeTe, наряду с фононными линиями симметрии E (98 см^{-1} при $T=5 \text{ К}$) и A_1 (139 см^{-1} при $T=5 \text{ К}$), которые характерны для ромбоэдрической структурной модификации GeTe [4], отчетливо регистрируется линия с максимумом на 124 см^{-1} , природа которой пока не установлена. В то же время в низкотемпературных спектрах КРС отожженных образцов GeTe эта особенность либо значительно ослаблена, либо полностью отсутствует (образцы, отожженные при температурах 650 и 820 К соответственно). Для установления структурных особенностей, обуславливающих различия в спектрах КРС исследованных образцов, нами планируется проведение низкотемпературных поляризационных измерений с угловым разрешением. В рамках настоящего исследования для всех исследованных образцов GeTe впервые была обнаружена ИК люминесценция в диапазоне 0.7–0.8 эВ, спектральные

характеристики которой существенно разные для образцов исследованного набора. Ведется анализ данных фотолюминесценции, направленный на идентификацию ее природы и установление корреляции между электронными и транспортными характеристиками объемных образцов GeTe.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ No 25-42-00053, <https://rscf.ru/project/25-42-00053/>.

Список литературы

1. D. M. Levin, M. F. Besser, R. Hanus, J. Appl. Phys. **114**, 083713 (2013).
2. S. Perumal, S. Roychowdhury, K. Biswas, J. Mater. Chem. C **4**, 7520 (2016).
3. J. Li, Z. Chen, X. Zhang, H. Yu, Z. Wu, H. Xie, Y. Chen, Y. Pei, Adv. Sci. **4**, 1700341 (2017).
4. E.F. Steigmeier, G. Harbeke, Solid State Commun. **8**, 1275 (1970).

Влияние спиновой поляризации оптически ориентированных электронов и ядер на электрическое сопротивление объемного n-GaAs

Рогоза М. Д., Козырев Н. В., Намозов Б. Р., Некрасов С. В., Кусраев Ю. Г.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mikhail.ragoza@gmail.com

Исследование посвящено магнетосопротивлению [1], обнаруженному нами в образцах объемного GaAs, легированного атомами Si (диапазон концентраций – от $3 \cdot 10^{14}$ до $1 \cdot 10^{16}$ см⁻³) при условии оптической накачки спинов носителей. При воздействии на образцы малого по величине внешнего магнитного поля ($B=1$ Гс) в зависимости от выбранной геометрии эксперимента (Фогта или Фарадея) наблюдается уменьшение или наоборот увеличение электрического сопротивления образцов.

Наибольшая амплитуда эффекта наблюдалась при температуре $T = 1.5$ К. При температуре превосходящей 5 К эффект не наблюдается. Для ориентации спинов электронов использовался циркулярно-поляризованный луч Ti:Sa лазера с энергией близкой к энергии свободного экситона, при этом как уменьшение, так и увеличение энергии лазера приводило к уменьшению амплитуды эффекта. При приложении внешнего магнитного поля в геометрии Фойгта наблюдается уменьшение электрического сопротивления образцов, магнитополевые зависимости имеют форму контура Лоренца с шириной 1 Гс, при этом аналогичная по ширине и форме контура зависимость наблюдается в эффекте Ханле (деполяризация фотолюминесценции (ФЛ) во внешнем магнитном поле). Приложение магнитного поля в геометрии Фарадея, напротив, приводило к увеличению сопротивления, степень циркулярной поляризации ФЛ также увеличивается, что соответствует восстановлению спиновой поляризации носителей. Характерной особенностью эффекта является его независимость от хиральности возбуждающего света (правая или левая циркулярная поляризация), вместе с тем при освещении линейно поляризованным светом эффект не

наблюдается. Кроме того, кривые, полученные в электрических и оптических измерениях, изменяют свой вид при знакопеременной накачке. Ширина магнитополевых зависимостей при такой модуляции увеличивается, что может быть связано с наличием эффективных магнитных полей, действующих со стороны динамически поляризованных ядер. Влияние ядер наиболее ярко проявляется при измерениях в наклонной геометрии, то есть, когда магнитное поле составляет с осью возбуждения спинов угол равный 45 градусам. При этом магнитополевые зависимости как для степени циркулярной поляризации ФЛ, так и для электрического сопротивления образца изменяют форму и более не описываются контуром Лоренца, что является типичным признаком, характеризующим ядерные эффекты. Помимо этого, магнитополевые зависимости для сопротивления и степени циркулярной поляризации ФЛ были подробно изучены в зависимости от плотности оптической накачки. При увеличении мощности возбуждающего лазера амплитуда и ширина эффекта в геометрии Фойгта возрастают, при этом аналогичная зависимость от темпа накачки наблюдается для эффекта Ханле.

В качестве модели, описывающей наблюдаемое изменение электрического сопротивления ориентированных по спину носителей во внешнем магнитном поле, мы предполагаем механизм, при котором свободные электроны рассеиваются на нейтральной примеси (нейтральные доноры). Магнитное поле в геометрии Фойгта, деполаризуя носители приводит к изменению триплетного и синглетного вклада в сечение рассеяния, что приводит к падению электрического сопротивления. Напротив, в геометрии Фарадея происходит восстановление спиновой ориентации носителей и увеличение электрического сопротивления образца.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-12-00205.

Список литературы

1. M. D. Ragoza, N. V. Kozyrev, S. V. Nekrasov, B. R. Namozov, Yu. G. Kusrayev, N. Bart, A. Ludwig, and A. D. Wieck., Electrical resistance associated with the scattering of optically oriented spin-polarized electrons in n-GaAs, Phys. Rev. B 109, L121203 (2024).

Эффект штарка на бесфононном переходе ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ в ионах Cr^{3+} в кристаллах титаната стронция

Скворцов А. П., Трепаков В.А.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: spacek.skvortsov@yandex.ru

Квантовый параэлектрик SrTiO_3 (STO) является модельным представителем семейства перовскитоподобных ABO_3 высокополяризуемых окислов с фазовыми переходами и мягкими фононными модами, объектом повышенного интереса фундаментальных и прикладных исследований. Его функциональные свойства в значительной степени связаны с

присутствием примесей и дефектов, что делает крайне важным понимание структуры и микроскопических свойств активных примесных центров в этом материале.

При $T_{\text{АФД}}=105$ К кристалл STO претерпевает антиферродисторсный фазовый переход 2-го рода. Симметрия кристалла понижается от кубической O^1_h до тетрагональной D^{18}_{4h} с сохранением центросимметричности. Примесный ион Cr^{3+} замещает в решётке STO близкий по размеру октаэдрический ион Ti^{4+} .

В настоящей работе, для уточнения симметрии примесных ионов Cr^{3+} в решётке STO нами исследовалось влияние внешнего электрического поля на поведение R-линии излучения иона Cr^{3+} , отвечающей электронному переходу ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ (7935,5 Å). Была использована высокочувствительная дифференциальная методика [1], позволяющая определить характер инверсионной симметрии по форме дифференциального сигнала, представляющего собой разность контуров спектральной линии в поле и без поля. Согласно [1], в переменном электрическом поле для примесей с центром инверсии дифференциальный сигнал имеет вид 1-ой производной контура линии по частоте, в то время как для безинверсионных - форму 2-ой производной. Опыты проводились на монокристаллах STO при $T = 77$ К.

Наблюдавшийся в нашем эксперименте дифференциальный сигнал следовал 1-ой производной контура линии по частоте, свидетельствуя о центросимметричности Cr^{3+} и сдвиге линии в поле к высоким энергиям, указывая, в частности, на отсутствие близкого компенсирующего дефекта. Последующие опыты в постоянном электрическом поле установили сильный сдвиг R-линии в сторону коротких волн. *Однако зависимость величины сдвига от приложенного поля оказалась нетривиальной вследствие возможной комбинации линейной и квадратичной составляющих.* Кроме того, с ростом поля контур линии излучения так же испытывал небольшое уширение, свидетельствуя о возможном расщеплении линии в поле. Важно заметить, что симметричное уширение линии в поле характерно для линейного эффекта Штарка, наблюдавшегося в спектрах безинверсионных локальных центров в различных кристаллах.

Рассматриваются причины наблюдавшегося необычного поведения R-линии, которое может быть связано как с проявлением индуцированной мягкими модами локальной конфигурационной неустойчивости возбуждённого вырожденного E состояния примесного иона Cr^{3+} [2], так и с другими возможными факторами.

Отметим, что дифференциальные исследования эффекта Штарка на R-линии люминесценции Cr^{3+} в квантовом параэлектрике KTaO_3 , в котором АФД переход отсутствует, проявляют обычное для локального фазового перехода, обусловленного квадратичным мультимодовым эффектом Яна-Теллера на мягкой TO_1 моде, поведение, связанное с потерей центра инверсии Cr^{3+} в возбуждённом E^2 состоянии.

Список литературы

1. A.A.Kaplyanskii, V.N.Medvedev, A.P.Skvortsov. Surface Science 37 (1973) 650-657

2. V.S. Vikhnin, V. Trepakov, F. Smutny, L. Jastrabik. *Ferroelectrics* 176 (1996) 7-24

Электронно-лучевой синтез высокоэнтропийной керамики со структурой перовскита

Гынгазов С. А., Васильев И.П., Болтуева В.А.

ТПУ

e-mail: ghyngazov@tpu.ru

Одним из перспективных направлений конструирования высокоэнтропийной керамики – создание термоэлектриков на основе перовскита. Уже сейчас перовскитные солнечные батареи выдерживают тысячи часов термического циклирования, а учёные работают не только над дальнейшим повышением их производительности, но и над тем, чтобы понять, каким образом минерал обеспечивает настолько высокую эффективность. В этой связи вопросы разработки новых эффективных методов синтеза керамик со структурой перовскита являются особо актуальными. В работе исследуется синтез высокоэнтропийной керамики $(\text{Ca}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ba}_{0.2}\text{Pb}_{0.2}\text{La}_{0.2})\text{TiO}_3$ со структурой перовскита при облучении на воздухе порошковой смеси исходных реагентов CaTiO_3 , SrTiO_3 , BaTiO_3 , PbTiO_3 , La_2O_3 , TiO_2 мощным пучком быстрых электронов с энергией 1.4 – 2.5 МэВ, мощностью до 90 кВт и плотностью мощности до 100 кВт/см². Облучение порошков проводили на ускорителе электронов (Уникальная научная установка «Стенд ЭЛВ-6», ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия). Температура нагрева задавалась величиной тока электронного пучка. Облучение проводили в режиме сканирования. Порошковую смесь размещали в массивную медную кювету и перемещали под пучком с помощью подвижного столика. Скорость перемещения кюветы изменяли от 0.25 см/с до 1 см/с. Проведены исследования влияния режимов механической обработки реакционной смеси, величины ускоряющего напряжения, тока электронного пучка и скорости перемещения кюветы под пучком на эффективность синтеза высокоэнтропийной керамики со структурой перовскита. Предварительно на примере смесей оксидов были установлены важнейшие закономерности синтеза сложно-оксидных соединений при облучении их мощными пучками быстрых электронов. Было установлено, что наиболее эффективно синтез протекает при плавлении смеси, то есть при реализации жидкофазного синтеза. В этих условиях синтез происходит за несколько секунд нагрева электронами. Во время нагрева смеси с поверхности частиц имеет место активное газовыделение, что приводит при остывании расплава к образованию пористого керамического продукта. Пористость можно регулировать режимами электронной обработки и скоростью перемещения кюветы под пучком. При синтезе высокоэнтропийной керамики $(\text{Ca}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ba}_{0.2}\text{Pb}_{0.2}\text{La}_{0.2})\text{TiO}_3$ указанные закономерности также наблюдались. РФА показал, что полученный под облучением керамический продукт представляет из себя высокоэнтропийную керамику $(\text{Ca}_{0.2}\text{Sr}_{0.2}\text{Ba}_{0.2}\text{Pb}_{0.2}\text{La}_{0.2})\text{TiO}_3$. Экспериментально установлены закономерности формирования микроструктуры, элементного состава синтезированной керамики от условий и режимов электронной обработки. Исследовано влияние технологических режимов на КПД синтеза, который определяли как

отношение массы готового керамического продукта в кювете после облучения к массе порошковой смеси в кювете до облучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 23-79-00014. Авторы благодарят ИЯФ СО РАН за предоставленную возможность использования установки УНУ Стенд ЭЛВ-6 и консультации специалистов.

Глубокие уровни дислокаций в гетероэпитаксиальных слаболегированных слоях AlGaAsSb/GaAs

Солдатенков Ф. Ю.¹, Соболев М.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: f.soldatenkov@mail.ioffe.ru

В работе исследовались p-i-n структуры на основе слаболегированных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ с максимальным содержанием x от 0.15 до 0.6 и y до 0.05, толщиной до 50 мкм, полученных методом жидкофазной эпитаксии за счет автолегирования фоновыми примесями. Такие широкозонные гетероэпитаксиальные AlGaAs/GaAs и AlGaAsSb/GaAs слои могут быть использованы при изготовлении импульсных высоковольтных p-i-n диодов, способных работать в мегагерцовом диапазоне частот повторения импульсов и при повышенных температурах, выше 300 °C [1].

Методами вольт-фарадных характеристик и нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) было выяснено, что в плавных p^0-i-n^0 -переходах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ с $x \sim 0.15-0.19$ и $y \sim 0.02$ эффективной рекомбинационной ловушкой является глубокий уровень, связанный с дислокациями несоответствия, подобный ранее обнаруженным уровням в слаболегированных гетероэпитаксиальных слоях InGaAs/GaAs и GaAsSb/GaAs с регулярной сеткой дислокаций несоответствия [2]. Во всех слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ с x от 0.24 до 0.6 и y от 0.01 до 0.05 эффективными рекомбинационными ловушками были DX центры донорных примесей Si, Se или Te. Важной особенностью исследованных гетероэпитаксиальных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ с большим содержанием алюминия (x от 0.24 до 0.6) было то, что в них обнаружили отсутствие глубоких уровней, связанных с дислокациями, хотя ранее [2] в DLTS-спектрах слоев $\text{GaAs}_y\text{Sb}_{1-y}$ с аналогичным содержанием сурьмы (y от 0.015 до 0.03) были выявлены глубокие уровни, связанные с дислокациями несоответствия. В работе рассмотрены возможные причины отсутствия дислокационных глубоких уровней в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ слоях с большим содержанием алюминия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00245, <https://rscf.ru/project/23-29-00245/>.

Список литературы

1. M. M. Sobolev, F. Y. Soldatenkov, and V. G. Danil'chenko. Deep-level defects in high-voltage AlGaAs p-i-n diodes and the effect of these defects on the temperature

dependence of the minority carrier lifetime. Journal of Applied Physics, v. 128, p. 095705 (2020).

2. M. M. Sobolev, F. Yu. Soldatenkov, and I. L. Shul'pina. Misfit dislocation-related deep levels in InGaAs/GaAs and GaAsSb/GaAs p-i-n heterostructures and the effect of these on the relaxation time of nonequilibrium carriers. Journal of Applied Physics, v. 123, p. 161588 (2018).

Изучение механических свойств интерметаллидов на основе Ti, армированных углеродными нанотрубками

Янковская У. И.¹, Захаров П.В.¹

¹СПбПУ

e-mail: yankovskaya_ui@spbstu.ru

В рамках исследования созданы модели поликристаллов: алюминидов титана (TiAl_3 и Ti_3Al) и никелида титана (TiNi_3). Интерметаллидные сплавы имеют особое значение как перспективные конструкционные материалы. В данном исследовании представлены результаты изучения методом молекулярной динамики структурных, упругих и механических свойств интерметаллидов, армированных углеродными нанотрубками (УНТ). Углеродные нанотрубки выбраны в качестве армирующего материала для интерметаллических матриц из-за их превосходных механических свойств. Было показано, что УНТ повышают прочность из-за их превосходной прочности на разрыв, высокого соотношения сторон, низкой плотности и модуля упругости.

Интерметаллиды TiAl привлекают внимание своими превосходными свойствами, такими как легкий вес, высокая удельная прочность и хорошая стойкость к окислению и коррозии при повышенных температурах, что может найти широко применимыми в автомобильной и аэрокосмической областях [1]. Алюминиды титана относятся к видам хрупких материалов [2]. Из-за сложности процесса обработки, вызванной хрупкостью, добавление третьего элемента может изменить прочность и пластичность интерметаллидов TiAl , что может расширить их область применения. В данной работе получено, что TiAl_3 является более твердым по сравнению с Ti_3Al . Внедрение углеродных нанотрубок позволило повысить предел прочности и предел текучести для обоих интерметаллидов. Модуль упругости для этих моделей поликристаллов повысился более, чем на 40%.

Никелид титана является перспективным материалом как для технического, так и для медицинского применения [3]. Изучение механических и прочностных свойств данных сплавов является важной научной и практической задачей. В результате атомистического моделирования было получено, что внедрение 5 % объемной доли УНТ в композит приводит к упрочнению матрицы и повышению предела текучести, а также повышению модуля Юнга.

В общем для рассматриваемых интерметаллических поликристаллов показано, что внедрение углеродных нанотрубок в качестве армирующего элемента приводит к улучшению механических характеристик.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-20038 (<https://rscf.ru/project/24-22-20038/>) и гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 24-22-20038.

Список литературы

1. Sikka V. K. et al., Large-scale manufacturing of nickel aluminide transfer rolls for steel austenitizing furnaces, *Intermetallics*, 12, p. 837, 2004. doi: 10.1016/j.intermet.2004.02.034
2. Colinet C. and Pasturel A., Structural stability of one-dimensional long-period structures in the TiAl₃ compound, *J. Phys. Condens. Matter*, 14, p. 6713, 2002. doi: 10.1088/0953-8984/14/26/311
3. Клопотов А.А., Потееаев А.И., Гюнтер В.Э., Кулагина В.В. Влияние структурных дефектов на устойчивость сплавов на основе никелида титана / Под ред. В.Э. Гюнтераю - Томск. Изд-во НПП «МИЦ», 2010, С. 296 – 302.

Физика и технология преобразования энергии

Увеличение эффективности ввода оптической мощности в AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователях лазерного излучения

Романчук А. К.¹, Малевская А.В.¹, Калюжный Н.А.¹, Нахимович М.В.¹, Шварц М.З.¹, Андреев В.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: a.romanchuk@mail.ioffe.ru

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) лазерного излучения (ЛИ) находят широкое применение во многих областях науки, техники и медицины [1,2]. Для изготовления ФЭП работающих в диапазоне волн 800-860 нм используются полупроводниковые соединения AlGaAs/GaAs. Одним из аспектов разработки ФЭП ЛИ является повышение эффективности ввода поступающего излучения.

Повышение мощности излучения, преобразуемого ФЭП, возможно при уменьшении шага контактной сетки на его фронтальной поверхности. Однако при таком решении значительно возрастают оптические потери: часть излучения поглощается или отражается токосборными шинами, что сказывается на фототоке и КПД прибора. Снизить затенение возможно формированием пирамидального наклонного профиля токосборных шин с зеркальными боковыми гранями, отражающими излучение в направлении фоточувствительной поверхности ФЭП [3]. Другим решением данной проблемы является формирование призматического покрытия (ПП), в общем случае представляющего собой матрицу из полумонокристаллических полнотелых линейных линз с шириной основания каждой линзы соответствующим шагом контактной сетки ФЭП [4]. Принцип работы таких линз заключается в перенаправлении световых лучей, падающих на контактную сетку, к фоточувствительной поверхности ФЭП за счет их преломления на выпуклой лицевой поверхности.

Задачей данной работы является разработка и изготовление ПП с микроразмерным профилем для ФЭП ЛИ с характерным шагом контактной сетки на фотоприемной поверхности 50-100 мкм и исследование влияния ПП на характеристики AlGaAs/GaAs приёмников излучения.

ПП изготавливалось из оптического силикона при его полимеризации в негативной матрице, формируемой методом анизотропного травления материала (арсенида галлия) с учетом его кристаллографической ориентации. Характерная толщина прорывтия составляла 100-150 мкм с учетом несущего слоя для массива цилиндрических линз. Были изготовлены покрытия с различным радиусом преломляющей поверхности линейных линз и общей высотой микрорельефа для экспериментальной оценки эффективности ПП для ФЭП ЛИ. Точность установки и юстировки ПП на поверхности ФЭП контролировались с помощью оптического микроскопа.

Эффективность применения ПП определялась на AlGaAs/GaAs ФЭП ЛИ, гетероструктуры которых были изготовлены методом МОС-гидридной эпитаксии [5]. Выполнено измерение спектральных зависимостей внешнего квантового выхода фототовета (QE_{ext}) для ФЭП с ПП и без. В качестве образца сравнения использовался ФЭП с шагом контактной сетки 100 мкм и просветляющим покрытием TiOx/SiO₂ с характерным значением QE_{ext} = 83.5% на длине волны ЛИ 800 нм. При шаге контактов 50 мкм значение QE_{ext} составляло 75.3%, что обусловлено 13-ти процентными оптическими потерями на затенение.

При оптическом контакте силиконового ПП с диэлектрическим покрытием ФЭП наблюдался эффект «просветления» поверхности. Поэтому на фотоприемную поверхность ФЭП ЛИ, изготавливаемого для работы с ПП, наносилось однослойное просветляющее покрытие TiOx. В результате установка на поверхности ФЭП, затененной контактной сеткой шагом 50 мкм, призматического покрытия позволила поднять значение внешнего квантового выхода фототовета до 84.5%, что превысило показатель для образца сравнения.

Таким образом, разработанное призматическое покрытие позволяет существенно снизить оптические потери на затенение контактной сеткой в ФЭП ЛИ. В свою очередь использование контактной сетки с высокой плотностью токосборных шин (шаг 50-100 мкм) создает условия для преобразования ЛИ высокой мощности за счет снижения омических потерь [5].

Список литературы

1. Algora C. et al. Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light //Joule. – 2022. – Т. 6. – №. 2. – С. 340-368. DOI:10.5281/zenodo.6620474
2. Zheng Y. et al. Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges //Space Solar Power and Wireless Transmission. – 2024.DOI:10.1016/j.sspwt.2023.12.001
3. Malevskaya A. V., Malevski D. A., Il'Inskaya N. D. Effect of bus-bar material and configuration on the efficiency of GaInP/GaAs/Ge solar cells //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. – Т. 690. – №. 1. – С. 012039. DOI:10.1088/1742-6596/690/1/012039
4. García-Linares P. et al. Reduction of front-metallization grid shading in concentrator cells through laser micro-grooved cover glass //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2015. – Т. 1679. – №. 1. DOI:10.1063/1.4931535
5. Kalyuzhnyy N.A., Malevskaya A.V., Mintairov, S.A., Mintairov M.A., Nakhimovich M.V., Salii R.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M.[AM1], Photovoltaic AlGaAs/GaAs devices for conversion of high-power density laser (800–860 nm) radiation. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, v.262, 2023, ArtNo: #112551 DOI:10.1016/j.solmat.2023.112551

Преобразование субнаносекундных лазерных импульсов в электрический ток многопереходными фотопреобразователями: роль туннельных диодов

Толкачев И. А.¹, Юферев В. С.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: tolkachevia@mail.ioffe.ru

Монолитные многопереходные фотопреобразователи (МФП) лазерного излучения, состоящие из нескольких однопереходных ФП (ОПФП), которые расположены друг над другом и соединены последовательно посредством встречно включённых туннельных диодов (ТД) позволяют в фотовольтаическом режиме кратно увеличить по сравнению с однопереходными ФП выходное напряжение на нагрузке и обеспечить высокую эффективность преобразования оптической мощности в электрическую. Считается, что именно ТД обеспечивают реализацию этого преимущества, поскольку, если ток через МФП остается меньше пикового тока туннельных диодов, падение напряжения на барьере между смежными ОПФП оказывается малым и не оказывает заметного влияния на величину тока. В противном случае, если ТД отсутствуют, либо интенсивность лазерного излучения настолько велика, что ток превышает пиковые токи туннельных диодов, характеристики МФП будут практически совпадать с характеристиками ОПФП. Однако, все это справедливо лишь в случае, если интенсивность излучения не меняется или слабо меняется во времени и МФП практически работает в стационарном режиме. Именно эта ситуация детально исследовалась в литературе (см., например, [1]). При этом оказалось, что таких режимов в принципе может быть несколько [2]. Совсем другая ситуация, однако, возникает, когда МФП предполагается использовать в системах радиофотоники [3] для преобразования лазерных импульсов наносекундного диапазона. В этом случае существенное влияние должны оказывать емкостные эффекты. Применительно к МФП эта сторона проблемы до сих пор в литературе не рассматривалась. Целью настоящей работы является численное исследование особенностей преобразования субнаносекундных лазерных импульсов в электрический ток многопереходными ФП. Учитывая сложности моделирования структур с несколькими ТД [2], мы ограничились рассмотрением двух- и трехпереходными ФП. Было показано, что замыкание фототоков, возникающих в каждом отдельном фотоактивном р-п переходе МФП, происходит не путем туннелирования носителей заряда, а за счет возникновения токов смещения в слоях объемного заряда в окрестности границ между соседними ОПФП. При этом оказалось, что фотоотклики (импульсы напряжения на нагрузке), рассчитанные с учетом и без учета туннелирования носителей, практически совпадают. Это означает, что структуры МФП, предназначенные для преобразования лазерных импульсов, могут эффективно функционировать без ТД или, по крайней мере, требования к ТД в них могут быть существенно снижены.

Список литературы

1. S. Fafard, D.P.Masson, J. Applied Physics, **130**, 160901 (2021).
2. Юферев В.С., Толкачев И.А., Калиновский В.С. О возможной неединственности преобразования лазерного излучения в электрический ток в многопереходных монокристаллических фотопреобразователях, Письма в ЖТФ, 2023, 50, 7, 39-42
3. Д.Ф. Зайцев, В.М. Андреев, И.А. Биленко, А.А. Березовский, П.Ю. Владиславский, Ю.Б. Гурфинкель, Л.И. Цветкова, В.С. Калиновский, Н.М. Кондратьев, В.Н. Косолюбов, В.Ф. Курочкин, С.О. Слипченко, Н.В. Смирнов, Б.В. Яковлев, Радиотехника, 2021, 85 (4), с. 153

Мощный импульсный повышающий преобразователь на нитрид-галлиевых транзисторах

Шеришунова Е. А.¹, Мошкунов С.И.¹, Хомич В.Ю.¹, Иголкин А.А.²

¹ИЭЭ РАН, ²Самарский университет им. Королева

e-mail: eshershunova@ieeras.ru

Для увеличения грузоподъемности и дальности полетов легкомоторных летательных аппаратов предполагается использование распределенной гибридной силовой установки, в которой подразумевается использование электрической энергии как от электрохимических источников тока, таких как аккумуляторная батарея и топливные элементы, так и от генератора с приводом от двигателя внутреннего сгорания.

В данной работе приводятся результаты разработки мощного импульсного повышающего преобразователя для топливного элемента. Особенностью преобразователя является так называемая синхронная схема с двумя коммутирующими элементами и использование в качестве них силовых широкозонных транзисторов с высокой подвижностью носителей на основе нитрида-галлия.

В качестве топливного элемента рассматривается элемент, рабочее напряжение которого в оптимальном режиме 90 В. Однако выходное напряжение топливного элемента сильно меняется в зависимости от тока и от времени [1,2], поэтому в рамках работы был разработан и создан повышающий преобразователь напряжения с напряжением на входе от 90 до 130 В и на выходе 130 В, - оптимальным напряжением на шине для используемого электромотора.

Разработан и успешно протестирован модуль преобразователя на 3 кВт с рабочей частотой 100 кГц. Проведен расчет потерь силового преобразователя [3]. Установлено, что наибольшие потери вносят потери на проводимость транзисторов, что особенно заметно при высокой температуре кристалла, и потери в проводе силового индуктора. Расчет показывает, что при оптимальном охлаждении КПД можно увеличить на 1 %.

Модульная конструкция позволяет увеличить мощность, а параллельное соединение GaN-транзисторов также увеличить КПД, уменьшив суммарное сопротивление открытого

канала транзистора. При соединении двух транзисторов в параллель КПД увеличивается на 1 % с 98 до 99 % даже при рабочей температуре кристалла 100-125° С.

На основании расчета и эксперимента сделан силовой дроссель индуктивностью 40 мкГн с отечественным ферритовым сердечником Ш-образной конструкции. Максимальные потери в дросселе близки к расчетным и составляют около 0,4 % от общей мощности. Ток насыщения дросселя составляет 49 А.

Управление преобразователем реализовано на основе метода среднего тока, реализуемого посредством двойной петли обратной связи по току и по напряжению [4].

КПД созданного преобразователя напряжения составляет $98 \pm 0.5\%$, что больше на 1 - 2 % нежели, чем у собранного нами ранее преобразователя напряжения с похожими выходными параметрами на кремниевых транзисторах [5].

Работа выполнена в рамках проекта № 075-15-2024 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Бельмесов А. А. и др. Твердополимерные топливные элементы: взаимосвязь» процессы–материалы–конструкционные решения» в современных тенденциях //Russian Chemical Reviews. – 2024. – Т. 93. – С. 6.
2. Miazga T., Iwański G., Nikoniuk M. Energy conversion system and control of fuel-cell and battery-based hybrid drive for light aircraft //Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 4. – С. 1073.
3. Варюхин А. Н. и др. Мощный импульсный преобразователь постоянного тока на карбид-кремниевых транзисторах //Прикладная физика. – 2021. – №. 1. – С. 75-81.
4. . Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А. Способ управления импульсным силовым преобразователем в режиме среднего тока// Патент РФ RU 2791909 C1. 2023.
5. . Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А. Повышающе-понижающий преобразователь напряжения для заряда аккумуляторной батареи на борту электрического самолета //Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – №. 15. – С. 22-24

Повышение термоэлектрической эффективности полупроводника с помощью создания градиентно-варизонной структуры материала

Марков О. И.¹

¹ОГУ им. И.С.Тургенева

e-mail: O.I.Markov@mail.ru

Известно, что функционально-градиентные термоэлектрические материалы позволяют повысить термоэлектрическую эффективность по сравнению с однородными материалами. Функционально-градиентные термоэлектрические материалы создаются на основе

неравномерного распределения примесей по длине термоэлектрической ветви, поскольку для каждой температуры существует оптимальная концентрация легирующей примеси, обеспечивающей максимум термоэлектрической эффективности материала [1]. Однако эффективно изменить концентрацию носителей заряда можно и варьируя ширину запрещенной зоны. Следовательно, подбирая оптимальный вид распределения легирующих примесей по длине термоэлектрических ветвей и варьируя ширину запрещенной зоны, можно добиться повышения термоэлектрической эффективности данного устройства в требуемом интервале температур.

Возможность создания такой структуры убедительно показана экспериментально и теоретически в работе [2] на примере твердых растворов висмут-сурьма. К большому сожалению, эти сплавы демонстрируют высокую термоэффективность только *n*-типа. Ближайшим низкотемпературными веществами со сравнимой эффективностью являются теллуриды висмута и сурьмы структуры. Путь экспериментального поиска градиентно-варизонной структуры представляется бесперспективным и поэтому на первый план выходит метод компьютерного моделирования, который позволяет существенно оптимизировать направление экспериментального поиска более эффективных структур и технологии их создания.

Целью данной работы является демонстрация расчетными методами принципиальной возможности создания градиентно-варизонных структур на примере термоэлектрика, близкого по параметрам к теллуридам висмута и сурьмы. В основе расчета лежит решение одномерной граничной задачи теплопроводности ветви, в которой кинетические коэффициенты (дифференциальная термоэдс, удельная электропроводность и удельная теплопроводность) рассчитывались исходя из стандартной зонной модели с двумя типами невырожденных носителей заряда [3]. Учитывались эффекты Джоуля и Томсона. В ходе расчета проводилась оптимизация для получения максимального перепада температур.

Результаты расчета показали, что в том случае, когда градиент концентрации легирующей примеси направлен в сторону холодного конца, а градиент ширины запрещенной зоны направлен в сторону горячего конца ветви удастся снизить тепловыделение Джоуля вблизи холодного конца ветви, уменьшить вклад биполярной составляющей в теплопроводность ветви, увеличить распределенный эффект Пельтье, что в совокупности приводит к росту эффективности ветви охлаждающего термоэлемента.

Список литературы

1. Анатычук Л. И., Вихор Л. Н. Функционально-градиентные термоэлектрические материалы. — Черновцы-Киев: Институт термоэлектричества, 2012. 182 с.
2. Марков О.И. Градиентно-варизонные сплавы висмут-сурьма. Успехи прикладной физики. 2014, Т.2, № 5, с.447-452.
3. Markov O.I. On the distribution of charge carriers in branches thermoelectric cooler. Technical Physics, 2024, Vol. 69, No.4, p.954-958.

Метаморфные InGaAs/GaAs гетероструктуры для радиационно-стойких фотопреобразователей лазерного излучения

Шварц М. З.¹, Емельянов В.М., Корниенко П.Д., Минтаилов С.А., Нахимович М.В., Салий Р.А., Калужный Н.А.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: shvarts@scell.ioffe.ru

Основные закономерности научной работы

Фотоэлектрические приемники-преобразователи лазерного излучения (ЛИ) находят все более широкое применение при удаленном (с передачей энергии по оптоволокну или по открытым каналам) энергопитании систем и устройств. Доступная на сегодняшний день номенклатура мощных лазеров охватывает несколько основных спектральных диапазонов длин волн, в том числе отвечающих полосам прозрачности атмосферы (для открытых каналов передачи энергии) и оптоволокну (для соответствующих трактов). Здесь наибольший интерес представляют длины волн, для которых, с одной стороны, имеются мощные источники лазерного излучения (809-860 нм, 1064 нм и др.), а с другой возможно эффективное преобразование энергии полупроводниковыми фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП), «настроенными» на длину волны ЛИ и оптимизированным по конструктивным и функциональным параметрам на работу при повышенных освещенностях [1-4].

Потребность в беспроводном питании устройств (контрольно-диагностического оборудования и пр.), находящегося в зонах с высоким уровнем радиационного воздействия, к которым относятся условия космического пространства и неэкранированные зоны атомных (ядерных) реакторов, ускорителей заряженных частиц, изотопных источников и других объектов требует разработки соответствующих гетероструктур для радиационностойких ФЭП. Эффективный способ повышения радиационной стойкости ФЭП – это сокращение толщин фотоактивных слоев при сохранении доли поглощаемого излучения за счет встраивания в структуру Брегговского отражателя (БО), играющего роль селективного зеркала (для излучения с длиной волны соответствующей или близкой к краю фундаментального поглощения материала) и тыльного потенциального барьера для фотогенерированных носителей заряда.

В работе представлены решения для ФЭП ЛИ на основе метаморфных $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ гетероструктур с БО, оптимизированных на эффективное преобразование мощного ЛИ с длиной волны 1000-1100 нм и обеспечивающих повышенный уровень стойкости при облучении высокоэнергетичными (2 МэВ и 4.5 МэВ) электронами. Конструктивные параметры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ структур обеспечивали достижение максимальных значений фоточувствительности в целевом диапазоне длин волн при 17-21% содержании In. Для гетероструктур варьировалась толщина активной области p-n переходом (базовый слой и эмиттер), которая является наиболее критичным параметром с точки зрения обеспечения радиационной стойкости. Брегговские отражатели (БО) формировались на основе 12 – 18 пар слоев

материалов In_xAlAs и In_xGaAs . Разработаны конструкции и изготовлены образцы со сниженным уровнем поглощения длинноволнового излучения в слоях, составляющих БО. Показано, что оптимальным вариантом для ФЭП являются БО на основе пар слоев $\text{In}_{0.17}(\text{Ga}_{0.88}\text{Al}_{0.12})_{0.83}\text{As}/\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{As}$.

Исследованы оптические процессы прохождения и поглощения излучения в фотоактивных слоях, отражения от и самопоглощения в БО излучения диапазона целевых длин волн 1000-1100 нм. Проработано решение для структуры ФЭП с БО, при использовании которой должно обеспечиваться повышение радиационной стойкости прибора: использование «предельно» утоненной активной области (до 450 нм).

Эксперименты по радиационному облучению электронами с энергией 2 МэВ и 4.5 МэВ показали преимущество ФЭП на основе гетероструктуры с утонённой областью во всем диапазоне флюенсов (вплоть до $1\text{E}16\text{ е/см}^2$). При этом начальная (до облучения) спектральная фоточувствительность и эффективность преобразования ЛИ оказывались несколько ниже в сравнении с образцами с широкой активной областью (1400-3000 нм).

Список литературы

1. Carlos Algora, Iván García, Marina Delgado, Rafael Peña, Carmen Vázquez, and Ignacio Rey-Stolle (2022). «Beaming Power: Photovoltaic Laser Power Converters for Power-by-Light» // *Joule*, 6(2), 340–368, <https://doi.org/10.5281/zenodo.6620474>
2. Yifan Zheng, Guodong Zhang, Zhenghao Huan, Yang Zhang, Guangfu Yuan, Qingyuan Li, Guoyu Ding, Zhaochen Lv, Wang Ni, Yuchuan Shao, Xingjiang Liu, Jifeng Zu, «Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges», *Space Solar Power and Wireless Transmission*, Volume 1, Issue 1, 2024, Pages 17-26, <https://doi.org/10.1016/j.sspwt.2023.12.001>.
3. N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, “Optimization of photoelectric parameters of InGaAs metamorphic laser ($\lambda=1064\text{ nm}$) power converters with over 50% efficiency” // 2020, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, v.217 ArtNo: #110710, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110710>
4. N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, Photovoltaic AlGaAs/GaAs devices for conversion of high-power density laser (800–860 nm) radiation. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, v.262, 2023, ArtNo: #112551, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112551>

Влияние резистивных параметров фотоэлектрических преобразователей на карты электролюминесценции и вольт-амперные характеристики.

Малевская А. Д.¹, Минтаиров М.А.¹, Евстропов В.В.¹, Малевский Д.А.¹, Малевская А.В.¹, Салий Р.А.¹, Калужный Н.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: anmalevskaya@mail.ioffe.ru

Достижение высокой эффективности фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), предназначенных для преобразования излучения большой мощности [1-4] требует поиска компромисса между величиной резистивных потерь и затенением фотоприемной поверхности фронтальной контактной сеткой. Оптимизация конструкции фронтальных контактов ФЭП возможна с помощью моделирования процессов растекания тока. Существуют различные подходы [5-8], включая рассматриваемую в работе трубковую модель [8], основанную на представлениях о трубках тока, траектория которых характеризуется изломами под прямым углом. Достоинством модели является ее физическая простота и возможность экспериментального определения основных параметров модели.

В данной работе показано, что расширенная трубковая модель позволяет производить поиск оптимальных параметров конструкции фронтальных контактов ФЭП лазерного излучения с учётом высоты, ширины, длины контактов, затенения, мощности падающего излучения, удельного сопротивления металла и полупроводниковых слоев. Определено, что на вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФЭП эквивалентное влияние оказывают сопротивление металлического контакта (в модели характеризуется параметром R_M) и сопротивление слоя растекания (параметр R_L). Поэтому задачу определения резистивных параметров по ВАХ ФЭП невозможно решить однозначно. Для анализа экспериментальных характеристик требуется дополнительно исследовать вид карт электролюминесцентного (ЭЛ) свечения фронтальной поверхности ФЭП. В результате исследования разработан метод экспериментального определения основных параметров контактной сетки, при помощи одновременного измерения темновой ВАХ и карты ЭЛ при пропускании тока через край фронтального контакта. Предложенный экспериментальный метод, позволяет однозначно разделить вклад в резистивные потери параметров R_M и R_L .

Метод был применён к образцам ФЭП на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, отличающихся только конструкцией фронтальной контактной сетки. Показано, что разработанная модель адекватно описывает экспериментальные ВАХ и карты ЭЛ. Таким образом, предложенная модель в совокупности с разработанным методом позволяют проводить характеризацию резистивных потерь ФЭП, а также проводить моделирование процессов растекания тока в ФЭП.

Список литературы

1. Alferov Z.I., Andreev V.M., and Rumyantsev V.D.. III–V Solar Cells and Concentrator Arrays (second edition). High-Efficient Low-Cost Photovoltaics: Springer Ser. Opt. Sci., 140 (2020) p.133-174.

2. Steiner M., Philipps S.P., Hermle M., Bett A.W. and Dimroth F. Validated front contact grid simulation for GaAs solar cells under concentrated sunlight. Prog. Photovolt: Res. Appl. 19(1) (2011) p.73-83.
3. Helmers H., Oliva Ed., Schachtner M., Mikolasch G., Ruiz-Preciado L. A., Franke Al., Bartsch J. Overcoming optical-electrical grid design trade-offs for cm²-sized high-power GaAs photonic power converters by plating technology. Prog. Photovolt Res App. 32(9) (2024) p. 636-642.
4. 4 Algora C. et al. Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light 6(2) (2022) с. 340-368.
5. Galiana B., Algora C., Rey-Stolle I. Explanation for the dark I–V curve of III–V concentrator solar cells. Prog. Photovolt: Res. Appl. 16 (2008) p. 331–338.
6. М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, Растекание тока в солнечных элементах: двухпараметрическая трубковая модель. ФТП 50(7) (2016) с. 987-992.
7. А.Д. Малевская, Растекание тока в солнечных элементах: трёхпараметрическая трубковая модель. Углеродные и ван-дер-ваальсовы наноструктуры (2024) с.82-83
8. А.Д. Малевская, М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Д.А. Малевский, Н.А. Калюжный, Трёхпараметрическая трубковая модель растекания тока в солнечных элементах, ФТП 58(10) (2024) с. 573.

Исследование времен жизни неравновесных носителей заряда электролюминесцентным методом в многопереходных солнечных элементах при облучении протонами и электронами высоких энергий

Левина С. А.¹, Емельянов В.М., Корниенко П.Д., Нахимович М.В., Шварц М.З.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: levina@mail.ioffe.ru

Многопереходные (МП) солнечные элементы (СЭ) на сегодняшний день являются основным источником энергии для космических аппаратов функционирующих как на различных орбитах Земли, так и создаваемых для полетов на Луну и Марс. При этом отличительной особенностью эксплуатации СЭ в космосе является воздействие на полупроводниковые структуры частиц высоких энергий, в первую очередь, электронов и протонов, захваченных магнитным полем Земли, а также переносимых солнечными и галактическими космическими лучами. Такие частицы вызывают радиационное повреждение структуры, которое приводит к возникновению дополнительных центров безызлучательной рекомбинации. Эти центры приводят к сокращению времен жизни и, соответственно, диффузионных длин носителей заряда в фотоактивных слоях, следствием чего является:

– снижение внешнего квантового выхода (ВКВ) фотоответа и, соответственно, фототока СЭ (в случае МП СЭ – фототоков его субэлементов);

– увеличение плотностей темновых токов р-п переходов, что ведет к уменьшению напряжения и фактора заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) СЭ.

Традиционные подходы к анализу радиационной стойкости СЭ включают проведение ускоренных радиационных испытаний и анализ спектральных и вольт-амперных характеристик приборов после облучения. Однако для монокристаллической структуры МП СЭ известную сложность представляет получение ВАХ составляющих его субэлементов, для чего применяют косвенные методы [1]. Эта задача является важной, поскольку каждый субэлемент может демонстрировать разную степень деградации (из-за отличий в конструкции полупроводниковых структур, составе, толщине и степени легирования слоев). Для адекватного прогнозирования параметров МП СЭ в условиях космоса необходимо не только отслеживать повреждения монокристаллической структуры в целом, но и учитывать реакцию отдельных субэлементов на воздействие радиации.

Одним из способов получения информации индивидуально о каждом р-п переходе (независимо от других субэлементов) является метод электролюминесцентной диагностики [2], основанный на принципе обратимости фотоэлектрического преобразования [3] и связи ВКВ фотоответа р-п перехода с его спектральной зависимостью электролюминесценции. Соответствующий метод был ранее успешно применен авторами для анализа характеристик МП СЭ, облученных нейтронами [4]. В настоящей работе представлены результаты исследования GaInP/GaAs/Ge СЭ при облучении их 4.5 МэВ электронами с флюенсами от 4×10^{12} до 4×10^{14} е/см² и 10 МэВ протонами с флюенсами от 5×10^{10} до 5×10^{12} р/см².

На основании полученных результатов электролюминесцентных измерений с использованием метода наименьших квадратов были рассчитаны плотности темновых токов (диффузионного и рекомбинационного) р-п переходов в GaInP и GaAs субэлементах. Используя их, определены зависимости времен жизни неравновесных носителей заряда от флюенсов электронов и протонов, вычислены коэффициенты повреждения для рассмотренных материалов и частиц. Результаты сопоставлены с данными, полученными из непосредственного анализа спектральных зависимостей ВКВ фотоответа, а также с литературными данными, установлено хорошее согласование с ними. Продemonстрирована эффективность использования плотности рекомбинационного тока р-п перехода, измеренной с помощью электролюминесцентного метода, для нахождения времен жизни неравновесных носителей заряда при радиационных испытаниях приборов.

Список литературы

1. J. Holovsky, M. Bonnet-Eymard, M. Boccard, M. Despeisse, C. Ballif, "Variable light biasing method to measure component I–V characteristics of multi-junction solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 103, p. 128-133 (2012). DOI: 10.1016/j.solmat.2012.04.014
2. T. Kirchartz, U. Rau, M. Hermle, A. W. Bett, A. Helbig, and J. H. Werner, «Internal voltages in GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells determined by electroluminescence measurements», *Appl. Phys. Lett.* Vol.92, p. 123502 (2008). DOI: 10.1063/1.2903101.

3. U. Rau, "Reciprocity relation between photovoltaic quantum efficiency and electroluminescent emission of solar cells", Phys.Rev.B Vol. 76, p. 085303 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevB.76.085303.
4. S.A. Levina, V.M. Emelyanov, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts, «Degradation of electrical properties of subcells in multi-junction solar cells under neutron irradiation», Appl. Phys. Lett. Vol.125 (13), p. 132105 (2025). DOI: 10.1063/5.0218485.

Установка для испытания чипов полевых транзисторов на устойчивость к лавинному пробоему при работе на индуктивную нагрузку

Михайлов Е. М.¹, Люблинский А.Г.¹, Богданов А.А.¹, Тубольцев Ю.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mikhaylovevgeniyftf@gmail.com

Мощные полевые транзисторы широко используются во многих областях силовой электроники, включая источники питания и преобразователи, инверторы, электронные системы управления электродвигателями, переключающие устройства и коммутаторы. В большинстве вышеперечисленных применений полевые транзисторы работают на индуктивную нагрузку, и при резком обрыве тока через нее на стоке полевого транзистора возникает индуктивный всплеск, который может приводить к выходу его из строя. Предельно допустимая энергия лавинного пробоя полевого транзистора является важным параметром для разработчиков устройств силовой электроники [1-4], поэтому испытание полевых транзисторов на устойчивость к лавинному пробоему при работе на индуктивную нагрузку входит в обязательный набор тестовых испытаний [5-7].

В Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе была разработана и изготовлена установка для испытания полевых транзисторов на устойчивость к лавинному пробоему при запасенной в индуктивной нагрузке энергии от 0,5 мДж до 2,5 Дж, что позволяет испытывать практически всю номенклатуру производимых дискретных полевых транзисторов. Установка предназначена для использования на производственных технологических линиях, а также линиях контроля качества и позволяет испытывать N-канальные транзисторы в однократном и частотном режимах с ручным управлением или автоматизированным управлением от персонального компьютера. Цикл испытания транзисторов состоит из четырех фаз: фазы первоначальной проверки целостности затвора и стока полевого транзистора, фазы контролируемого разгона тока в цепи сток-исток до заданной величины, фазы обрыва тока и лавинного пробоя транзистора, фазы проверки целостности затвора и стока полевого транзистора после испытания. Предложены новые схемотехнические решения, позволяющие использовать установку как для проверки корпусированных полевых транзисторов, так и чипов полевых транзисторов на еще не разрезанной полупроводниковой пластине. Четырехпроводная схема подключения позволяет устранить влияние паразитной индуктивности соединительных линий и зондов, с помощью которых обеспечивается присоединение к контактам чипа полевого транзистора.

Список литературы

1. L. Saro, K. Dierberger, R. Redl, High-voltage MOSFET behavior in soft-switching converters: analysis and reliability improvements, IEEE Xplore, 02.1998 г.
2. А. Борисов, «Устойчивость MOSFET транзистора к импульсам тока в индуктивной нагрузке», Компоненты и технологии, №2, 2005.
3. Перевод: Наджим Хамзин, Рассмотрение лавинных процессов в транзисторах серии CoolMOS, Силовая Электроника, №3, 40-46, 2006
4. Infineon AG, AN_2304_PL18_2305_004059 Application Note «Power MOSFET avalanche design guidelines», 24.07.23
5. Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, MOSFET Avalanche Ruggedness, Application Note, «MOSFET Avalanche Ruggedness», 26.07.2018
6. STMicroelectronics, AN2344 Application Note «Power MOSFET avalanche characteristics and ratings», 02.08.2006
7. Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, Power MOSFET Maximum Ratings, Application Note, «Power MOSFET Maximum Ratings», 26.07.2018

Особенности тестирования характеристик микроразмерных фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения

Покровский П. В.¹, Хвостиков В.П.¹, Малевская А.В.¹, Хвостиков О.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

e-mail: olgakhv@mail.ioffe.ru

Одним из перспективных направлений энергетики является развитие технологии передачи энергии (беспроводная или по оптическому волокну) лазерного излучения на значительные расстояния с её последующим преобразованием в электрическую энергию с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Для эффективного развития данной технологии требуются фотопреобразователи, способные работать при плотностях лазерного излучения от 100 W/cm^2 и выше [1]. Это позволило бы увеличить расстояние, на которое может передаваться энергия, и широту применений данной технологии. Одним из путей увеличения плотности мощности передаваемого излучения является создание высокоэффективных фотопреобразователей с размерами фотоприемной поверхности 30-300 мкм. Для исследования характеристик таких микроразмерных ФЭП необходима разработка прецизионных стендов, позволяющих производить измерения параметров фотопреобразователей при засветке лазерным излучением высокой плотности без влияния температурных эффектов.

С этой целью был разработан и создан стенд для измерения параметров микроразмерных фотопреобразователей. Установка позволяет исследовать характеристики не только традиционных фронтальных фотопреобразователей, в которых фотоприемная поверхность параллельна р-п-переходу [2], но и «торцевых» ФЭП, в которых фотоприемная поверхность перпендикулярна р-п-переходу [3]. Измерительный стенд позволяет записывать вольт-ампертные характеристики при плотностях мощности лазерного излучения от 100

до 10000 W/cm^2 , измерять быстродействие приборов на пробных импульсах с длительностью на полувысоте 2 нс, записывать и анализировать спектр электролюминесценции и дополнительно оценивать толщину активных слоев торцевых ФЭП. Поскольку в микро-размерных фотоэлектрических преобразователях необходима повышенная точность совмещения выходного торца оптического волокна с входным окном ФЭП, то для юстировки используются трехкоординатная система микрометрических подвижек.

В состав стенда входит два источника лазерного излучения с длинами волн 850 нм и 1550 нм, которые сопряжены с оптическими волокнами 50/125 мкм или 200/220 мкм с числовой апертурой 0.22. Драйвер лазерного диода обеспечивает режим генерации прямоугольных импульсов излучения длительностью 300 нс и частотой следования 1 кГц. Такой режим предотвращает нагрев ФЭП, так как средняя мощность лазерного излучения мала из-за большой скважности импульсов, а энергии одиночного импульса не достаточно для существенного разогрева области р-п перехода. Длительность импульса определяется временем жизни неосновных носителей в полупроводниковом материале и переходными процессами в цепи измерения электрических параметров ФЭП. Для предотвращения нагрева ФЭП при прямом протекании тока, напряжение прикладывается тоже импульсно при помощи ключа, состоящего из двух полевых транзисторов, включенных встречно-последовательно. Запись значений тока и напряжения производится при помощи цифрового осциллографа.

Измеренные с помощью разработанного стенда характеристики фотоэлектрических преобразователей позволили рассчитать эффективность приборов для различных уровней засветки. Для «торцевых» ФЭП на основе AlGaAs(50 мкм)/GaAs структуры был получен КПД=50-53% при плотности лазерного излучения $1000\text{-}8000 \text{ W/cm}^2$ [3] и для фронтальных фотопреобразователей на основе GaSb 35-38% до 1600 W/cm^2 с диаметром фоточувствительной области 30 мкм и 80 мкм [2].

Тенденция разработки фотопреобразователей, работающих при сверхвысоких плотностях лазерного излучения расширяет область их применения и дополнительно снижает себестоимость приборов за счет сокращения площади полупроводникового материала. Разработанный стенд дает возможность оптимизировать технологию получения высокоэффективных мощных ФЭП на основе исследования параметров микроразмерных фотопреобразователей.

Список литературы

1. Celia Outes, Eduardo F. Fernández et. al. // IEEE Electron Device Letters, 42 (12) 1882 (2021).
2. В.П. Хвостиков, А.В. Малевская, П.В. Покровский и др. // ПЖТФ 51(4) 50 (2025).
3. Khvostikov, V. P., Panchak, A. N., Khvostikova, O. A., Pokrovskiy, P. V. // IEEE Electron Device Lett. 43(10) 1717 (2022).

Емкостные исследования солнечных элементов на основе наноструктурированного “черного” кремния с пассивирующим слоем GaP

Михайлов О. П.¹, Е.А. Вячеславова А.А., Максимова, А.В. Уваров, А.И. Баранов, А.С. Гудовских

¹СПБАУ РАН

e-mail: oleg.mikhaylov.00@gmail.com

В современном мире происходит переход на возобновляемые источники энергии, особенно активно это наблюдается с 2020 года, после которого значительно выросла стоимость электроэнергии. На сегодняшний день наибольший потенциал по производительности и экономической выгоде показывают однопереходные солнечные элементы (СЭ) на основе анизотипного гетероперехода аморфного гидрогенизированного и кристаллического кремния (a-Si:H/c-Si). Однако, эта технология практически достигла своего максимального теоретического КПД, а используемая подложка кремния именно n-типа крайне чувствительна к влиянию потока любых частиц из-за образования радиационных дефектов, образующихся при использовании даже на низких орбитах в космосе. По этой причине ученые ищут подходы по повышению выработки энергии за счет уменьшения оптических потерь, связанных с изменением угла падения солнечного излучения.

С этой целью в последнее время активно исследуются текстурированные поверхности, в частности, черный кремний (“black silicon”, b-Si). Ключевым фактором работы с данной технологией является рекомбинация на границе раздела, которая негативно влияет на эффективность. По этой причине исследование пассивации текстурированной поверхности стало ключевым для проектирования высокоэффективных гетероструктурных СЭ на основе b-Si. Для исследования свойств границы раздела одними из наиболее распространенных и эффективных являются емкостные измерения, которые помогут выявить наличие дефектов, влияющих на безызлучательную рекомбинацию.

В настоящей работе будет проведено экспериментальное исследование емкостных характеристик гетероструктурного СЭ, полученного на подложке p-Si, легированной бором, путем осаждения тонкого слоя широкозонного полупроводника n-GaP. Слой GaP должен за счет большого разрыва валентных зон ограничивать транспорт дырок, образующихся в Si, а также за счет малого разрыва зон проводимости обеспечить эффективный транспорт электронов через границу в зоне проводимости. Пленки GaP толщиной 50 нм наносились методом атомно-слоевого осаждения в течении 800 циклов при температуре 380 °C с использованием дополнительного потока силана. В исследовании будут измерены вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики. Также будут проведены измерения спектроскопии полной проводимости и нестационарной спектроскопии глубоких уровней для образцов, которые подверглись облучению электронами с энергией 1 МэВ и флюенсами 5×10^{14} и 1×10^{15} . Данные энергия и флюенсы соответствуют потоку электронов на околоземных орбитах во внутреннем радиационном поясе Ван Аллена. Полученные данные

позволят оценить влияние потока частиц на низких орбитах, на появление дефектов в приповерхностной области, на глубине р-п-перехода и в глубине р-Si.

Список литературы

[1] K. Yoshikawa et al. 2017 *Nat. Energy* 2(5) 17032

Определение дисбаланса *фотогенерированных* токов в многопереходных фотопреобразователях лазерного излучения

Минтаиров М. А.¹, В.В. Евстропов¹, С.А. Минтаиров¹, М. В. Нахимович¹, М.З. Шварц¹, Н.А. Калужный¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mamint@mail.ioffe.ru

Многопереходные фотопреобразователи лазерного излучения (МФПЛИ) являются востребованными приборами в оптоэлектронных системах благодаря возможности генерировать высокое напряжение [1–3]. Все субэлементы структуры МФПЛИ соединены последовательно, поэтому величина фототока, который может быть получен с прибора, всегда ограничивается током субэлемента с наименьшим фотогенерируемым током. С точки зрения эффективности МФПЛИ оптимальным является случай баланса *фотогенерированных* токов субэлементов [4], когда достигаются условия, в которых все субэлементы МФПЛИ генерируют одинаковый фототок. Поэтому важной задачей при разработке МФПЛИ является выбор структурных параметров субэлементов таким образом, чтобы при преобразовании лазерного излучения с требуемой длиной волны все субэлементы генерировали одинаковый фототок. Для контроля величин фототоков в многопереходных фотопреобразователях обычно используются экспериментальные методики измерения внешнего квантового выхода фототока [5,6]. Однако эти методы основываются на том, что для каждого субэлемента существует такая длина волны падающего излучения, которая поглощается только в нём. Другим словами эти методы применимы к многопереходным фотопреобразователям, субэлементы которых имеют разную ширину запрещённой зоны. Применение этих методов для структур с субэлементами, выполненными из одинаковых материалов представляет собой сложную методологическую задачу. Поэтому поиск новых методов регистрации величины дисбаланса *фотогенерированных* токов МФПЛИ является важной и актуальной задачей. Одно из решений предложено в [7], где авторы измеряют вольт-амперные характеристики, и благодаря наличию у всех субэлементов больших обратных токов утечки, регистрируют фототоки отдельных субэлементов при обратном смещении по напряжению. В итоге требование обязательного наличия обратных токов утечки существенно ограничивает применение этого метода.

В данной работе предложен новый метод, лишенный недостатков [5–7], основанный на экспериментальной регистрации величин добавочного напряжения дисбаланса [8] для режимов холостого хода ($V_{a,oc}$) и оптимальной нагрузки ($V_{a,m}$). Как было показано в [8] эти

величины постоянны и определяются коэффициентом дисбаланса фотогенерированных токов всех субэлементов. Разработанный метод применён к двух-переходному GaAs МФПЛИ, структура которого выращена методом МОС-гидридной эпитаксии. Показано, что при облучении узкополосным (лазерным) излучением добавочные напряжения дисбаланса равнялись нулю, что свидетельствует о полном балансе фотогенерированных токов субэлементов МФПЛИ в рабочем режиме. Проведен эксперимент, в котором был изменен спектральный состав падающего излучения на соответствующий солнечному спектру AM0. При этом напряжения дисбаланса заметно отличались от нуля: $V_{a,oc} \approx 60$ мВ, $V_{a,m} \approx 160$ мВ. В результате показано, что метод позволяет регистрировать факт работы многопереходной структуры при дисбалансе фотогенерированных токов, а также определять величину добавочных напряжений, характеризующих этот дисбаланс.

Список литературы

1. J. Schubert, E. Oliva, F. Dimroth, W. Guter, R. Loeckenhoff, and A. W. Bett, IEEE Trans. Electron Devices 56, 170 (2009)
2. S. Fafard, F. Proulx, M. C. A. York, L. S. Richard, P. O. Provost, R. Ares, V. Aimez, and D. P. Masson, Appl. Phys. Lett. 109, 131107 (2016)
3. Y. M. Zhao, Y. R. Sun, Y. He, S. Z. Yu, and J. R. Dong, Sci. Rep. 6, 38044 (2016)
4. L. Wagner, S. K. Reichmuth, S. P. Philipps, E. Oliva, A. W. Bett, and H. Helmers, Prog. Photovoltaics 29, 172 (2021)
5. M. Meusel, C. Baur, G. Letay, A. W. Bett, W. Warta, and E. Fernandez, Prog. Photovoltaics 11, 499 (2003)
6. J. Garcia, H. Socolovsky, and J. Pla, Meas. Sci. Technol. 28, 055203 (2017)
7. A.-C. Wang, Y.-R. Sun, S.-Z. Yu, J.-J. Yin, W. Zhang, J.-S. Wang, Q. X. Fu, J.-R. Dong, Appl. Phys. Lett. 118, 233902 (2021)
8. М.А. Минтаиров, В.В. Евсеров, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный, Письма в ЖТФ, 49 (23), 38-41, (2023)

Исследование влияния метода центрифугирования и состава суспензии PEDOT:PSS на характеристики солнечных элементов b-Si/PEDOT:PSS

Поздеев В. А.¹, Вячеславова Е. А.¹, Михайлов О.П.¹, Максимова А.А.¹, Гудовских А.С.¹

¹СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова

e-mail: pozdeev99va@gmail.com

Полиэлектролиты, особенно PEDOT:PSS, стали популярным выбором не только в качестве прозрачных анодов, но и как дырочно-селективные контакты для n-Si. В данной статье исследуется влияние содержания низкокипящих и высококипящих растворителей на характеристики солнечного элемента на основе гетероперехода PEDOT:PSS/n-Si. Максимальная эффективность такой планарной структуры составляет 14,5% [2], результаты моделирования показывают, что теоретически эффективность солнечных элементов PEDOT:PSS /n-Si может превысить 20% [3].

Для снижения потерь на отражение может быть использован кремний с текстурированной поверхностью. Одним из наиболее эффективных методов текстурирования кремния является формирование на его поверхности нановолокон – так называемого «черного кремния». Чёрный кремний (b-Si), получаемый криогенным травлением, сочетает в себе антиотражающие свойства в широком диапазоне длин волн (400 нм – 1150 нм) и оптическое поглощение для фотонов с энергиями, близкими к краю поглощения кремния [1].

Некоторые высококипящие органические растворители, такие как диметилсульфоксид (ДМСО), изменяют конфигурацию PEDOT:PSS, что приводит к увеличению электропроводности. Добавление низкокипящих растворителей и неионогенных ПАВ снижает поверхностное натяжение раствора [4], что приводит к более равномерному нанесению полимерного покрытия. Вероятно, что в отличие от неионогенных ПАВ, низкокипящие растворители могут снижать поверхностное натяжение раствора без ухудшения электрических свойств слоя и солнечного элемента в целом.

В работе использовался кремний электронного типа проводимости, легированный фосфором (4,5 Ом·см). Криогенное травление проводилось в газовой среде (5 мТорр) гексафторида серы (45 sccm), кислорода (15 sccm) и аргона (5 sccm) при температуре -150 °C и мощности 1000 Вт в течение 720 секунд. Для формирования тонких слоев электропроводящего полимера PEDOT:PSS использовали 3,4%-й водный раствор (Sigma Aldrich, соотношение PEDOT:PSS 1:2,5. Омический контакт к *n*-Si подложке формировался путем осаждения тонкого слоя (n)a-Si:H с последующим термическим напылением серебра в установке BOC Edwards Auto500. Измерения вольтамперных характеристик проводились с использованием солнечного имитатора Abet Technologies (AM1.5G, 100 мВт/см²) и электрометра Keithley 2400 через апертуру 4 на 4 мм. Спектры внешней квантовой эффективности (EQE) были получены с использованием монохроматора Solar Laser M266 и встроенного усилителя Stanford Research SR830.

В результате работы получены зависимости характеристик солнечных элементов PEDOT:PSS/*n*-Si от состава раствора PEDOT:PSS. Проведена отработка процесса центрифугирования PEDOT:PSS на черном кремнии. Центрифугирование осуществлялось с вариацией скорости вращения, температуры запекания, времени запекания, времени ожидания после нанесения PEDOT:PSS и центрифугированием, а также времени ожидания после удаления естественного окисла и нанесением PEDOT:PSS: 10 мин, 30 мин, 1 час, 1.5 часа.

Список литературы

1. M. Otto et al., *Advanced Optical Materials* 3 147 (2014).
2. C. Zhang et al., *International Journal of Photoenergy* 2017 20171 (2017).
3. T.-G. Chen et al., *Applied Physics Letters* 101 (2012).
4. K. Reuter et al., *Handbook of Thiophene-Based Materials* 549 (2009).

Исследование теплоотведения от второго контура ядерной энергетической установки в гранулированную среду

Беклемишева А. В.¹, Александров П.А.¹

¹НИИ Курчатовский институт

e-mail: annabekl@ya.ru

Разрабатывается система для отведения излишек тепла от ядерной энергетической установки способной работать в космических условиях, а также в условиях ограниченного количества воды. Предлагается использовать гранулированную среду в качестве второго контура охлаждения реакторной установки. Известно, что даже при использовании жидкометаллического теплоносителя для охлаждения реактора требуется большой объем воды-пара. В условиях пустынь, космических реакторов вода- очень ценный ресурс. С целью экономии воды предлагается использовать песок (грунт планеты, например, Лунный) как приемник тепла. Предполагается два варианта. Первый, предполагается, что в грунте, в данном случае речь идет о реголите – лунном грунте, который в теневой области может охлаждаться до температуры порядка 170 градусов и содержит от пяти до тридцати процентов воды (льда). В таком случае при контакте с трубой теплоносителя она будет испаряться, проходить через слой реголита, повышая способность к теплообмену даже в случае низкой теплопроводности материала. Второй случай, предполагает отсутствие в почве, например, песке в пустыне примесей воды, тогда песок искусственно насыщается водой. В обоих случаях вода экономится, потому как её можно конденсировать, таким образом обеспечивая замкнутый цикл по воде. Предлагаются три метода охлаждения: вращение гранулированной смеси вокруг трубы теплоносителя, флюидизация в воздушном потоке, и система тонких трубок с теплоносителем в потоке пара и частиц.

Физика квантовых структур

Моделирование трёхкубитного кода повторений в цепочке сверхпроводниковых кубитов с соединительными элементами

Березкин Н. Г.^{1'2'3}, Симаков И. А.^{1'2'3}, Мажорин Г. С.^{1'2'3}

¹МИСИС

²Российский квантовый центр

³МФТИ

e-mail: berezkin.ng@phystech.edu

Алгоритмы, исправляющие квантовые ошибки, необходимы для реализации помехоустойчивых масштабируемых квантовых вычислений. Наиболее перспективной физической платформой квантовых вычислений являются сверхпроводниковые кубиты на основе джозефсоновских контактов. В теоретических исследованиях, посвященных тестированию кодов коррекции ошибок, обычно используется физическая модель ошибок, включающая каналы релаксации и дефазировки [1]. Однако для исследования эффективности кодов коррекции ошибок в сверхпроводниковых квантовых схемах необходимо учитывать ошибки, связанные с механизмом реализации многокубитных вентилей на сверхпроводниковых кубитах.

Перспективным с точки зрения масштабирования способом реализации перестраиваемой связи между сверхпроводниковыми кубитами является использование дополнительного кубита – соединительного кубита между вычислительными кубитами. Одним из способов выполнения двухкубитных операций в такой схеме является микроволновое возбуждение соединительного элемента [2, 3]. Из-за сильного взаимодействия соединительного кубита и вычислительных кубитов возникает дисперсионный сдвиг первого возбуждённого состояния соединительного кубита, зависящий от состояния двух соседних вычислительных кубитов. Таким образом, отстройка частоты управляющего микроволнового сигнала от частоты перехода соединительного кубита зависит от вычислительных состояний, что приводит к набегу различных фаз в этих состояниях.

Одним из требований, предъявляемых к подаваемому на соединительный элемент микроволновому импульсу, является то, что по завершении действия импульса соединительный элемент должен вернуться в основное состояние. В действительности в возбуждённом состоянии соединительного кубита может остаться некоторая малая населённость, в первую очередь, из-за несовершенства калибровки двухкубитного вентиля. Поэтому при моделировании работы кода коррекции ошибок необходимо учитывать населённость

соединительного элемента, которая приводит к ошибке в двухкубитных гейтах и препятствует выполнению однокубитных операций.

В работе выполнена симуляция работы трёхкубитного кода повторений в сверхпроводниковой пятикубитной цепочке с соединительными элементами. В трёхкубитном коде повторений логическое состояние кодируется с помощью трёх информационных кубитов, а измерение синдромов ошибок осуществляется с помощью двух вспомогательных кубитов путём выполнения последовательности из четырёх операций CNOT и измерения состояний вспомогательных кубитов в одном цикле коррекции [4]. Если p – вероятность независимой физической ошибки за период одного цикла, то после выполнения кода повторений и исправления ошибок вероятность логической ошибки при малых p в ведущем порядке пропорциональна p^2 – в этом состоит выигрыш, который обеспечивает код повторений. Для декодирования результатов измерения синдромов ошибок использовался алгоритм MWPM (minimum weight-perfect matching) [5]. При расчётах предполагалось, что в качестве вычислительных кубитов используются кубиты-флаксоны, а в качестве соединительных кубитов – кубиты-трансоны. Характерные параметры этих кубитов были заложены в модель ошибок. Отдельно были выполнены симуляции работы модификаций кода повторений, исправляющих X и Z-ошибки. В каждом вычислительном эксперименте были получены квадратичные зависимости вероятности логической ошибки от вероятности физической ошибки. Таким образом, доказана работоспособность кода повторений в рассмотренной модели ошибок, учитывающей населённости соединительных элементов.

Список литературы

1. T. E. O'Brien, B. Tarasinski, and L. DiCarlo. *Density-matrix simulation of small surface codes under current and projected experimental noise*. npj Quantum Information, 3(1), 2017.
2. I. A. Simakov, G. S. Mazhorin, I. N. Moskalenko, N. N. Abramov, A. A. Grigorev, D. O. Moskalev, A. A. Pishchimova, N. S. Smirnov, E. V. Zikiy, I. A. Rodionov, and I. S. Besedin, *Coupler microwave-activated controlled-phase gate on fluxonium qubits*, PRX Quantum 4, 040321, 2023
3. L. Ding, M. Hays, Y. Sung, B. Kannan, J. An, A. Di Paolo, A. H. Karamlou, T. M. Hazard, K. Azar, D. K. Kim, B. M. Niedzielski, A. Melville, M. E. Schwartz, J. L. Yoder, T. P. Orlando, S. Gustavsson, J. A. Grover, K. Serniak, and W. D. Oliver, *High-fidelity, frequency-flexible two-qubit fluxonium gates with a transmon coupler*, Phys. Rev. X 13, 031035, 2023
4. Devitt, S. J., Munro, W. J., & Nemoto, K. *Quantum error correction for beginners*. Reports on Progress in Physics, 76(7), 2013
5. A. G. Fowler, A. C. Whiteside, and L. C. L. Hollenberg, *Towards practical classical processing for the surface code*, Phys. Rev. Lett. 108, 180501, 2012

Modern statistical approach to quantum systems with dissipation

Zloshchastiev K.¹

¹Durban University of Technology, Durban 4000, South Africa

e-mail: k.g.zloshchastiev@gmail.com

In the conventional quantum mechanics of conserved systems, Hamiltonian is assumed to be a Hermitian operator. However, when it comes to open quantum systems, a strict Hermiticity requirement is no longer necessary. In fact, it can be substantially relaxed: the non-Hermitian part in a Hamiltonian is allowed, in order to account for effects of dissipative environment, whereas its Hermitian part would be describing subsystem's energy. Within the framework of the quantum-statistical approach based on reduced density operators, utilizing both non-Hermitian Hamiltonian and Lindblad's jump operators, we derive various generalizations of the von Neumann equation for the reduced density operator, also known as the NH-Lindblad (a.k.a. NH-GKSL) hybrid master equation framework. In a special case, if one is restricted to the evolution of pure states only then one can derive quantum-mechanical equations of the Schrodinger type. In general, these equations are nonlinear with respect to wavefunction and nonlocal, which increases their capacity of describing complex quantum phenomena in presence of dissipation and noise. Among other features, they can describe not only systems which remain in the stationary eigenstates of the Hamiltonian as time passes, but also those which evolve from those eigenstates. This approach is arguably the most general quantum-statistical method based on reduced density matrices to date.

If time allows, we apply the method to a three-level atom interacting with two optical and one microwave fields in the adiabatic approximation resulting in a simplified description in the terms of a two-level system. We assume this two-level system to be affected by two types of environment, described by some ad hoc non-Hermitian Hamiltonian and GKSL's models. We compare the three types of dissipative evolution which can occur: driven by equations for a normalized density matrix, a non-normalized density matrix, and a normalized state vector. Using the latter type, we derive an effective Hamiltonian, which encodes information about not only the Hamiltonian part of an original master equation but also its non-Hamiltonian (Liouvillian) part. The Hamiltonian turns out to be dependent on the wavefunction itself: the effects of above-mentioned environments induce, respectively, cubic and quintic nonlinear terms with respect to wavefunction's magnitude.

References

1. K. G. Zloshchastiev. *Universe* 2024. https://www.researchgate.net/publication/377373144_Generalization_of_the_Schrodinger_Equation_for_Open_Systems_Based_on_the_Quantum-Statistical_Approach
2. K.G. Zloshchastiev. *J. Mod. Opt.* 2025 https://www.researchgate.net/publication/388880172_Comparison_of_density_matrix_and_state_vector_approaches_to_dissipative_evolution_of_hyperfine_levels_coupled_to_optical_and_radio-frequency_fields_in_the_two-level_approximation

3. K. G. Zloshchastiev et al. *Project: Density Operator Approach for non-Hermitian Hamiltonians*. (ResearchGate, 2016–2025). https://www.researchgate.net/publication/369022872_PROJECT_Density_Operator_Approach_for_non-Hermitian_Hamiltonians

Исследование температурной зависимости вклада экситонов и свободных носителей в люминесценцию гетероструктуры CdTe/CdMgTe

Философов Н. Г.¹, В.Ф. Агекян¹, С.Ю. Вербин¹, А.Ю. Серов¹, И. В. Штром¹, G.Karczewski²

¹Saint Petersburg State University, St.-Petersburg, 194034, Russia

²Institute of Physics PAN, Warsaw, PL-02-668 Poland

e-mail: n.filosofov@spbu.ru

В спектрах люминесценции объемных полупроводников и полупроводниковых гетероструктур при низких температурах и невысоких уровнях оптического возбуждения проявляются лишь переходы, связанные с нижайшими электронными уровнями. Информацию об энергиях высоко лежащих уровней можно получить из спектров поглощения, отражения, а также из спектров возбуждения люминесценции (СВЛ), которые иногда называют спектрами псевдопоглощения (pseudoabsorption). При изучении гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) СВЛ, как правило, регистрируются в подбарьерной области спектра, где расположены дискретные возбужденные уровни КЯ [1]. Представляет интерес исследование СВЛ КЯ, а также барьерного слоя при надбарьерном возбуждении, это дает информацию о роли экситонов и свободных носителей в процессе релаксации возбуждения в зависимости от строения гетероструктуры и температуры.

Исследованная гетероструктура CdTe/Cd_{0.6}Mg_{0.4}Te выращена методом МПЭ, она содержит одну КЯ толщиной 10 nm, СВЛ исследовались в области от 2.3 до 3.0 eV в интервале температур 5–100 K.

СВЛ барьерного слоя

Барьерный слой является твердым раствором (ТР), так что при низких температурах низкоэнергетическое крыло его люминесценции определяется экситонами, связанными на мелких примесях и экситонами, локализованными на случайных потенциалах ТР.

Если СВЛ регистрируется в низкоэнергетической области полосы люминесценции барьера, максимум СВЛ при $T = 5$ K находится около 2.6 eV, что на 0.25 eV выше уровня энергии свободного экситона (СЭ) барьера, определяемого по спектру отражения. Это свидетельствует о том, что основным механизмом образования экситонов, связанных на мелких примесях, является не захват СЭ, а последовательный захват носителей разного знака. Максимум в СВЛ образуется вследствие того, что эффективность вклада носителей уменьшается с увеличением их энергии, а носители, рождающиеся вблизи экстремумов зон, легко связываются в экситоны. Форма СВЛ резко изменяется в интервале 5–30 K,

максимум спектра при $T = 30$ К уже совпадает с уровнем СЭ. Эта трансформация СВЛ позволяет проследить за тепловым распадом связанных экситонов.

Центр полосы люминесценции барьерного слоя при низких температурах соответствует экситонам, локализованным на случайных потенциалах ТР, при повышении температуры происходит их делокализация. Максимум СВЛ при измерении сигнала в центре полосы совпадает с уровнем СЭ барьерного слоя во всем интервале температур 5–100 К. В отличие от предыдущего случая вклад свободных носителей незначителен, и он относительно уменьшается по мере повышения температуры образца. Можно сделать вывод, что локализованные состояния, характерные для ТР, образуются через релаксацию СЭ.

СВЛ квантовой ямы

В СВЛ КЯ при $T = 5$ К доминирует вклад свободных носителей, максимум спектра смещен относительно уровня СЭ барьерного слоя на 0.25 eV. В области температур 5–40 К происходит плавное ослабление СВЛ, причем спектры, нормированные на максимум, не отличаются заметно друг от друга. При дальнейшем повышении температуры максимум СВЛ смещается в низкоэнергетическую сторону, при $T = 70$ К он совпадает с уровнем СЭ барьера. Вклад экситонов в перенос возбуждения в КЯ при низких температурах ограничен локализацией экситонов в барьерном слое, в этом случае КЯ преимущественно заселяется свободными носителями. Повышение температуры переводит экситоны барьерного слоя в свободное состояние, вследствие чего вклад СЭ в заселение КЯ становится преобладающим.

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ № 129360164

Список литературы

1. Н.Г. Философов, Г.В. Будкин, В.Ф. Агекян, G. Karczewski, А.Ю. Серов, С.Ю. Вербин, И.В. Штром, А.Н. Резницкий, ФТП 2023, том 57, с. 555–558.

Структура уровней и оптические переходы в сферических нанокристаллах ядро/оболочка

Кокурин И. А.¹, В.Д. Макеев

¹МГУ им. Н. П. Огарёва

e-mail: kokurinia@mail.ru

Рассмотрена структура электронных и дырочных уровней в полупроводниковых нанокристаллах ядро/оболочка сферической формы, имеющих кристаллическую решетку цинковой обманки. Для описания уровней, произошедших от зоны проводимости, использовано приближение изотропной эффективной массы. Состояния в валентной зоне найдены с использованием гамильтониана Латтинжера [1].

Применен метод, в котором, в качестве базисного набора используются собственные функции носителей в однородном сферическом нанокристалле. Отличие структуры

ядро/оболочка учитывается добавлением в гамильтониан слагаемого учитывающего скачек потенциала при переходе через гетерограницу. Также учтен вклад в кинетическую энергию, связанный координатной зависимостью зонных параметров (эффективной массы или параметров Латтинжера). Различные выражения для последнего вклада отвечают различным граничным условиям при стандартной процедуре «сшивки» огибающих функций на гетерогранице. Собственные значения и соответствующие волновые функции находятся при помощи численной диагонализации полученного таким образом матричного гамильтониана. Размер матрицы при этом задается исходя из необходимой точности нахождения уровней энергии. Подобный подход ранее применялся при участии одного из авторов при исследовании подзонного спектра многооболочечных структур с цилиндрической симметрией [2].

Данный метод имеет ряд преимуществ перед обычно используемой стандартной процедурой «сшивки» огибающей волновой функции на гетероинтерфейсе. Особенно хорошо это заметно при использовании многозонных гамильтонианов и для многооболочечных структур (когда имеется более одной гетерограницы).

Изучена структура уровней и волновые функции для электронных и дырочных уровней в нанокристаллах ядро/оболочка, в которых в качестве «оболочки» выступает, как широкозонный, так и узкозонный материал. Для состояний валентной зоны также рассчитаны и визуализированы спиновые состояния соответствующих уровней (подмешивание легкой и тяжелой дырки). Численные расчеты проведены при использовании зонных параметров гетеропар CdSe/CdS и GaAs/AlGaAs. Рассчитаны вероятности внутризонных оптических переходов для описанных структур. Напомним, что в нелегированных структурах такие переходы возможны, например, при дополнительной межзонной засветке [3]. Найдены соответствующие силы осциллятора. Проверено выполнение соответствующих правил сумм.

Список литературы

- [1] J.M. Luttinger, Phys. Rev. **102**, 1030 (1956).
- [2] A.O. Rudakov and I.A. Kokurin, Semiconductors **53**, 2137 (2019).
- [3] M. Olszaker, E. Ehrenfreund, E. Cohen, J. Bajaj, G. J. Sullivan, Phys. Rev. Lett. **62**, 2997 (1989).

Гигантское линейное магнитосопротивление в структурах с множественными квантовыми ямами на основе CdHgTe

Васильев Ю. Б.¹, Михайлов Н.Н.²

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

²ИФП им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: yu.vasilyev@mail.ioffe.ru

Дираковские фермионы спустя два десятилетия после их экспериментального наблюдения в графене [1] по-прежнему являются предметом интенсивных исследований. Помимо графена наиболее подробно изучены структуры на основе квантовых ям CdHgTe, принадлежащих семейству топологических изоляторов группы Z_2 . Ожидается также, что созданные на основе этой системы сверхрешетки могут сильно отличаться по своим свойствам от одиночных квантовых ям, из которых состоят их слои. Было предсказано, что в таких слоистых структурах в результате взаимодействия между топологическими поверхностными модами могут возникать различные фазы, включая топологический изолятор, полуметалл Дирака и полуметалл Вейля. В зависимости от условий взаимодействия поверхностных мод ожидается проявление различных интересных физических эффектов. В данной работе впервые изучается магнитосопротивление в многослойных структурах HgTe/CdHgTe, содержащих двумерную электронно-дырочную систему. Мы сообщаем о наблюдении чрезвычайно большого ненасыщающего линейного магнитосопротивления (MR) в таких слоистых структурах. Рассматриваются различные возможные объяснения экспериментальных результатов.

Образцы представляют собой холловские мостики, изготовленные из многослойных структур HgTe/CdHgTe, содержащие ямы с инвертированной зонной структурой. Образцы выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В качестве подложки использовались пластины GaAs толщиной 400 мкм. Нами исследовались две однотипные многослойные структуры. Структура А содержала 20 квантовых ям HgTe толщиной 16 нм, структура В - 30 квантовых ям толщиной 16 нм, разделенных барьерами CdHgTe. Измерения сопротивления проводились четырехзондовым методом. На образец подавался переменный ток. Сигнал снимался через синхронный усилитель. Используемая частота переменного тока была равна 17.7 Гц. Измерения продольной и холловской компонент тензора сопротивления проводились в магнитных полях вплоть до 12 Тл в диапазоне температур от 1.5 до 300 К. При низких температурах наблюдались осцилляции продольного сопротивления и проявление квантового эффекта Холла, что свидетельствует о достаточно высоком качестве образцов.

Были измерены зависимости сопротивления образцов от величины магнитного поля для разных значений температур. Во всем интервале магнитных полей никакого насыщения магнитосопротивления не наблюдалось, а в магнитных полях свыше 1 Тл MR линейно увеличивалось при увеличении магнитного поля. Кроме того, относительное магнитосопротивление $\Delta R = [r_{xx}(B) - r_{xx}(0)] / r_{xx}(0)$ было чрезвычайно большим и превышало 100%.

Ранее наблюдаемое линейное MR в большинстве случаев объяснялось сложными траекториями тока, которые связаны либо с пространственной неоднородностью, либо влиянием краев образцов. Например, для бесщелевого трехмерного кристалла HgCdTe [2] появления линейного магнитосопротивления обусловлено перколяцией в неупорядоченной системе, образованной флуктуациями состава $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Возможно, что для многослойных структур HgTe/CdHgTe, содержащих двумерную электронно-дырочную систему [3], неоднородность заряда, который локализуется в хаотически расположенных электронно-дырочных лужах, является причиной наблюдаемых особенностей магнитосопротивления. Другой подход к объяснению экспериментальных результатов основан на механизме Абрикосова, который предсказывает линейное MR в бесщелевых полупроводниках с линейной дисперсией энергии [4].

Список литературы

- [1] Novoselov K. S. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science* 306, № 5696, 666 (2004).
- [2] Vasileva, G. Y., et al. Giant magnetoresistance in gapless HgCdTe with Kane fermions. *Europhys. Lett.* 128(4), 47001 (2020).
- [3] Васильева Г.Ю. и др. Магнетотранспортная спектроскопия интерфейсных, квантовых и гибридных состояний в структурах с многочисленными слоями HgTe толщиной 16 нм. *ФТП* 53, вып. 7, 947 (2019).
- [4] Abrikosov A. A., Quantum linear magnetoresistance. *Europhys. Lett.* 49, 789–793 (2000).

Особенности спиновой динамики ионов марганца в двойной полумагнитной квантовой яме

Кузьменко М. И.¹, Афанасьев М.М.¹, Грибакин Б.Ф.², Кавокин К.В.², Кусраев Ю.Г.¹, Калевич В.К.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: max_kuzmenko1999@mail.ru

Направление намагниченности ионов марганца, возникшей в магнитном поле в полумагнитной полупроводниковой квантовой яме (КЯ), можно изменить коротким (~1 пс) импульсом циркулярно-поляризованного света, направленного перпендикулярно магнитному полю. Отклонение намагниченности возникает вследствие ее поворота в эффективном магнитном поле, созданном поляризованными по спине фотовозбужденными дырками за счет их p - d обменного взаимодействия с ионами марганца [1]. После окончания действия светового импульса отклоненная намагниченность марганца прецессирует вокруг внешнего магнитного поля с ларморовой частотой, что приводит к осцилляциям магнитооптического эффекта Керра, измеряемого в режиме накачка-зондирование [2, 3]. Такой эффект мы наблюдаем при резонансном возбуждении тяжелого экситона в

относительно узкой (шириной 8 нм) полумагнитной квантовой яме $\text{Cd}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{Te}$, отделенной от более широкой (20 нм) немагнитной ямы CdTe туннельно прозрачным барьером CdMgTe толщиной 1.6 нм [4, 5]. Однако величина эффекта оказалась на порядок меньше, чем можно ожидать, исходя из мощности и длительности импульса накачки. Мы считаем, что причиной малости эффекта является быстрое, со временем меньше 0.1 пс [6], туннелирование фотовозбужденных дырок из узкой ямы в широкую, которое существенно снижает их концентрацию и, тем самым, угол отклонения намагниченности ионов марганца.

В данной работе мы получили выражение для спектральной зависимости амплитуды θ_0 осцилляций керровского угла, вызванных прецессией намагниченности ионов марганца, в области экситонного поглощения в полумагнитной яме. При его выводе учтен резонансный характер поглощения световой энергии в области экситона в КЯ [7], который приводит к спектральной зависимости концентрации фотовозбужденных дырок, а в качестве подгоночного параметра использован угол отклонения ζ намагниченности ионов марганца от направления внешнего магнитного поля на частоте экситонного резонанса. Полученное выражение мы использовали для аппроксимации экспериментально измеренной зависимости θ_0 от энергии квантов накачки. Наилучшее соответствие расчетной кривой с экспериментальной зависимостью получено при $\zeta_{\text{exp}} \approx 5 \times 10^{-4}$ рад. Отметим, что это значение хорошо согласуется с величиной угла $\zeta_{\text{theory}} \approx 6 \times 10^{-4}$ рад, оцененной с учетом величин радиационного и нерадиационного уширений экситонного состояния и времени жизни фотовозбужденных дырок в полумагнитной яме [6], константы обменного взаимодействия дырок с ионами марганца [3], энергии и длительности импульса накачки и площади пятна накачки.

Таким образом, полученное нами выражение для амплитуды осцилляций эффекта Керра в полумагнитной двойной КЯ, учитывающее быстрое туннелирование фотовозбужденных носителей в широкую яму и спектральную зависимость коэффициента поглощения в области экситона, качественно верно описывает эксперимент.

Авторы благодарны G. Karczewski за предоставление структуры для исследования.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 23-12-00205.

Список литературы

1. J. Stühler *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 2567 (1995).
2. S.A. Crooker *et al.*, Phys. Rev. B **56**, 7574 (1997).
3. Introduction to the physics of diluted magnetic semiconductors, eds. J. Kossut, J.A. Gaj, Springer, 2010.
4. E. Kirstein *et al.*, Phys. Rev. B **101**, 035301 (2020).
5. М.М. Дегоев и др., ФТТ **65** (1), 83 (2023).
6. Г.Р. Дейсадзе и др., ФТП **58**, 561 (2024).
7. E.L. Ivchenko, Optical spectroscopy of semiconductor nanostructures, Springer, 2007.

Двуслойные структуры на основе графена и гексагонального нитрида бора: электронная структура и фононный спектр

Михайленко Е. К.^{1,2}, Дунаевский С.М.^{1,2}

¹НИЦ КИ «ПИАФ», ²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: mikhailenko_ek@npni.nrcki.ru

В настоящей работе численными методами (Quantum Espresso) анализируются электронные свойства и фононный спектр структур, составленных из двух и более монослоёв графена (Gr) и гексагонального нитрида бора (h-BN). Соединение таких монослоёв возможно как напрямую, так и со сдвигами решёток относительно друг друга, а также с поворотами. Последний случай представляет собой особый интерес в диапазоне углов поворота между 1 и 2 градусами (т.н. "магический угол"), в этом диапазоне экспериментально наблюдалась высокотемпературная проводимость в случае двуслойного графена.

Математическая задача численного расчёта приводит к необходимости выделения расширенной ячейки, обладающей некоторой макропериодичностью, и обычно содержащей от нескольких десятков (в случае углов 30, 60, 120 градусов) атомов до нескольких сотен и тысяч (в случае малых углов). На первый план при этом выходят методы расчёта, менее опирающиеся на прямые вычисления в решётках.

В данной работе мы попытались проанализировать электронные и фононные свойства самых простых структур, получающихся из монослоёв Gr и h-BN, получающихся из сдвигов, поворотов, а также их комбинаций. Для случаев, проверяемых данными современной литературы, характер изменения зонной структуры совпадает с известными данными. Все расчёты выполнены с оптимизацией геометрии рассматриваемых структур.

Данная работа является первой ступенью к исследованию более сложных "twist"-систем, образованных большим числом слоёв и меньшим углом поворота.

Список литературы

1. Slawinska J. et al. Energy gap in graphene in hexagonal boron nitride bilayer system // PRB. 2010. V. 81. 155433
2. Syvain L. et al. Structural classification of boron nitride twisted bilayers and ab initio investigation of their stacking-dependant electronic structure // SciPost Physics. 2023. V. 14. P. 1–29.
3. Morell E.S. et al. Flat bands in slightly twisted bilayer graphene // PR. 2010. V. 82. 121407

Сравнение спиновых свойств структур с квантовыми ямами и квантовыми яма-точками (In,Ga)As/GaAs

Кузнецова Я. А.¹, Некрасов С.В.¹, Рагоза М.Д.¹, Гварамия А.Г.^{1,3}, Кусраев Ю.Г.¹, Максимов М.В.², Надточий А.М.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

²Лаборатория нанофотоники, Алферовский университет.

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

e-mail: kuznetsova225@yandex.ru

Квантовые ямы (КЯ) и квантовые точки (КТ), широко используются в реализации оптоэлектронных устройств. Структуры с КТ и КЯ имеют как ряд преимуществ, так и недостатков, которые отражаются на работе приборов. К примеру, для КЯ характерно образование постростовых дефектов в силу свободного перемещения атомов в плоскости КЯ. Для КТ же характерно более низкое оптическое усиление в силу меньшей плотности возбуждаемых состояний [1]. С целью оптимизации свойств были предложены новые квантоворазмерные структуры, названные квантовыми яма-точками (КЯТ). В системе (In,Ga)As КЯТ формируются при содержании осаждаемых атомов In относительно Ga от 30 до 50%. Структуры с КЯТ (In,Ga)As уже успели положительно проявить себя с технологической точки зрения. Из-за того, что рост КЯТ сопровождается частичной релаксацией упругой деформации, возможно выращивание большего количества слоёв с КЯТ, что повышает оптическое усиление и является существенным преимуществом в сравнении с КЯ [1]. В данной работе производится сравнение спиновых свойств структур с КЯТ и КЯ (In,Ga)As/GaAs, которые были выращены на разориентированных подложках GaAs с углом разориентации 6° относительно направления [100]. Использование разориентированной подложки способствует модуляции толщины осаждаемого слоя около атомных ступенек и переходу к островковому режиму роста.

В ходе исследования были получены спектры фотолуминесценции (ФЛ) и поляризации КЯТ и КЯ. Пик ФЛ для КЯТ приходится на длину волны 904 нм, полуширина линии составляет 20 мэВ. Для КЯ пик ФЛ расположен на длине волны 897 нм, с полушириной линии ФЛ равной 2,5 мэВ. Образцы исследовались методом оптической ориентации. Структурам с КЯТ присуща большая степень циркулярной поляризации в сравнении с КЯ. Максимум поляризации для КЯТ составляет 24,5%, в то время как степень циркулярной поляризации для КЯ составляет всего 3,5%. Была измерена зависимость степени циркулярной поляризации от мощности накачки. В длинноволновой части спектра для обеих структур степень циркулярной поляризации уменьшается с увеличением мощности, что можно объяснить заполнением основного энергетического уровня размерного квантования [2].

В ходе исследований не обнаружен эффект оптического выстраивания, который характерен для экситонных состояний [3]. Возможным объяснением может послужить трионный характер излучающих состояний. Была обнаружена встроенная линейная поляризация: в КЯТ она составляет 1,5% во всем спектральном диапазоне, в то время как для КЯ степень

линейной поляризации составляет 5%. Указанное обстоятельство свидетельствуют о том, что КЯ являются более механически напряженными структурами в сравнении с КЯТ, что подтверждает выводы работы [1].

Были проведены эксперименты с приложением магнитного поля в геометрии Фойгта, в которых наблюдалась деполяризация ФЛ (эффект Ханле). Полуширина кривой эффекта Ханле для КЯТ составляет 376 мТл, в то время как для КЯ она равна 96 мТл. Полученные данные свидетельствуют об уменьшении времени жизни спина в КЯТ в сравнении с КЯ. Не удалось наблюдать восстановления поляризации в продольном магнитном поле 400 мТл как для КЯТ, так и для КЯ. Показано, что спиновая релаксация в КЯ и КЯТ происходит в случайных эффективных магнитных полях с коротким временем корреляции. Также в КЯТ и КЯ обнаружен эффект динамической поляризации ядер (ДПЯ). ДПЯ наблюдается в случае сверхтонкого взаимодействия локализованных электронов с ядрами [4]. Зависимости оптической ориентации в магнитном поле, приложенном под 45° к среднему спину, оказываются несимметричными относительно смены знака поля.

Мы делаем вывод о том, что спиновые свойства образцов с КЯТ и КЯ (In,Ga)As/GaAs во многом схожи между собой и напоминают свойства КТ с резидентными носителями заряда.

Список литературы

1. Maximov M. V. et al. Light emitting devices based on quantum well-dots //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 3. – С. 1038.
2. Kalevich V. K. et al. Spin redistribution due to Pauli blocking in quantum dots //Physical Review B. – 2001. – Т. 64. – №. 4. – С. 045309.
3. Bir G. L., Ivchenko E. L., Pikus G. E. Alignment and orientation of hot excitons and polarized luminescence //IZVESTIYA AKADEMII NAUK SSSR SERIYA FIZI-CHESKAYA. – 1976. – Т. 40. – №. 9. – С. 1866-1871.
4. Захарченя Б. П., Майер Ф. (ред.). Оптическая ориентация. – Наука. Ленингр. отделение, 1989.

Андреевские генераторы терагерцевого излучения

Таранец К. Б.^{1,3}, Н.Т.Баграев¹, С.А. Кукушкин², Л.Е.Клячкин¹, А.М.Маляренко¹, А.В. Осипов², В.В. Романов³, Н.И. Руль^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Институт проблем машиноведения Российской академии наук

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

e-mail: constanttaranets@gmail.com

Последние несколько лет интенсивно обсуждаются способы создания и исследования Андреевских молекулярных состояний. Андреевская молекула (АМ) представляет собой связанные состояния двух джозефсоновских барьеров, обеспечивающих, в свою очередь, создание Андреевских граничных состояний за счет многократного Андреевского отражения (МАО). В таком случае, спектр АМ меняется в зависимости от объекта исследования,

сохраняя некоторые общие черты. Хотя Андреевское граничное состояние, возникающее в джозефсоновском переходе за счет МАО, обусловлено наличием слева и справа сверхпроводящей щели, тем не менее функцию барьера, аналогичную сверхпроводящей щели, может выполнять не только сверхпроводник, но и любой потенциальный барьер, существующий в исследуемой структуре. Ключевая особенность такого состояния заключается в необходимости наличия связи двух барьеров, ограничивающих области квантовой интерференции одиночных носителей вследствие МАО. Более того, подавление электрон-электронного взаимодействия, которое способствует наблюдению квантовой интерференции носителей, является исключительно важным требованием, необходимым для наблюдения спектра АМ на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) исследуемых образцов, что в настоящей работе достигается созданием оболочек АМ, состоящих из дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией.

В работе впервые представлены оптические спектры МАО трех сэндвич структур – фторида кадмия, карбида кремния и кремния с краевыми каналами, ограниченными дипольными центрами бора с отрицательной корреляционной энергией [1]. Исследование ВАХ МАО и полевых зависимостей магнитной восприимчивости показали, что в краевых каналах образуется система последовательных областей, «пиксел», с одиночными носителями, представляющие собой разные версии АМ, которые идентифицируются с помощью ИК-Фурье спектров электролюминесценции (ЭЛ). Причем, позиции пиков в спектрах взаимосвязаны с характеристиками МАО ($2\Delta/p$, где 2Δ - значение критической щели, определенное из ВАХ МАО, например, 44 meV для кремниевого наносандвича [1], и p – номер пика МАО). Наблюдаемая электролюминесценция обусловлена наличием спин-орбитального взаимодействия и генерируется вследствие перехода носителя с переворотом спина между цепочками центров с отрицательной корреляционной энергией. Спектры ЭЛ содержат расщепление Раби и гигагерцевые модуляции, обусловленные наличием микрорезонаторов, встроенных в краевые каналы. Таким образом, впервые демонстрируется экспериментальная версия Андреевского генератора многомодового терагерцевого излучения, которая не ограничивается параметрами зонной структуры материала.

Список литературы

1. Баграев Н. Т. и др. Экспресс диагностика олигонуклеотидов ДНК //Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – №. 9. – С. 1597-1602.

Исследование зарядовых состояний диэлектрических покрытий методами сканирующей зондовой микроскопии

Родин В. Д.^{1,2}, В. Ю. Аксенов¹, А. В. Анкудинов¹, А. С. Власов¹, И. В. Илькив³, А. В. Малевская¹, А. М. Минтаиров¹

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

³Академический университет им. Ж. И. Алферова

e-mail: vdrodin@stud.etu.ru

В настоящее время имеется ряд наблюдений эффектов, обусловленных наличием дробного заряда электрона. Они обнаружены и хорошо исследованы в полупроводниковых системах с двумерными электронами в сильном магнитном поле, в которых образуются связанные состояния электронов и вихрей квантов магнитного потока – энионы [1,2]. Системы с энионами представляют практический интерес для использования в топологических квантовых вычислениях. Особый интерес представляют системы, в которых энионы образуются без участия внешнего магнитного поля и которые могут рассматриваться как субэлектроны. Наличие дробного заряда в нулевом внешнем магнитном поле было обнаружено в экспериментах по проводимости и магнито- фотолюминесценции двумерных квантовых систем - квантовых проволок и точек [3,4], соответственно, а также в исследованиях примесных центров в топологических сверхпроводниках методом сканирующей туннельной микроскопии [5]. В таких системах дробный заряд может формироваться за счет спонтанной генерации вихрей квантов магнитного потока, т.е., встроенного магнитного поля, одночастичными квантовыми состояниями электронов. Условие формирования таких магнито-электронных состояний является вигнеровская локализация, которая возможна в любой системе с двумерными электронами при концентрации ниже критической, что выполняется и для большинства металлов. Целью данного исследования является подготовка модельных структур для детектирования зарядовых состояний в Au наночастицах и определения возможностей методов сканирующей зондовой микроскопии для обнаружения одноэлектронных и субэлектронных зарядовых состояний.

Для исследования создавались специальные образцы с золотыми наночастицами на подложке с диэлектрическим покрытием. Структуры представляют собой конденсатор с отверстиями в верхнем металлическом слое, в которые помещаются наночастицы различного размера. При этом к качеству диэлектрического покрытия предъявляются особые требования, ввиду необходимости обеспечения высокой чувствительности метода. Диэлектрическое покрытие должно иметь максимально плоский рельеф, а также не создавать помех, вызванных наличием заряженных центров в глубине материала.

Были рассмотрены различные диэлектрические покрытия, изготовленные методами магнетронного, плазма-активированного и термического нанесения. Обнаружено, что методы магнетронного и плазма-активированного осаждения не могут быть использованы, т.к. содержащиеся внутри диэлектрика дефекты, связанные с нестехиометричностью материала, создают заряженные центры, критически влияющие на картину распределения

потенциала на поверхности слоя. С использованием двух режимов, фазовой и амплитудной модуляции методом сканирующей Кельвин зондовой микроскопии (СКЗМ), были измерены значения потенциала поверхности ΔSP различной толщины и состава. Наилучшие результаты были достигнуты при использовании кремниевых подложек со слоем диоксида кремния, полученного методом термического оксидирования поверхности. Похожие результаты были получены при исследовании слоев MgF_2 , полученных методом термического испарения. Однако из-за разницы в коэффициентах термического расширения слоя и подложки, предельная толщина таких слоев составила 350 нм.

Проведены измерения СКЗМ потенциала структур 40 нм частички Au относительно потенциала поддерживающей ее поверхности. Обнаружено, что потенциал над частичкой в ответ на плавную развертку напряжения от -99 до +100 мВ осциллирует с приблизительно периодом 10 мВ, что по предварительной оценке соответствует изменению заряда $\Delta q \cong 1e$.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-22-20014 и гранта СПбНФ 24-22-20014.

Список литературы

1. Tsui, D. C., Stormer, H. L. & Gossard A. C., Two-Dimensional Magneto-transport in the Extreme Quantum Limit. Phys. Rev. Lett. 48, 1559-1562, (1982)
2. W. Pan, et al, Experimental studies of the fractional quantum Hall effect in the first excited Landau level, Phys. Rev. B. 77, 075307 (2008).
3. Y. S .Gul, N. Holmes, M. Myronov et al. Self-organized fractional quantization in a hole quantum wire. J. Phys. Cond. Matter. 2018, 30, 09LT01
4. M. Mintairov, D. V. Lebedev, A. S. Vlasov et al. Fractional charge states in the magneto-photoluminescence spectra of a single-electron quantum dot, Nanomaterials, 11, 493-14 (2021).
5. J-X. Yin, Z. Wu, J-H. Wang et al, Observation of a robust zero-energy bound state in iron-based superconductor Fe(Te,Se), Nat. Phys. 11, 543-546 (2015).

Оптическое детектирование квантового эффекта Холла в кремниевых наносандвич-структурах

Рулъ Н. И.^{1, 2}, Таранец К. Б.^{1, 2}, Баграев Н. Т.¹, Клячкин Л. Е.¹, Маляренко А. М.¹, Романов В. В.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ Петра Великого

e-mail: rul.nickolai@mail.ru

В работе представлены результаты сравнительного анализа экспериментально обнаруженного при температуре 77 К квантового целочисленного и дробного эффекта Холла и спектров терагерцевой электролюминесценции исследуемой низкоразмерной структуры, полученных методом ИК-Фурье спектроскопии.

Исследуемая кремниевая наносандвич-структура, полученная на поверхности монокристаллического кремния (100) n-типа, представляет собой одиночную квантовую яму р-типа, ограниченную цепочками примесных дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией. Использование свойств дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией, ограничивающих области интерференции носителей в транспортных каналах исследуемой системы, способствует подавлению электрон-электронного взаимодействия, позволяя тем самым наблюдать квантовый эффект Холла и другие макроскопические квантовые явления при высоких температурах [1].

Наряду с эффектом де Гааза – ван Альфена, наблюдаемом в осцилляциях намагниченности, и эффектом Шубникова – де Гааза в продольном сопротивлении, обычно изучаемыми совместно с исследованием квантового эффекта Холла для получения полной картины о свойствах и характеристиках транспорта носителей в изучаемом объекте, особый интерес в целях подтверждения отличительных особенностей исследуемых низкоразмерных структур представляет изучение спектров электролюминесценции.

В работе впервые продемонстрированы экспериментальные результаты, подтверждающие возможность детектирования и идентификации квантового целочисленного и дробного эффекта Холла при анализе особенностей спектров электролюминесценции кремниевой наносандвич-структуры, полученных методом ИК-Фурье спектроскопии. Показано, что особенности поведения поперечного и продольного сопротивления исследуемой структуры находятся в полном согласии со спектрами терагерцевой электролюминесценции согласно условиям квантования Ландау.

Полученные результаты свидетельствует о возникновении индуцированного терагерцевого излучения в условиях квантования Ландау в кремниевых наносандвич-структурах.

Список литературы

1. Bagraev, N.T. High-temperature quantum kinetic effect in silicon nanosandwiches / N.T. Bagraev, V. Yu. Grigoryev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, V.A. Mashkov, V.V. Romanov, N.I. Rul // *Low Temperature Physics*. – 2017. – Vol. 43. – №. 1. – P. 110-119.

Supersolid optically trapped polariton condensates

P. Kozhev¹, A. Lyubomirov¹, R. Cherbunin¹, I. Chestnov², A. Kavokin^{1,3,4}, A. Nalitov⁴

¹Spin Optics Laboratory, St. Petersburg State University, Ulyanovskaya 1, St. Petersburg 198504, Russia

²Department of Physics, ITMO University, St. Petersburg 197101, Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per.,9, Dolgoprudnyi, Moscow Region, Russia 141701

⁴Russian Quantum Center, Bolshoi Boulevard, Building 30, Skolkovo Innovation Center, Moscow Region, Russia, 121205

e-mail: pashakozhev¹@gmail.com

Supersolidity, the coexistence of long-range spatial order with superfluidity [1], has long been a subject of theoretical interest and has only recently been observed in ultracold atomic systems [2]. We report the experimental realization of a supersolid phase in driven-dissipative exciton-polariton condensates confined within annular optical traps. The transition is driven by an attractive effective interaction, mediated by a non-resonantly generated excitonic reservoir [4], and by non-equilibrium dynamics that favor condensation into high-angular-momentum states [5]

The resulting condensates exhibit spontaneous breaking of the continuous rotational symmetry, accompanied by the formation of extended spatial coherence which, according to the Landau criterion, shows a superfluid nature [6] and periodic density modulations, hallmarks, of the supersolid phase. These petal-shaped patterns, formed under nonresonant, spatially tunable, ring-shaped optical pumping [8], simultaneously exhibit crystalline ordering and spatial coherence. This is confirmed by the uniform distribution of interference fringes in interferometric measurements. Our findings are further supported by theoretical predictions and the observation of Nambu-Goldstone modes associated with spontaneous symmetry breaking.

We quantified the spatial coherence of the condensate by measuring the first-order correlation function using an interferometric setup. Interference between the reference and whole condensate emission resulted in co-directional interference fringes, indicative of the coherent superfluid state. By applying a Hilbert transform to the interference patterns, we derived an analytical function, enabling the computation of the visibility of the fringe with spatial resolution $g^{(1)}$. Our results reveal extended spatial coherence consistent with a macroscopically coherent state, thus confirming the superfluid nature of the condensate and substantiating the observed supersolid phase.

To describe the underlying physics, we employ a mean-field model (FullModel) of polariton condensate dynamics in the absence of the high-energy excitonic reservoir. The condensate is represented by a macroscopic wavefunction governed by a generalized complex Gross–Pitaevskii equation, which accounts for coherent evolution, external spatial confinement, polariton-polariton interactions, and dissipative processes specific to the driven-dissipative nature of the system. In the simplified regime, the dynamics are governed by the coupled equations:

$$i\hbar\partial_t\Psi = \left[-\frac{\hbar^2\nabla^2}{2m}(\partial_x^2 + \partial_y^2) + n\frac{\alpha + i\beta}{2} - i\hbar\frac{\Gamma}{2} + \alpha_1|\Psi|^2 \right]\Psi,$$

$$\partial_t n = P - \left(\gamma + \frac{\beta|\Psi|^2}{\hbar} \right) n.$$

To demonstrate the presence of Nambu–Goldstone modes, we analyze the elementary excitation spectrum using both numerical simulations and an analytical two-mode approximation. Linear stability analysis reveals gapless excitations, consistent with the Goldstone theorem and indicative of the spontaneous breaking of continuous symmetries in the supersolid phase.

References

1. G. V. Chester. Speculations on bose-einstein condensation and quantum crystals. *Physical Review A*, 2:256–258, 7 1970
2. Jun-Ru Li, Jeongwon Lee, Wujie Huang, Sean Burchesky, Boris Shteynas, Furkan C, Cagri Top, Alan O. Jamison, and Wolfgang Ketterle. A stripe phase with supersolid properties in spin–orbit-coupled bose–einstein condensates. *Nature*, 543:91–94, 3 2017
3. Julian Leonard, Andrea Morales, Philip Zupancic, Tilman Esslinger, and Tobias Donner. Supersolid formation in a quantum gas breaking a continuous translational symmetry. *Nature*, 543:87–90, 3 2017.
4. Estrecho, T. Gao, N. Bobrovska, M. D. Fraser, M. Steger, L. Pfeiffer, K. West, T. C. H. Liew, M. Matuszewski, D. W. Snoke, A. G. Truscott, and E. A. Ostrovskaya. Single-shot condensation of exciton polaritons and the hole burning effect. *Nature Communications*, 9:2944, 8 2018.
5. Amo, S. Pigeon, D. Sanvitto, V. G. Sala, R. Hivet, I. Carusotto, F. Pisanello, G. Lemnager, R. Houdr’e, E. Giacobino, C. Ciuti, and A. Bramati. Polariton superfluids reveal quantum hydrodynamic solitons. *Science*, 332(6034):1167–1170, 2011
6. Iacopo Carusotto and Cristiano Ciuti. Quantum fluids of light. *Reviews of Modern Physics*, 85:299–366, 2 2013.
7. S. Utsunomiya, L. Tian, G. Roumpos, C. W. Lai, N. Kumada, T. Fujisawa, M. Kuwata-Gonokami, A. L’offler, S. H’offling, A. Forchel, and Y. Yamamoto. Observation of bogoliubov excitations in exciton-polariton condensates. *Nature Physics*, 4:700–705, 2008.
8. Askitopoulos, H. Ohadi, A. V. Kavokin, Z. Hatzopoulos, P. G. Savvidis, and P. G. Lagoudakis. Polariton condensation in an optically induced two dimensional potential. *Physical Review B*, 88:041308, 7 2013.

Физика плазмы и управляемого термоядерного синтеза

О создании инверсной функции распределения электронов в тлеющем разряде с полым катодом

Кудрявцев А. А., С. Zhou, А.М. Астафьев, Е.А. Богданов, С. Yuan

Харбинский политехнический университет

e-mail: akud53@mail.ru

Практически сразу после создания первых газовых лазеров, в работе Bekefi *et al* [1] было показано, что среда с инверсной функцией распределения свободных электронов (ФРЭ) в газах с рамзауэровским минимумом сечения упругого рассеяния будет обладать абсолютной отрицательной проводимостью электронного газа и тем самым усиливать электромагнитные волны. Однако, в отличие от широко развитой к настоящему времени лазерной техники, эта практически важная задача создания инверсной ФРЭ не решена до сих пор.

Одной из основных причин сложившейся ситуации является тот факт, что поиски инверсной ФРЭ в литературе проводились на основе принудительной редукции кинетического уравнения для электронов к пространственно-однородной среде. При таком значительном упрощении уравнения Больцмана зависит лишь от одной переменной – скорости (кинетической энергии) электрона, поэтому методы его решения хорошо разработаны. Однако получить инверсию ФРЭ при таком подходе крайне затруднительно, поскольку большое сечение полезного процесса гибели медленных электронов нивелируется увеличением транспортной частоты столкновений и, определяющей дрейф электронов в полеподавлением диффузии по энергии (подробнее см специальное исследование, выполненное в работе [2])

На практике реальные лабораторные плазменные объекты всегда локализованы в ограниченном объеме и пространственно неоднородны. Поэтому при решении кинетического уравнения Больцмана следует учитывать пространственные градиенты ФРЭ и самосогласованное амбиполярное поле.

Проведенный в [3,4] анализ граничного условия вблизи нуля энергий ($w=0$) показал, что для образования инверсии ФРЭ при малых кинетических энергиях, где величина ФРЭ максимальна, должно выполняться условие:

$$E \text{grad} f_0 > 0 \quad (1)$$

Как видно из (1), в пространственно однородной среде, когда ФРЭ зависит лишь от энергии, критерий образования инверсной ФРЭ не выполняется.

Поскольку в области малых энергий величина ФРЭ максимальна, то эта часть ФРЭ вносит основной вклад в ее интегральную характеристику - плотность электронов $n_e(x)$, т.е. $n_e(x) \sim f_0(x, w=0)$. Тогда из (3) имеем следующий более простой и наглядный критерий на скалярное произведение градиентов потенциала и плотности электронов

$$E_{\text{grad}} n_e > 0 \quad (2)$$

Выполнение критериев (1,2) соответствует сильнонеравновесной плазме, когда ускоряющим электроны к аноду поле величина ФРЭ и плотность электронов не растет, а падает и наоборот.

Заметим также, что при выполнении критериев (1,2) заведомо нарушается традиционное Больцмановское распределения для электронов в плазме $n_e(x) \sim \exp(-eV/Te)$.

Таким образом, при поиске условий создания инверсных ФРЭ следует принимать во внимание пространственную неоднородность параметров плазмы исследуемых экспериментальных устройств [3,4]. В этом случае для нахождения ФРЭ следует решать полное кинетическое уравнение, зависящее как от энергии, так и от пространственных переменных.

С одной стороны, это существенно усложняет процедуру решение кинетического уравнения Больцмана. С другой стороны, это увеличивает число степеней свободы системы и приводит принципиально новым сценариям формирования EDF.

В данной работе выполнены исследования параметров плазмы и ФРЭ в тлеющем разряде с полым катодом. Показано, что в таком разряде в продольном (аксиальном) направлении электрическое поле направлено вне полости и вытягивает электроны на внешний анод. Поскольку при этом плотность плазмы падает по направлению к аноду, то тем самым выполняются условия формирования инверсной ФРЭ (1,2). Теоретические выводы подтверждены моделированием параметров плазмы и ФРЭ в гелии при давлении 1-5 Торр в тлеющем разряде с полым катодом радиусом $R = 1.25$ см, длиной $L = 2.5$ см в среде Comsol Multiphysics. В результате были определены режимы и выделены область условий с выполнением неравенства (1,2) для реализации инверсной ФРЭ. Это дает возможность выделить условия для последующих экспериментальных исследований активных сред с инверсной ФРЭ.

Список литературы

1. G. Bekefi, J. L. Hirshfield, S.C.Brown, Phys. Fluids. V. 4, 173, (1961).
2. C. Yuan, Y. Chai, E. A. Bogdanov, A. A. Kudryavtsev. IEEE TPS. V.50(6), 1695, 2022.
3. C. Yuan, J. Yao, E. A. Bogdanov, A. A. Kudryavtsev, Z. Zhou. Phys. Rev. E, V. 101(3), 031202, 2020.
4. Y. Chai, J. Yao, E. A. Bogdanov, A. A. Kudryavtsev, C. Yuan, Z. Zhou. Plasma Sources Sci. Technol., V. 30(9), 095006, 2021.

Применение магнитореологической жидкости на основе сферических частиц полученных методом жидкого анода для полировки ВТСП-подложек

Барышников Ю. С.¹, Родионов И.А.², Орлов Ф.А.¹, Трофимук А.Д.¹, Поняев С.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ²СПбПУ Петра Великого

e-mail: iulianbaryshnikov@yandex.ru

Промышленное производство высокотемпературных сверхпроводящих лент (ВТСП-лент) является одним из приоритетов технического развития России [1], а высококачественная полировка с низкой шероховатостью является одним из важных технологических этапов для их получения. Для получения ВТСП-лент требуется достичь шероховатость поверхности после полировки менее 5 nm RMS [2] или 5 nm Ra [3]. В приведенных работах требуемого значения шероховатости достигали с помощью полировки электрохимическим способом, и измерение шероховатости поверхностей на участке сканирования 5 на 5 μm показало значения шероховатости поверхности 2,3 nm Ra [2] и 3,4 nm Ra [3]. Авторами работы [2] проведен обзор исследований способов полировки и сделан вывод о предпочтительном использовании электрохимической полировки для обеспечения получения меньшей шероховатости поверхности, чем при использовании механической и химической полировок, хотя метод электрохимической полировки имеет известные минусы, касаемо утилизации кислотных электролитов и вредных паров. Также исследователями в работе [4] сообщалось о возможности полировки на установке по электрохимической полировке подложки ВТСП-лент, которая позволяет получить шероховатость поверхности таких лент менее 1 nm RMS на участке сканирования 5x5 μm . Магнитореологический метод полировки не имеет сложностей с кислотными электролитами, как в случае с электрохимической полировкой. Метод по использованию магнитореологической жидкости для полировки поверхностей широко изучен исследователями из Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси [5, 6], при этом известны результаты, где данными исследователями достигнута шероховатость поверхности нержавеющей стали в 3,9 Sa на участке сканирования 10x10 μm . Также известно, что при магнитореологической полировке нержавеющей стали достигнуты значения шероховатости у других исследователей 16 nm Ra [7], 23,8 nm Ra [8], 50 nm Ra [9]. Подробный обзор по методам применения магнитореологической полировки в различных технических приложениях приведен в [10], без упоминания возможности применения метода непосредственно для ВТСП-лент.

В данном исследовании представлены результаты магнитореологической полировки нержавеющей подложек ВТСП-лент с помощью магнитной жидкости, в состав которой входила алмазная суспензия с фракцией алмазов 1 μm и сферические частицы, полученные методом жидкого анода при плазменном распылении малоуглеродистой стали. О методе получения таких сферических частиц представлено в работе [11]. В первом случае предварительной полировкой была механическая полировка шероховатостью 3,4 nm Sa, шероховатость измерена на участке сканирования 10 на 10 μm , во втором случае,

предварительной полировкой была электролитно-плазменная полировка давшая шероховатость 24.8 nm Sa на участке сканирования 10 на 10 μm . Для первого случая после магнитореологической полировки получено значение шероховатости подложки ВТСП-ленты 1,3 nm Sa (1,9 nm RMS), на участке сканирования 10 на 10 μm . Для второго при наилучшем значении 2 nm Ra на длине профиля 8 μm . Данные шероховатости поверхностей измерены с помощью атомно-силового микроскопа Ntegra Aura кантилевером NS15 в полу-контактном режиме.

Таким образом магнитореологическая полировка, использующая сферические частицы, полученные методом жидкого анода, качественно уменьшает шероховатость и позволяет получить требуемую шероховатость подложек для ВТСП-лент. В дальнейшем планируется масштабировать результаты магнитореологической полировки на длинных участках ВТСП-лент.

Список литературы

1. И. Дорохова, Атомный эксперт. 9, 21, (2022)
2. Q. Jia, Y. Wang, H.Suo, P. Wang, Rare Metals 36(9), 635, (2017). DOI: 10.1007/s12598-017-0935-4
3. S. Hao, Y. Wang, H. Suo, Q. Jia, M. Liu, L. Ma, Rare Metals, 37(9), 795, (2018). DOI: 10.1007/s12598-018-1106-y
4. S. Lee, V. Petrykin, A. Molodyk, S. Samoilencov, A. Kaul, A. Vavilov, V. Vysotsky, S. Fetisov, Supercond. Sci. Technol. 27(044022), (2014). DOI: 10.1088/0953-2048/27/4/044022
5. А. Худолей, Наука и инновации, 11(189), 30, (2018)
6. А. Худолей, Г. Городкин, Л. Глеб, А. Александронец, Наука и инновация, 6(148), 20, (2015)
7. M. Das, V.K. Jain, P. S. Ghoshdastidar, Machining Science and Technology, 14(3), 365, (2010). DOI: 10.1080/10910344.2010.511865
8. Zheng, X. Gao, F. Zhang, W. Wang, K. Liu, J. Xu, Precision Engineering, 81, 104, (2023)
9. A.W. Hasmi, H.S. Mali, A. Meena, I.A. Khilji, C.R. Chilakamarry, S.N. Saffe, Materials today: Proceedings, 48(6), 1892, (2022). DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.355
10. F. Zhao, Z. Zhang, J. Yang, J. Yu, J. Feng, H. Zhou, C. Shi, F. Meng, Chinese Journal of Aeronautics, 37(4), 54, (2024). DOI: 10.1016/j.cja.2023.06.006
11. Ю. С. Барышников, Р. О. Куракин, А. В. Чикиряка, Ф. А. Орлов, К. В. Твердохлебов, С. А. Леухин, М. И. Юрченков, С. А. Поняев. Прикладная физика, 3, 18, (2023). DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-18-24 [Yu. S. Baryshnikov, R. O. Kurakin, A. V. Chikiryaka, F.A. Orlov, K. V. Tverdokhlebov, S. A. Leukhin, M. I. Yurchenkov, S. A. Ponyaev. Applied physics, 3, 23, (2023)]

Система управления положением плазменного шнура на токамаке ФТ-2

Богданов А. А.¹, Тубольцев Ю.В.¹, Чичагов Ю.В.¹, Жубр Н.А.¹, Кантор М.Ю.¹, Лазутков В.П.¹, Есипов Л.А.¹, Шаталин С.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Alexander.A.Bogdanov@mail.ioffe.ru

Одним из перспективных направлений экологически чистой энергетики является разработка реактора термоядерного синтеза на основе установки токамак, в которой тороидальная плазма удерживается сильным магнитным полем. Для устойчивости плазмы на всех стадиях разряда необходимо управление положением и формой плазменного шнура в магнитном поле токамака. Управление реализуется импульсными токами в полоидальных катушках токамака, которые задаются по предварительной программе или определяются в режиме управления с обратными связями. Для управления плазменным шнуром в малых токамаках необходимо обеспечить быстрые измерения его положения и расчет управляющего воздействия на плазму.

Система управления, работающая в режимах предварительного программирования и с обратными связями, была спроектирована и установлена на малом токамаке ФТ-2 ($a = 8$ см, $R = 55$ см) с коротким разрядом (до 40 ms) и сильным магнитным полем (до 2.5 Т). Система используется в режимах омиического разряда, а также в режимах генерации тока и нагрева плазмы нижнегибридными волнами, когда параметры разряда могут существенно меняться в течении нескольких ms. Положение плазмы управляется тремя полоидальными токовыми обмотками, которые сдвигают плазму радиально, вверх и вниз. Токи в обмотках задаются с помощью тиристорных ключей, которые подключают к ним батареи с разными напряжениями. Открытие и закрытие ключей в заданные моменты времени происходит по сигналам, приходящим на 96 тириستоров.

В работе представлена система управления плазменным шнуром токамака ФТ-2 исполненная в виде крейта с модулями, управляющими тиристорными ключами, контролирующими их текущее состояние и оцифровывающими сигналы обратной связи токамака. Центральным процессорным узлом в крейте является модуль контроллера, предназначенный для оперативного управления всей системой и сбора данных. Контроллер создан на основе отладочной платы DE10-Nano, построенной на базе FPGA со встроенным 32-битным двухъядерным процессором Cortex-A9, что обеспечивает гибкое аппаратно-программное управление всеми устройствами системы. Подсистемы включают в себя узлы управления тиристорами, расположенные в непосредственной близости к ним. В системе предусмотрен контроль состояний тиристорных ключей.

Важной функций системы является оперативное отслеживание положения плазмы по радиальному и вертикальному направлениям. Эту задачу решает центральный процессорный узел по данным аналого-цифровых преобразователей, измеряющих радиальное и вертикальное смещение шнура по сигналам с седловидных петель и ток плазмы поясом Роговского.

В работе приведены результаты испытания созданной системы в режиме предварительной установки токов управления и проверена возможность управления шнуром в режиме обратных связей.

Зависимость мощности излучения от длины сильноточной вакуумной дуги в области вакуумного ультрафиолета.

Забелло К. К.¹, Ю.А. Баринов¹, А.А. Логачев¹, И.Н. Полуянова², С.М. Школьник¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

² Конструкторское бюро коммутационной аппаратуры, Севастополь.

e-mail: zabellok@mail.ioffe.ru

В вакуумных дуговых разрядах роль излучения в энергетическом балансе разряда изучена мало. Это объясняется тем, что плотность плазмы в вакуумных дугах при умеренных токах не столь велика и потому роль излучения было принято считать незначительной. Лишь в нескольких работах сделаны приближённые расчёты, позволяющие оценить роль излучения в энергобалансе вакуумной дуги [1-3]. Экспериментальных работ по измерению мощности излучения вакуумных дуг до начала настоящих исследований не проводилось.

Впервые измерения мощности излучения вакуумной дуги в области вакуумного ультрафиолета были выполнены в работах [4,5]. Было обнаружено, что при больших плотностях тока и появлении анодной активности (интенсивного испарения анода) мощность излучения, генерируемого дугой, начинает быстро расти. В работе прослежена зависимость максимальной мощности излучения от тока дуги вплоть до тока $I = 25 \text{ kA}$ ($j \sim 3.5 \text{ kA/cm}^2$), при котором анодная активность сильно выражена. Показано, что с ростом тока мощность излучения растёт экспоненциально быстро и при токе $I = 25 \text{ kA}$ в конце импульса мощность излучения достигает $\sim 300 \text{ kW}$. При этом мгновенная электрическая мощность, выделяющаяся в разряде, составляет $\sim 900 \text{ kW}$. Это значит, что в разрядах с высокой плотностью тока, в которых сильно развита анодная активность, мощность излучения может составлять почти 30% от полной выделяющейся в разряде мощности.

Эти результаты были получены в короткой дуге (длина $h = 4 \text{ mm}$), стабилизированной однородным аксиальным магнитным полем (АМП). Представляет интерес, как будет меняться мощность излучения при увеличении межэлектродного промежутка - удлинении дуги. С этой целью были выполнены измерения мощности излучения в условиях, аналогичных описанным выше, но при длине дуги $h = 8 \text{ mm}$.

Эксперименты выполнены в вакуумной камере при непрерывной откачке ($\sim 10^{-4} \text{ Pa}$). Дуга поджигалась искусственно в центре катода и стабилизировалась однородным АМП с индукцией $\sim 10 \text{ mT/kA}$. АМП создавалось внешними катушками (пара Гельмгольца), и его индукция была подобрана так, чтобы обеспечить практически однородное распределение тока на торцевой поверхности электродов и отсутствие привязок разряда к боковой

поверхности. Использовались электроды из композиции CuCr30 диаметром $2r = 30$ mm, расположенные вертикально на расстоянии $h = 8$ mm один от другого. Дуга питалась импульсом тока с короткими фронтами и протяжённым (~ 10 ms) плато.

Для регистрации излучения внутри вакуумной камеры были на расстоянии 900 mm помещены три одинаковых кремниевых фотодиода ФДУК8-УВС с размером активной области 3.5 mm. Расположены они были на оси, перпендикулярной оси симметрии разряда в центре межэлектродного промежутка. Для разделения спектральных областей перед фотодиодами помещались оптические стёкла: из MgF_2 , из кварца КУ1 и из цветного стекла ЖС-10. Выбор стёкол определялся на основании спектральной чувствительности фотодиодов. Стекло из MgF_2 пропускает излучение с длиной волны $\lambda \geq 100$ nm, стекло КУ-1 пропускает излучение с $\lambda \geq 175$ nm, стекло из ЖС-10 пропускает излучение с $\lambda \geq 400$ nm. Сигналы с фотодиодов сохранялись цифровым осциллографом. Измерения проводились в диапазоне токов от 10 kA до 25 kA, что соответствует средней плотности тока в развитом разряде $1,5 \text{ kA/cm}^2 \leq j \leq 3,5 \text{ kA/cm}^2$.

В результате работы была прослежена зависимость мощности излучения от тока. При сопоставлении с результатами, полученными при исследовании короткой дуги, можно утверждать, что мощность излучения в длинной дуге возрастает с увеличением её длины. Однако в области вакуумного ультрафиолета ($100 \leq \lambda \leq 175$ nm) рост мощности излучения с увеличением длины дуги незначительный. Это подтверждает точку зрения, что основной рост мощности излучения в дуге с развитой анодной активностью происходит за счёт излучения атомных линий в диапазоне 175 – 400 nm. Что касается доли всей энергии, переносимой излучением, то она растёт при удлинении дуги и в максимуме достигает 30 %.

Список литературы

1. E. Schade and D. L. Shmelev, "Numerical simulation of high-current vacuum arcs with an external axial magnetic field," IEEE Trans. Plas. Sci., vol. 31, no. 5, pp. 890–901, 2003.
2. L. Wang, S. Jia, Y. Liu, B. Chen, D. Yang, and Z. Shi, "Modeling and simulation of anode melting pool flow under the action of high-current vacuum arc," J. Appl. Phys., vol. 107, no. 11, 2010, Art. no. 113306.
3. N. Wenzel, S. Kosse, A. Lawall, R. Renz, and W. Hartmann, "Numerical simulation of multi-component arcs in high-current vacuum interrupters," in Proc. 25th Int. Symp. Discharges Electr. Insul. Vac.(ISDEIV), Sep. 2012, pp. 321–324.
4. Ю.А. Баринов, К.К. Забелло, А.А. Логачёв, И.Н. Полуянова, Е.В. Шерстнев, С.М. Школьник, Письма в ЖТФ, 50 (24), 40 (2024). DOI:10.61011/PJTF.2024.24.59436.6419k
5. Ю.А. Баринов, К.К. Забелло, А.А. Логачев, И.Н. Полуянова, Излучение короткой сильноточной вакуумной дуги с медными электродами, Прикладная физика. 2025. № 1.

Оптимизация параметров диодного плазменного стабилизатора напряжения

А.С. Мустафаев, А.Ю. Грабовский, Е.В. Штода, А.А. Фицак

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

e-mail: schwer@list.ru

В последние десятилетия теоретические и экспериментальные исследования сильно анизотропной плазмы приобрели большой размах в связи с широкими перспективами ее практического применения в плазменной электронике [1].

Основной электрокинетической характеристикой плазмы является функция распределения электронов по скоростям (ФРЭС). В анизотропной плазме инертных газов она отличается сильной неравновесностью и содержит несколько групп быстрых электронов высокой концентрации [2]. Измерение подобных ФРЭС позволяет оптимизировать не только геометрию плазменного канала, но и электрокинетические характеристики газоразрядных приборов [3, 4].

Для создания приборов плазменной электроники нового поколения авторами активно используются низковольтные пучковые разряды (НПР) в легких инертных газах. Такие приборы способны надежно работать в экстремальных условиях окружающей среды, устойчивы к возбуждению плазменных колебаний, обеспечивают возможность непрерывного управления электрокинетическими характеристиками и перспективны для решения широкого круга проблем энергетики.

Работа посвящена экспериментальному исследованию электрокинетических параметров гелиевого НПР в условиях диодного стабилизатора напряжения. Выполнена зондовая диагностика анизотропной плазмы в рабочих условиях прибора для двух типов боковых границ межэлектродного зазора – цилиндрического и конического. Исследованы вопросы влияния геометрии межэлектродного зазора на динамику быстрых электронов и порог развития пучково-плазменной неустойчивости. Показано, что конический экран увеличивает длину энергетической релаксации электронных пучков, обеспечивая кратный прирост плотности тока в плазме. Результат достигнут за счет снижения концентрации электронов на оси разряда.

Оптимизированы давление гелия и величина межэлектродного зазора. Достигнуты величины стабилизированного напряжения $U_{\text{стаб}}$ вплоть до 65 В при плотностях тока порядка 2 А/см². Регулировка уровня $U_{\text{стаб}}$ осуществляется путем изменения давления гелия от 0,2 до 2 Торр. Достигнутые параметры кратно превосходят рабочие характеристики стабилизатора [5], заполняемого легкими инертными газами с различными потенциалами возбуждения.

Список литературы

1. M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharge and Material Processing (Wiley, New York, 2005).

2. Sukhomlinov V., Mustafaeв A., Koubaji H., et. al. Kinetic Theory of Instability of the Electron Beam-Plasma System Taking into Account the Elastic Electron-Atomic Collisions for an Arbitrary Scattering Indicatrix // Journal of the Physical Society of Japan. 2023. V. 92. № 4. 044501.
3. Adams S.F., Demidov V.I., Bogdanov E.A., et. al. Control of plasma properties in a short direct-current glow discharge with active boundaries // Phys. of Plasmas. 2016. V. 23. № 2. 024501.
4. Цендин Л.Д. Нелокальная кинетика электронов в газоразрядной плазме // УФН. 2010. Т. 180. № 2. С. 180.
5. Мустафаев А.С., Грабовский А.Ю. Низковольтный пучковый разряд в легких инертных газах для решения проблем стабилизации напряжения // ТВТ. 2017. Т. 55. № 1. С. 24.

Кинетическая теория прикатодного слоя в низковольтных пучковых разрядах.

Бадр А.Х., А.С. Мустафаев, В.С. Сухомлинов, О.Д. Бербенева.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

e-mail: *hady93327@gmail.com*

Известны пучковые разряды, в которых пучок электронов, двигаясь в плазме, переносит ток и обеспечивает необходимую для существования разряда скорость ионизации [1 - 3]. К таким разрядам относится и низковольтный разряд в инертных газах (НПР). С прикладной точки зрения изучение закономерностей динамики электронных пучков в плазме важно для разработки новых приборов плазменной электроники, в которых применяется пучковая плазма, а именно: управляемых стабилизаторов широкого назначения, источников интенсивного электромагнитного излучения, управляемых элементов электронных цепей, плазмохимических реакторов и т.п.[4, 5].

Как известно, процессы формирования прикатодных слоев газового разряда зачастую определяют и его объемные свойства. Так, в условиях, оптимальных для применения НПР в приборах плазменной электроники, данный тип пучкового разряда может быть неустойчивым. Как показано в [6], спектр возмущений параметров НПР при потере ими устойчивости определяется свойствами прикатодного слоя.

Наиболее перспективными с прикладной точки зрения являются НПР в условиях, когда межэлектродное расстояние сравнимо с длиной пробега электронов относительно упругих столкновений с атомами и существенно больше таковой для неупругих столкновений. В этих условиях для описания НПР необходимо применять кинетический подход.

В работах [7 - 9] была развита кинетическая теория пристеночных слоев (в том числе, и прикатодных) для произвольных условий в газоразрядной плазме. При этом в них рассматривался тлеющий разряд, где ток переносится электронами плазмы и процессы ионизации также происходят за счет плазменных электронов. Однако, НПР из-за наличия пучка быстрых электронов обладает рядом специфических особенностей формирования

прикатодного слоя, которые делают развитую в упомянутых работах кинетическую теорию неприменимой для этого случая.

Цель работы – построение кинетической теории для описания прикатодного слоя НПР в условиях их использования для конструирования приборов плазменной электроники. Теория основывается на физической модели НПР, в которой электроны разбиты на три существенно отличающихся по функциям распределения группы: электроны пучка, не испытавших ни одного столкновения с атомами; электроны с энергией, близкой к энергии пучка, испытавших хотя бы одно упругое столкновение с атомами; электроны плазмы, которая образуется при редких неупругих электрон – атомных столкновениях электронов пучка.

Развитая теория верифицирована сравнением с экспериментальными данными по измерению потенциала и электрического поля в прикатодном слое. Обнаружен ряд особенностей структуры прикатодного слоя НПР, которые объяснены в рамках развитой в работе физической модели. На ее основе проведен анализ спектров шумов пучка электрона, ответственных за потерю устойчивости НПР.

Список литературы

1. A.S. Mustafaev and A.P. Mezentsev, J. Phys. D: Appl. Phys. **19** (1986) L69-L73.
2. В.Ф. Лапшин, А.П. Мезенцев, А.С. Мустафаев, Письма в ЖТФ, 1989, т. 15, вып. 6, стр. 54 - 58.
3. А.С. Мустафаев, ЖТФ, 2001, т. 71, вып. 4, стр.111 - 121.
4. A. S. Mustafaev, V. I. Demidov, I. D. Kaganovich, M. E. Koepeke, and A. Grabovskiy, Physics of Plasmas **21**, 053508 (2014).
5. A. S. Mustafaev, V. I. Demidov, I. Kaganovich, S. F. Adams, M. E. Koepeke, and A. Grabovskiy, Review of Scientific Instruments **83**, 103502 (2012).
6. Sukhomlinov, Vladimir, et al. Journal of the Physical Society of Japan **91.2** (2022): 024501.
7. Sukhomlinov Vladimir S., Mustafaev Alexander S., Murillo Oskar, PHYSICS OF PLASMAS, 2018, Vol. 25, Issue 1, 013513.
8. Murillo O., Mustafaev A.S., and Sukhomlinov V.S., Technical Physics, 2019, Vol. 64, 1308–1318.
9. O. Murillo, A. S. Mustafaev and V. S. Sukhomlinov, Technical Physics, 2019, Vol. 64, No. 10, pp. 1462–1472.

Атомная кинетика в плазме при воздействии лазерных импульсов

Нагель Н. Н.¹, Астапенко В.А.², Лисица В.С.¹, Кутузов Д.С.¹

¹НИИ «Курчатовский институт», ² Московский физико-технический институт

e-mail: dementevanadegda@mail.ru

Рассмотрена проблема корректного построения атомной кинетики в плазме при воздействии лазерных импульсов различной длительности. В отличие от стандартной атомной кинетики, основанной на понятии стационарных скоростей переходов между атомными

уровнями, используется функция, описывающая полную вероятность временной эволюции фотопроцесса под воздействием ультракоротких импульсов рамках теории возмущения [1-3]. Проведены расчеты населенностей атомных уровней и сигналов флуоресценции под воздействием лазерного излучения в рамках обобщенной кинетической модели [1, 2, 3] на переходах сигнала флуоресценции в гелиевой плазме. Получены аналитические выражения, описывающие изменение населенностей возбужденных уровней, участвующие в синглетной схеме лазерной накачки атома гелия.

В отсутствии лазерного импульса стационарные заселенности рассчитывались в стандартной столкновительно-излучательной модели [4, 5]. В обобщенной кинетической модели учитывалось пять синглетных уровней гелия HeI (2^1S , 2^1P , 3^1S , 3^1P , 3^1D) для применения схемы с накачкой на переходах $\lambda_{\text{laser}} = 501,6$ нм ($2^1S - 3^1P$) и регистрацией флуоресцентного сигнала на линии $\lambda_{\text{FLU}} = 728,1$ нм ($3^1S - 2^1P$). Решения кинетического уравнения в поле электромагнитного импульса допускает аналитическое выражение для населенностей уровней под действием лазерного импульса [2], используемые в расчетах сигнала флуоресценции.

Основой системы лазерной диагностики является лазер на красителях, накачка производится второй/третьей гармоникой твердотельного Nd: YAG-лазера с частотой 20 Гц. Лазерная диагностика используется для определения осевой скорости и температуры атомов гелия для плазмы установки Е-1 (прототипа безэлектродного плазменного ракетного двигателя). Характерная длительность импульса составляла 5 нс [6]. Основные параметры плазмы принимались характерными для плазмы установки Е-1 ($T_e = 10$ эВ, $N_e = 10^{12}$ см $^{-3}$).

Длина резонатора лазера составляет 30 см, межмодовое расстояние в области инфракрасного излучения - 0.65 пм. При ширине линии генерации 4-6 пм в спектре генерации будет 6-10 продольных лазерных мод.

Контур лазерного импульса представлен в виде огибающей импульсов на различных несущих частотах, межмодовое расстояние между которыми принималась соответствующим лазеру на красителях. Полученное аналитическое выражение для населенности верхнего возбужденного уровня использовано для описания изменения сигнала флуоресценции в поле лазерного импульса. Проведено сравнение населенностей в зависимости от количества мод, учитываемых в расчете для описания формы лазерного импульса: 1 импульс малой длительности и несколько мод с межмодовым расстоянием 0.65 пм.

Проведенные расчеты позволяют учесть влияние лазерного поля с различными спектральными и временными характеристиками при анализе экспериментальных результатов с использованием ЛИФ для плазменных установок, в частности для плазмы установки Е-1.

Список литературы

1. Astapenko V. A. Attosecond dynamics of photoexcitation of the hydrogen atom by ultrashort laser pulses // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2020 – Vol. 130. doi.org/10.1134/S1063776119120124.

2. Astapenko V.A., Khramov E.S. The generalized kinetics model for the description of the photoprocesses induced by ultrashort laser pulses// Appl. Phys. B. – 2023. – Vol. 129. – № 107- DOI10.1007/s00340-023-08052-5.
3. Astapenko, V.A., Lisitsa, V.S. Kinetics of dense plasma in the field of short laser pulses: A generalized approach. // Matter and Radiation at Extremes. 2024, 9, 057801-10.1063/5.0210407
4. Summers H.P. The ADAS User Manual, version 2.6 / H.P. Summers. – 2004.
5. Gorbunov et al Laser-induced quenching diagnostics of hydrogen atoms in fusion plasma. //Plasma Phys. Control. Fusion -2022-Vol. DOI 64 10.1088/1361-6587/ac89ad
6. Д.О. Шуровский, Д.С. Кутузов, Е.А. Бунин, А.Е. Сухов, Е.Ю. Брагин// ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2 DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-2-97-104

Теоретическое и экспериментальное исследование обработки мелкодисперсного порошка оксида эрбия в высокочастотной плазменной струе для получения светоищлучающих микросфер

Сергеев В.А.¹, Зверев С.Г.¹, Грачев С.Ю.¹, Медведев А.В.², Иванов Д.В.¹, Машигин А.А.¹

¹СПбПУ

²ФТИ им. А. Ф. Иоффе

e-mail: d.ivanov@list.ru

Оксиды редкоземельных металлов, к которым относится оксид эрбия (Er_2O_3), привлекают внимание из-за таких свойств, как высокая прозрачность в широкой спектральной области от УФ до ИК диапазона и достаточно большой показатель преломления. Материалы на основе Er_2O_3 применяются в оптоэлектронных устройствах в качестве преобразователей ИК излучения в видимое благодаря ап-конверсии [1], а также для создания цветных дисплеев [2] и др. Свойства такого материала тесно связаны с размером и формой.

В частности, шарообразная форма частиц Er_2O_3 способствует уменьшению потерь излучения из-за рассеяния света и может быть использована в качестве активного ядра в сферических брэгговских отражателях [3, 4]. Такие структуры применимы для управления спонтанной эмиссией [5] и создания низкопороговых всенаправленных микролазеров [6, 7]. Однако получение микросфер необходимого для достижения лазерного эффекта размера порядка 100 мкм сопряжено с технологическими трудностями. Например, в работе [8] полученные химическим способом микросферы имеют диаметр лишь 0,2-0,3 мкм, а в работе [9] квазимикросферы неправильной формы достигли размера только 3 мкм. Поэтому задача синтеза достаточно крупных (до 100 мкм) микросфер оксида эрбия остается актуальной. Условиями получения такого порошка являются химическая чистота и высокая температура рабочей среды, поскольку оксид эрбия является тугоплавким материалом.

В данной работе было предложено синтезировать микросферы Er_2O_3 в плазменной струе, создаваемой высокочастотным индукционным (ВЧИ) плазмотроном [10-12]. При этом в качестве исходного материала использовался мелкодисперсный порошок Er_2O_3 со средним диаметром частиц порядка 1 мкм, образующих крупные агломерации до 200 мкм.

В работе было выполнено математическое моделирование термических, газодинамических и электромагнитных процессов в ВЧИ плазмотроне на основе разработанных ранее моделей [13-16]. Полученные распределения температуры и скорости плазмы использовались в качестве исходных данных для расчета движения порошка оксида эрбия в плазменной струе. В результате получены параметры технологического процесса (такие, как мощность в плазме, расход плазмообразующего газа, место и угол подачи порошка, расход транспортирующего газа), обеспечивающие эффективную обработку. Эти параметры использовались в качестве исходных при проведении экспериментальных исследований. Полученные микросферы оксида эрбия имели диаметр 20–80 мкм, т.е. оказались на порядок больше исходного порошка. В работе представлены гипотезы, объясняющие этот результат.

Также были выполнены оптические исследования полученных микросфер. Фотолюминесценция (ФЛ) ионов эрбия Er^{3+} в микросферах возбуждалась через микрообъектив с фокусным расстоянием 5 мм диодным инфракрасным лазером с длиной волны 980 нм и плотностью мощности до 100 кВт/см². Микросферы демонстрировали интенсивную ФЛ в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Изготовленные микросферы могут служить основой для микроскопических точечных источников некогерентного и когерентного излучения видимого и ближнего ИК-диапазонов, включая длину волны волоконно-оптических линий связи 1,5 мкм, а также могут быть использованы в качестве преобразователей тепловой энергии в узкополосное селективное излучение в видимой и ИК-области спектра.

Работа выполнена в рамках исследований по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FSEG-2023-0012).

Список литературы

1. Guo H., Qiao Y.M. Preparation, characterization, and strong upconversion of monodisperse $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Er}^{3+}$, Yb^{3+} microspheres // Opt. Mater. – 2009. – V. 31. – Pp. 583-589.
2. Rapaport A. et al. Review of the properties of up-conversion phosphors for new emissive displays // J. Display Technol. – 2006. – V. 2(1). – Pp. 68-78.
3. Медведев А.В., Дукин А.А., Феоктистов Н.А., Голубев В.Г. Сферический распределенный брэгговский отражатель на основе $\alpha\text{-Si}1-x\text{C}_x:\text{H}$ и $\alpha\text{-SiO}_2$ // Письма в ЖТФ. – 2017. – Т. 43(19). – С. 35-42.
4. Медведев А.В., Дукин А.А., Феоктистов Н.А., Голубев В.Г., Сферический распределенный брэгговский отражатель на основе $\alpha\text{-Si}1-x\text{C}_x:\text{H}$ и $\alpha\text{-SiO}_2$ // ФТП. – 2019. – Т. 53(7). – С. 917-921.
5. Imakita K., Shibata H., Fujii M., Hayashi S. Numerical analysis on the feasibility of a multi-layered dielectric sphere as a three-dimensional photonic crystal // Opt. Express. – 2013. – V. 21(9). – Pp.10651-10658.

6. Humar M., Musevic I. 3D microlasers from self-assembled cholesteric liquid-crystal microdroplets // Opt. Express. – 2010. – V. 18(26). – Pp. 26995-2703.
7. Xu Y. et al. Modal analysis of Bragg onion resonators // Optics. Lett. – 2004. – V. 29(5). – Pp. 424-426.
8. Han K. et al. A Simple route to preparation and characterization of Er₂O₃ microspheres // Chem. Lett. – 2007. – V. 36(9). – Pp. 1124-1125.
9. Nguyen T.D., Dinh C.D., Do T. Shape- and size-controlled synthesis of monoclinic ErOOH and cubic Er₂O₃ from micro- to nanostructures and their upconversion luminescence // ACS Nano. – 2010. – V. 4(4). – Pp. 2263-2273.
10. Дресвин С.В., Донской А.В., Гольдфарб В.М., Клубникин В.С. Физика и техника низкотемпературной плазмы. – М.: Атомиздат, 1972. 352 с.
11. Дресвин С.В., Зверев С.Г. Плазмотроны: конструкции, параметры, технологии. – СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 208 с.
12. Boulos M. I., Fauchais P. L., Pfender E. Handbook of Thermal Plasmas. – Springer International Publishing, 2023. 1975 p.
13. Дресвин С.В., Зверев С.Г. Теплообмен в плазме. – СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 212 с.
14. Ivanov D.V., Zverev S.G. Mathematical Simulation of Processes in ICP/RF Plasma Torch for Plasma Chemical Reactions // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2017. – V. 45(12). – Pp. 3125–3129.
15. Ivanov D.V., Zverev S.G. Mathematical Simulation of Processes in Air ICP/RF Plasma Torch for High-Power Applications // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2020. – V. 48(2). – Pp. 338–342.
16. Ivanov D.V., Zverev S.G. Mathematical Simulation of Plasma Processes in a Radio Frequency Inductively Coupled Plasma Torch in ANSYS Fluent and COMSOL Multiphysics Software Packages // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2022. – V. 50(6). – Pp. 1700-1709.

Разработка компонентов оптического тракта диагностики томсоновского рассеяния, расположенных на диверторных кассетах токамака ИТЭР

Кунгурцев Н. А.¹, Коваль А.Н.¹, Мухин Е.Е.¹, Толстяков С.Ю.¹, Раздобарин А.Г.¹, Букреев И.М.¹, Кириенко И.Д.², Жадковский А.А.², Модестов В.И.², Богачев Д.Л.³

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

³ООО «Спектрал-Тех»

e-mail: nakungurtsev@vk.com

В статье представлено состояние дел по разработке компонентов оптического тракта диагностики томсоновского рассеяния, расположенных на диверторных кассетах токамака ИТЭР в непосредственной близости от термоядерной плазмы. Одной из задач диагностики томсоновского рассеяния в диверторной плазме токамака ИТЭР является предоставление данных о пространственном распределении электронной температуры и концентрации для управления режимами разряда [1]. Другое функциональное назначение диагностики состоит в сборе информации для анализа физических процессов и разработки

надежных моделей и кодов управления режимами. Диагностические компоненты, расположенные на диверторных кассетах, в наибольшей степени подвержены радиационному нагреву, воздействию сильного магнитного поля, ударному воздействию при протекании вихревых токов, вызванных взаимодействием плазменных токов, вызванных срывами плазменного разряда с сильным магнитным полем. Их целостность в конечном счете определяет работоспособность не только систем управления и диагностики, но и самого токамака-реактора. Диагностические компоненты, расположенные на диверторных кассетах 21 и 22, по функциональному назначению делятся на

- газодинамическую защиту лазерных зеркал от продуктов эрозии первой стенки при импульсных бросках давления на границе плазменного разряда (Dust baffle и Laser visor) [2]
- экранирование системы сбора рассеянного на плазме лазерного излучения от свечения нагретых диверторных пластин (Защитные бленды – Shadow screens) на 21 и 22 диверторных кассетах
- защиты стенки вакуумного объема от мощного лазерного излучения (ловушка лазерного излучения – Laser beam dump).

Ловушка лазерного излучения монтируется к кассете 21 неразборным соединением с применением дуговой сварки в защитном газе. Разработанная конструкция обеспечивает надежный тепловой контакт с охлаждаемым корпусом диверторной кассеты и позиционирование зеркальной ловушки, поглощающей мощное лазерное излучение. Оптическая схема ловушки лазерного излучения спроектирована с учетом зависимости коэффициента поглощения от угла падения и поляризации лазерного луча. Наибольшей нагрев поверхности зеркала $\sim 0,18$ Дж/см² ожидается на поверхности зеркала М1. При такой плотности энергии лазерное излучение длительностью 3-5 нс не превышают допустимые для молибденовых зеркал значения [3].

Устройство газодинамической защиты монтируется к кассете 21 и 22 неразборным соединением. Втулки с увеличенной площадью поверхности обеспечивают позиционирование шпилек и участвуют в защите окон диагностической системы от импульсных конвективных потоков [2].

Верхние защитные бленды монтируются неразборным соединением к кассетам 21 и 22. Разрезной кронштейн, в отверстия которого позиционируются шпильки, является основным элементом конструкции. Керамические элементы обеспечивают электрическую изоляцию конструкции. Усилие прижима обеспечивается пакетом тарельчатых пружин.

Нижние защитные бленды монтируются к кассетам 21 и 22 с помощью болтового соединения, охватывая трубы охлаждения, на которых располагается купол диверторных кассет.

Разрезная конструкция защитных бленд обеспечивает устойчивость к электромагнитным, тепловым и сейсмическим нагрузкам.

Основными материалами компонентов являются монокристаллический молибден, сплавы TZM (молибден, цирконий, титан), Inconel718, сталь 316 L(N)-IG, графитовые листы PARYEX. Графитовые листы PARYEX обеспечивают тепловой контакт между диагностическими компонентами и телом охлаждаемой диверторной кассеты.

Проведен анализ приложенных электромагнитных и термомеханических нагрузок. Численное моделирование возникающих напряжений в конструктивных элементах с использованием программного пакета ANSYS показало, что максимальные значения напряжений не превышают допустимых для выбранных материалов в соответствии с принятыми правилами проектирования, что обеспечивает долговременную эксплуатацию разработанных диагностических компонентов, расположенных на диверторных кассетах 21 и 22.

Список литературы

1. Mukhin E.E. et al., «Physical aspects of divertor Thomson scattering implementation on ITER» Nucl. Fusion 54 (2014) 043007
2. Букреев И.М. и др., «Комплекс мер защиты оптики от загрязнения в диагностических каналах токамаков» Instrum. Exp. Tech. 57 (2014) 155-164
3. Yatsuka E et al., «Enhancement of resistance against high energy laser pulse injection with chevron beam dump» Fusion Engineering and Design 100 (2015) 461–467

Разряд в смесях инертных газов с азотом, поддерживаемый мощным излучением лазера на свободных электронах

Сидоров А. В.¹, Кубарев В.В.², Веселов А.П.¹, Водопьянов А.В.¹, Шевченко О.А.², Горбачев Я.И.².

¹ИПФ РАН, ²ИЯФ СО РАН

e-mail: alvasid@inbox.ru

Прогресс в создании мощных источников излучения терагерцового диапазона частот [1–2] позволил приступить к изучению взаимодействия электромагнитного излучения данного диапазона с плазмой.

В представляемой работе описываются результаты исследования разряда в смеси тяжелых инертных газов с азотом, возникающего в сфокусированном пучке, генерируемом Новосибирским лазером на свободных электронах (130 микрон). Данные исследования вызывают интерес, прежде всего, с прикладной точки зрения, поскольку плотная плазма терагерцового разряда может служить ярким источником излучения оптического, ультрафиолетового и экстремального ультрафиолетового излучения [3].

Одной из основных проблем разряда в сфокусированном пучке электромагнитных волн лазера на свободных электронах (ЛСЭ) в чистых инертных газах является то, что разряд уходит навстречу греющему излучению и горит не в фокусе пучка, что существенно снижает максимальную температуру, достигаемую в разряде.

В представляемом исследовании в разрядный объем добавлялся азот, существенно ухудшающий пробойные условия вне фокуса греющего излучения, что позволяло сместить разряд в область фокального пятна излучения ЛСЭ.

Получены данные о диапазонах давлений фоновых газов, скоростей напуска газов, при которых возможно развитие разряда. Для оптимизации условий горения разряда было проведено исследование свечения разряда в зависимости от потоков аргона и азота, напускаемых в разрядную камеру. В качестве параметра, характеризующего разряд, было выбрано отношение интенсивности линии Ar III к интенсивности континуума. Представляется, что континуум светит в основном из холодной «шубы» разряда, в то время как линейчатое излучение идет в основном из горячей «сердцевинки» разряда. Показано, что для каждого потока аргона существует оптимальный поток азота, при котором это соотношение максимально. При этом с ростом потока аргона оптимальный поток азота также растет.

Проведено исследование динамики светимости плазмы разряда в различных спектральных диапазонах. Показано, что отсутствует корреляция между последовательностью импульсов ЛСЭ (следующих с частотой 11.2 МГц) и свечением разряда во всех наблюдаемых диапазонах (от УФ до красного). При этом свечение плазмы содержало некую постоянную составляющую и нерегулярные всплески на этом фоне с длительностью порядка 10 микросекунд, что существенно превышает длительность импульса ЛСЭ (порядка 100 пс). В настоящее время мы предполагаем, что эти колебания свечения связаны с пространственными осцилляциями разряда, когда наиболее горячая его часть несколько выходит из поля зрения монохроматора.

Данная работа поддержана грантом Российского научного фонда №19-72-20166.

Список литературы

1. G.G. Denisov et al // Rev. Sci. Instrum. V 89, P 084702 (2018).
2. G.N. Kulipanov et al // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. V 5, P 798 (2015).
3. V.V. Kubarev, Ya.I. Gorbachev, O.A. Shevchenko, A.V. Vodopyanov, A.V. Sidorov and A.P. Veselov // Plasma Sources Sci. Technol. 32, 055004 (2023).

Исследование неустойчивости плавающего потенциала зонда для разрядов с плоским и полым катодом

Астафьев А. М.¹, С. Zhou², А.А. Кудрявцев², О.С. Алексеева³, С. Yuan²

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ), ²Harbin Institute of Technology, ³ИТМО

e-mail: astafev-aleksandr@yandex.ru

Хотя методы зондовой диагностики низкотемпературной газоразрядной плазмы известны уже очень давно, однако до настоящего времени являются одними из наиболее информативных и широко используемых. Важнейшей особенностью зондовых методов является возможность определения не только средних параметров газоразрядной плазмы, но также

и функции распределения электронов по энергии [1]. Помимо чисто научного интереса зондовые методы представляют большой практический интерес. Так в [2] была реализована идея газоанализатора, идея которого заключается в регистрации электронов, рожденных в результате реакций пеннинговской ионизации регистрируемых примесей метастабильными атомами гелия. В [2] для проведения зондовых измерений зажигался тлеющий разряд с полым катодом. Однако для проведения зондовой диагностики и получения корректного результата является очень важным выбрать условия измерений и режимы горения разряда.

В данной работе исследуются неустойчивости плавающего потенциала зонда для разрядов в гелии при разных давлениях между полым катодом и плоским анодом, а также между двумя плоскими электродами, при этом расстояние между электродами (15 мм), диаметр разрядной трубки (25 мм) и положение зонда (3 мм от плоского анода) были одинаковыми. Для проведения измерений была собрана схема на основе генератора пилообразного напряжения, высоковольтного 400 В усилителя и регистрирующего 12-ти битного четырехканального осциллографа. Для измерения ВАХ разряда анод был заземленным, а положительный полюс постоянного источника напряжения соединялся с выходом усилителя пилообразного напряжения, образуя последовательное соединение источника постоянного напряжения и высоковольтного источника пилообразного напряжения частотой до 5 Гц. Ток и напряжение разряда регистрировались на два канала осциллографа с использованием высоковольтного пробника и подключенному к балластному сопротивлению дифференциального пробника, а третий канал осциллографа использовался для измерения плавающего потенциала между зондом и заземленным анодом. Эта система позволяла проводить измерения в автоматизированном режиме при разных давлениях гелия и выявлять неустойчивые режимы горения разряда, характеризующиеся резкими изменениями плавающего потенциала зонда.

Проведенные измерения для двух случаев разрядов показали, что их ВАХ в целом имеют растущий вид, при этом с увеличением давления гелия от 1 до 4 Торр напряжение изолированного зонда увеличивалось от единиц вольт до значений более 20 В. Для разряда с полым катодом рост напряжения был значительно более резким, чем для разряда с плоскими электродами. Напряжение между анодом и зондом для разряда с плоскими электродами сильно зависит от давления, но слабо зависит от величины тока разряда. Для разряда с полым катодом напряжение между анодом и зондом сильно зависит как от давления, так и от величины разрядного тока. Кроме того, для разряда с полым катодом при определенных значениях давлений на зависимостях напряжения зонда от тока разряда были выявлены скачкообразные изменения в виде характерных ступенек (более 5 В), что делает такие режимы разряда абсолютно непригодными для проведения зондовой диагностики, поскольку это может очень сильно исказить измеряемые зондовые характеристики и в целом повлиять на результат. Для разряда между плоскими электродами таких режимов не наблюдалось. Это показывает важность выбора режимов горения разряда для проведения зондовой диагностики. Данная система может быть также использована для предварительного тестирования других типов разрядов с целью выявления режимов с неустойчивым значением плавающего потенциала зонда.

Список литературы

1. Демидов В.И., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996. 238 с.
2. C. Zhou, J.F. Yao, A.I. Saifutdinov, A.A. Kudryavtsev, C.X. Yuan, Z.X. Zhou, Plasma Sources Sci. Technol., 30 (11), 117001 (2021).

Применение метода жидкого анода для получения сферических частиц при плазменном распылении золота, серебра, меди

Барышников Ю. С.¹, Орлов Ф. А., Трофимук А.Д., Чижикова А.С., Чикиряка А.В., Теневич М.И., Поняев С.А.

¹ФТИ им. Иоффе

e-mail: Iulianb@mail.ioffe.ru

Метод жидкого анода для получения сферических частиц при плазменном распылении металлов интересен своей простотой осуществления и меньшей энергозатратностью, как примеру в сравнении с методом жидкого катода [1] или путем генератора импульсов в воде [2]. Получение сферических частиц при распылении металлических катодов с низкой теплопроводностью (титан, железо, нержавеющая сталь) на жидком аноде рассмотрено в нашей статье [3], однако, получение сферических частиц методом жидкого анода с высоким коэффициентом теплопроводности, к примеру меди, получить не удавалось. Задачей представленного исследования являлось получение сферических частиц при распылении методом жидкого анода металлов с высоким коэффициентом теплопроводности (меди, серебра, золота) диаметром более 10 микрон и менее 150 микрон. Сферические частицы такого диапазона находят применение в аддитивных технологиях [4]. Получение сферических частиц из золота другими методами и исследователями описаны в [5-10], сферических частиц из серебра описаны в [11-15], сферических частиц из меди – в [16-21].

В результате исследования, путем повышения электропроводности жидкого анода (водный раствор с хлоридом натрия) до 240 мСм/см, при тех же напряжениях 300 В (как в случае получения сферических частиц при распылении металлических катодов с низкой теплопроводностью на жидком аноде [3]) удалось получить сферические частицы необходимого диапазона для аддитивных технологий при распылении металлов с высоким коэффициентом теплопроводности: медь, серебро, золото. Проведен также элементный анализ с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) полученных сферических частиц из данных металлов.

Список литературы

1. А.Ф. Гайсин. Патент RU №2802608C1. 2023.08.30
2. Р. А. Латыпов, Н. Н. Карпенко, Г. Р. Латыпова, Е.В. Агеева. Патент RU №2791308C1. 2023.03.07

3. Ю. С. Барышников, Р. О. Куракин, А. В. Чикиряка, Ф. А. Орлов, К. В. Твердохлебов, С. А. Леухин, М. И. Юрченков, С. А. Поняев. Прикладная физика, **3**, 18, (2023). DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-18-24 [Yu. S. Baryshnikov, R. O. Kurakin, A. V. Chikiryaka, F. A. Orlov, K. V. Tverdokhlebov, S. A. Leukhin, M. I. Yurchenkov, S. A. Ponyaev. Applied physics, **3**, 23, (2023). DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-18-24]
4. S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner et al., Prog. Addit. Manuf., **4**, 383, (2019). DOI: 10.1007/s40964-019-00078-6
5. S. D. Perrault, Warren C. W. Chan J., Am. Chem. Soc., **131**(47), 17042, (2009). DOI: 10.1021/ja907069u
6. F. Chong. Патент CN 104289728A. 2015.21.01
7. N. Collier, Gold Bulletin, **10**, 62, (1977). DOI: 10.1007/BF03215432
8. A.B. Evlyukhin, A.I. Kuznetsov, S.M. Novikov, J. Beermann, C. Reinhardt, R. Kiyan, S. I. Bozhevolnyi, B. N. Chichkov, Appl. Phys. B, **106**, 841, (2012). DOI: 10.1007/s00340-011-4727-5
9. C.C. Chen, P.L. Kuo, Y.C. Cheng, Nanotechnology, **20**(5), 055603, (2009). DOI: 10.1088/0957-4484/20/5/055603
10. Y. Inoue, Y. Tsutamoto, D. Muko, Anal. Sci., **32**, 875, (2016). DOI: 10.2116/analsci.32.875
11. Y. Lai, H. Huang, Q. Huang, H. Zhang, Z. Guo, Powder Technol. **263**, 7, (2014). DOI: 10.1016/j.powtec.2014.04.087
12. K. Ogi, T. Fujino. Патент US №20050257643A1. 2005.11.24
13. Y. Zhihao, Z. Yuanjun, L. Ronghao, L. Zhongzan, L. Mouxuan. Патент CN №113226597A
14. N. Li, J. Li, X. Wan, Y. Niu, Y. Gu, G. Chen, S. Ju, Materials (Basel), **16**(4), 1733, (2023). DOI: 10.3390/ma16041733
15. O. Kemmei. Патент EP №3825040A1. 2021.05.26
16. K.S. Sista, A.P. Moon, S. Agrawal, B. M. Pirjade, S. Dwarapudi, Trans. Indian Inst. Met., **77**, 889, (2024). DOI: 10.1007/s12666-023-03199-3
17. T. Shaolong, L. Chenglong, H. Haifu. Патент CN №104874806A. 2015.09.02
18. J. Wei, L. Wenbo, Z. Yi. Патент CN №109234767B. 2021.01.15
19. P. B. Kemp, Jr. Walter, A. Johnson. Патент US №4711661A. 1987.12.08
20. Y. Masahiro, I. Kenichi, E. Atsushi, M. Yoshiyuki, Y. Takahiro. Патент EP №3560637B1. 2023.01.02
21. N.P. Sleptsova, A.N. Krasnov, V.V. Ivashchenko, Powder Metall Met. Ceram., **4**, 871 (1965). DOI: 10.1007/BF00773688

Электронно-циклотронный резонансный разряд высокой плотности, поддерживаемый излучением гиротрона, для генерации интенсивных пучков многозарядных ионов

Скалыга В. А.¹, Выбин С.С.¹, Голубев С.В.¹, Изотов И.В.¹, Поляков А.В.¹, Разин С.В.¹, Смагин Д.М.¹

¹ИПФ РАН

e-mail: skalyga@ipfran.ru

Развитие исследований в области физики тяжелых ионов и синтеза сверхтяжелых элементов, совершенствование методов и технологий ускорения пучков заряженных частиц, новые горизонты ядерной и квантовой физики непрерывно ставят амбициозные задачи в сфере разработки ионных источников с ранее недоступными характеристиками. Среди наиболее ярких актуальных проектов можно отметить такие, как Фабрика сверхтяжелых элементов в Объединённом институте ядерных исследований в Дубне и Heavy Ion Accelerator Facility (HIAF) в Китае. В зависимости от конкретного эксперимента требуется генерация пучков многозарядных ионов (МЗИ) вплоть до урана с зарядом до +40 и током до 1 мА. Существующие сегодня источники МЗИ не в состоянии удовлетворить всем требованиям и обеспечить столь высокий ток ионов с подобным зарядом. Решения задач дальнейшего увеличения тока и заряда частиц при сохранении высокого качества пучков являются критически важными в целом ряде экспериментов.

Один из подходов к созданию (совершенствованию) требуемых источников МЗИ связан с использованием сильноточного квазигазодинамического источника многозарядных ионов. Такой источник был предложен авторами и создан в ходе исследований ЭЦР источников МЗИ на основе простых магнитных ловушек с нагревом микроволновым излучением гиротронов с частотой вплоть до 75 ГГц и мощностью в сотни кВт. Использование мощного коротковолнового излучения гиротронов позволило получать плазму с плотностью до 10^{14} см⁻³, что обеспечило переход к квазигазодинамическому режиму удержания плазмы с малым временем жизни (несколько десятков микросекунд) и, соответственно, получать потоки плазмы с эквивалентной плотностью до 10 А/см². Была продемонстрирована возможность использования такого режима для получения ионных пучков с высоким током и низким эмиттансом [1, 2]. Новая концепция генерации сильноточных пучков МЗИ заключается в использовании квазигазодинамического ионного источника в сочетании с линейной системой предварительного ускорения (до энергий порядка 1 МэВ) и дополнительной твердотельной системой «обдирки» (фольги — стриппера). Оценки показывают, что ток 1 мА тяжелых ионов с зарядом +40 может быть достигнут при дополнительной «обдирке» пучка с зарядом от +10 до +20 и током 10 мА.

Для проведения данных исследований в Институте прикладной физики РАН используется установка SMIS 37/75 после ее существенной модернизации. В докладе представлены текущие результаты данной экспериментальной работы. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №24-19-00263.

Список литературы

1. Skalyga V.A., Sidorov A.V., Izotov I.V., Razin S.V. et al, Ion beam formation in a gas-dynamic electron cyclotron resonance ion source, Review of Scientific Instruments, 77, 03A341, 2006. <https://doi.org/10.1063/1.2173966>
2. Skalyga V.A., Zorin V.G., Izotov I.V. et al, Gasdynamic ECR Source of Multicharged Ions Based on a Cusp Magnetic Trap, Plasma Sources Science and Technology, 15, 727-734, 2006. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/15/4/017>

Численный эксперимент применения плазменного плавления для производства чистого алюминия

*А. С. Мустафаев*¹, Н. А. Буковецкий¹, В. С. Сухомлинов², Р. С. Смердов¹, А. В. Суров³

¹Санкт-Петербургский Горный университет императрицы Екатерины II

²СПбГУ.

³ИЭЭ РАН

e-mail: bukovet@yandex.ru

В настоящее время в мировой алюминиевой промышленности преобладает единственный способ производства алюминия – электролитическое получение алюминия из криолит-глиноземного расплава методом Эру-Холла. Основным сырьем для производства алюминия и его сплавов является глинозем, который производится из бокситов или нефелинов. Несмотря на ряд существенных мероприятий по модернизации метода, технология электролитического получения алюминия имеет ряд недостатков: низкий энергетический КПД 40–50%; высокий расход электроэнергии (14–18 кВт•ч/кг Al); загрязнение окружающей среды парниковыми газами и перфторуглеродами; высокие трудозатраты и материалоемкость.

В связи с непрерывным развитием технологического уровня промышленности возникает острая необходимость в разработке и применении материалов с заданными физико-химическими свойствами, в том числе и чистого алюминия. Традиционные методы не способны достичь требуемой уровни чистоты материала. В этой связи возникла необходимость внедрения разработок, связанных с высокотемпературными процессами, в том числе в области плазменных технологий.

Проведен численный эксперимент процессов плазменного плавления и последующего восстановления оксида из алюминия в двухкамерном реакторе. При электролитическом восстановлении алюминия на жидком катоде использован неизотермический метод, который основывается на постоянной скорости нагрева расплава белого корунда в регулируемом плазменном потоке, т.е. при существовании линейной зависимости между временем и температурой.

Опыты для регистрации ключевых исходных параметров для моделирования проведены при помощи плазматрона ПСД-07 с использованием направленной плазменной дуги (регулируемый плазменный поток) при скорости нагрева 10, 20 и 40°C/мин в интервале

температур от 1100 до 2400°C. В проведенных опытах была использована проба из расплавленного глинозема марки Г00.

Полученные математические модели позволяют создать алгоритм процесса восстановления первичного алюминия на жидком катоде до металлизированного состояния в заданном интервале температур и времени. Это создает предпосылки для внедрения новой плазменной технологии производства алюминия в промышленность.

Список литературы

1. Патент РФ 2 529 264. Бажин В. Ю., Фещенко Р. Ю., Патрин Р. К., Власов А. А. Дата подачи заявки: 09.08.2013. Способ получения алюминия. Патентообладатель ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».
2. S.J. Schneider, C.L. McDaniel. Effect of Environment Upon the Melting Point of Al_2O_3 JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry Vol. 71 A, No. 4, July-August 1967. P. 324- 332.
3. Костюков А.А., Киль И.Г., Никифоров В.П., Вольфсон Г.Е., Рапопорт М.Б., Цыплаков А.М., Гупало И.П., Штерн В.И. Справочник металлурга по цветным металлам //Производство алюминия. -М: Металлургия. 1971. 239 с.
4. Kison V. E., Mustafaev A. S., Sukhomlinov V. S. Development of a new plasma technology for producing pure white corundum / Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, № 3, V 21, 2021. pp. 380 - 385.

Численное и экспериментальное исследование характеристик плазменного актуатора с логарифмическим распределением электродов

Жарков Я. Е.¹, Воеводин В.В.¹, Коржова О.И.¹, Хомич В.Ю.¹, Ямщиков В.А.¹

¹Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия

e-mail: yarik77794@mail.com

Плазменные актуаторы (ПА) нашли применение в различных областях науки и техники [1, 2]. В частности, их использование в задачах управления газовыми потоками [3] является перспективным направлением исследований, что обусловлено ключевыми преимуществами ПА: отсутствием движущихся частей, высокой локализацией воздействия и скоростью генерации объемных сил. Перечисленные характеристики позволяют использовать ПА в задачах управления пограничным слоем посредством поверхностного барьерного разряда (ПБР), который отличается от других типов высокой локализацией воздействия на газ вблизи поверхности.

Тем не менее, КПД ПА ПБР классической топологии (высоковольтный электрод – диэлектрический слой – заземленный электрод) не превышает 0,01-0,2% [4] из-за влияния поверхностного заряда на диэлектрике, кратно снижающего среднюю напряжённость электродной системы, что также ограничивает скорость генерируемого газового потока до 1-2 м/с. С целью улучшения характеристик ПА применяют многоэлектродные (многоэлектродные) актуаторные системы (МАС). Такая модификация позволяет достичь каскадного

ускорения ЭГД потока и скорости до 7 м/с [5]. Использование дополнительных электродов, увеличивающую тангенциальную по отношению к диэлектрическому барьеру составляющую электрического поля также позволяет увеличить эффективность генерации объёмных сил [6].

Настоящая работа посвящена разработке, численному и экспериментальному исследованию электрических и гидродинамических характеристик ПА ПБР с логарифмическим распределением электродов, создающую тангенциальную составляющую напряженности электрического поля (ПА ПБР-Т). Разработка конструкции ПА производилась с использованием методов численной оптимизации и применением кросс-программного взаимодействия *COMSOL Multiphysics* и *Matlab*. Были проведены экспериментальные исследования характеристики генерируемого ПА ПБР-Т ЭГД потока в одиночной и МАС конфигурациях, определены диапазоны рабочего напряжения, средняя энергия разряда при периодическом приложении напряжений различной формы, а также определены характеристики удельной тяги и эффективности её генерации. Проведено численное исследование развития разряда с применением МКЭ, направленное на определение различий пространственных распределений объёмных сил ПА ПБР-Т и ПА ПБР классической топологии.

Представлено сравнение результатов ПА ПБР-Т с классической топологией ПА ПБР и сделан вывод, что разработанная конструкция обладает повышенной эффективностью генерации объёмных сил, которое обеспечивается увеличением средней тангенциальной составляющей электрического поля. Полученные результаты показывают перспективность дальнейших исследований и совершенствование конструкции разработанного ПА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития, соглашение № 075-15-2024-558).

Список литературы

1. Li G., Zhang H., Yan W. Control of the coherent structure dynamics of a film cooling flow by plasma aerodynamic actuation // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2019. – Vol. 137. P. 434–445.
2. Iranshahi K. et al. Electrohydrodynamics and its applications: Recent advances and future perspectives // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2024. – Т. 232. December 2023. С. 125895.
3. Khomich V. Y., Malanichev V. E., Rebrov I. E. Electrohydrodynamic thruster for near-space applications // *Acta Astronautica.* – 2021. – Т. 180. – С. 141-148.
4. Forte M. et al. Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control // *Experiments in fluids.* – 2007. – Т. 43. – С. 917-928.
5. Opaits D. et al. Improving thrust by suppressing charge build-up in pulsed DBD plasma actuators // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – 2009. – С. 487.

Структура и физические свойства высокотемпературной пьезокерамики $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3$, модифицированной самарием

Гук Е. Г.¹, Е.П. Смирнова¹, В.Н. Климов², П.А. Панкратьев¹, Н.В. Зайцева¹, Е.Е. Мухин¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НИЦ «Курчатовский институт»

e-mail: elgrguk@gmail.com

Высокотемпературная пьезоэлектрическая керамика востребована в различных областях науки и техники при эксплуатации в экстремальных температурных условиях. Наиболее жесткие требования предъявляются к этим материалам при их использовании в качестве пьезодвигателей в рамках проекта ИТЭР, то есть в условиях термоядерной плазмы с флюенсом быстрых нейтронов ($E > 0.1$ MeV) превышающим 10^{19} н/см² при 250–300°C. Этим требованиям удовлетворяет высокотемпературная пьезокерамика на основе твердого раствора $0.36\text{BiScO}_3\text{-}0.64\text{PbTiO}_3$ (BSPT) с высокой температурой Кюри ($T_C \sim 450^\circ\text{C}$), высоким значением пьезомодуля d_{33} , вплоть до 525 pC/N, и радиационной устойчивостью в предлагаемых условиях эксплуатации [1,2].

Поиски новых составов с улучшенными диэлектрическими и пьезоэлектрическими параметрами направлены, в частности, на изучение легирования свинец-содержащих пьезокерамических материалов редкоземельными элементами (РЗЭ). Модификация лантаном, церием, европием и др. приводит к значимому увеличению диэлектрической проницаемости ϵ , пьезомодуля d_{33} , коэффициента электромеханической связи k_p , упругих констант S этих материалов. Однако попытки перенести эти достижения на BSPT не показали существенных результатов. Легирование твердых растворов на базе BSPT показало, что частичная замена Bi как на La, так и на Ce, слабо влияет на кристаллическую структуру керамики, но вызывает заметное снижение температуры T_C . Особое положение занимает Sm, модификация которым Pb-содержащей пьезокерамики приводит к повышению пьезомодуля d_{33} [3,4]. Важно, что этот эффект проявляется уже при малых концентрациях Sm, когда снижение T_C еще незначительно.

Целью наших исследований являлся синтез керамики на основе BSPT с улучшенными пьезоэлектрическими свойствами при сохранении остальных физических параметров и

возможности использования модифицированного состава пьезокерамики BSPT для разработки пьезодвигателей, пригодных для работы в условиях ИТЭР.

Были синтезированы твердые растворы состава $(\text{Bi}_{0,36-x}\text{Sm}_x)\text{ScO}_3-0,64\text{PbTiO}_3$ (BSSPT). Содержание в них Sm варьировалось в пределах ($x=0.005-0.02$), при введении в шихту тремя различными способами: 1) в исходную смесь оксидов в количестве x , соответствующем стехиометрии BSSPT; 2) в исходную смесь в качестве избытка в количестве x , 3) в состав шихты после кальцинации, в качестве избытка в количестве x . Образцы BSSPT были синтезированы с использованием как одностадийного, так и двухстадийного методов обжига. Оптимальный температурный режим синтеза был определен с использованием дериватографа TGA/DSC/1600HF. Исследовалась кристаллическая структура твердых растворов (дифрактометр ДРОН-3). Особенности микроструктуры, включая распределение зерен по размерам, были исследованы на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira. Температурные зависимости диэлектрических свойств до температуры 500°C были получены с помощью моста переменного тока P5079. Пьезомодуль d_{33} рассчитывался по величине, возникающей за счет обратного пьезоэлектрического эффекта при приложении электрического поля деформации образца, измеренной с помощью головки 01ИГПЦ. Полученные рентгенограммы показали, что образцы были однофазными и имели структуру перовскита. Зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса потерь от температуры выявили снижение T_c при введении ионов Sm, вплоть до $T_c=375^\circ\text{C}$ при $x=0.02$. Однако для оптимального состава ($x=0.008$), синтезированного двухстадийным методом, температура Кюри остается достаточно высокой ($T_c=424^\circ\text{C}$). Измеренные величины пьезомодуля варьировались вокруг среднего значения $d_{33}=400$ pC/N в зависимости от концентрации x и способа введения Sm в кристаллическую решетку. В то же время для состава BSSPT с $x=0.008$ d_{33} стабильно достигала величины 536 pC/N, что превосходит максимальное значение для нелегированного самарием BSPT ($d_{33}=525$ pC/N). Обсуждаются кристаллохимические аспекты влияния модификации самарием твердого раствора BSPT на физические свойства синтезированной пьезокерамики.

Список литературы

1. Е.П. Смирнова, В.Н. Климов, Е.Г. Гук, П.А. Панкратьев, Н.В. Зайцева, А.В. Сотников, Е.Е. Мухин. ФТТ **65**, 11, 1971 (2023).
2. Е.Г. Гук, Е.П. Смирнова, В.Н. Климов, П.А. Панкратьев, Н.В. Зайцева, А.В. Сотников, Е.Е. Мухин. ФТТ **66**, 8, 1397 (2024).
3. C. Li, B. Xu, D. Lin, S. Zhang, L. Bellaiche, Th. R. ShROUT, and F. Li. Pys. Rev. **B 101**, 140102(R) (2020).
4. H. Zhou, S. Yang, Z. Xi, S. Dong, F. Guo, W. Long, X. Li, P. Fang, Z. Dai. J Mater Sci **56**, 12121 (2021).

Твердотельные охлаждающие устройства на основе многослойного активного электрокалорического регенератора

Мишинёв М. А.¹, Еськов А.В.¹, Анохин А.С.^{1,2}, Антонова А.С.¹, Семенов А.А.¹

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²Университет ИТМО

e-mail: mamishnev@gmail.com

Твердотельные охлаждающие устройства на основе активного магнито/электрокалорического регенератора (АМР и АЭР) являются привлекательной альтернативой обычным парокompрессионным и термоэлектрическим системам охлаждения [1]. Работа подобных регенераторов основана на магнито/электрокалорическом эффекте (МКЭ, ЭКЭ) — то есть на явлении обратимого изменения температуры ферромагнитных и сегнетоэлектрических материалов в адиабатических условиях при изменении напряженности магнитного или электрического поля. Недостатки АМР являются сложность реализации переменных магнитных полей большой величины, дороговизна материалов. Устройства на основе АЭР лишены данных недостатков. Основными преимуществами устройств на основе АЭР, является простота приложения и модуляции внешнего электрического поля, низкая стоимость и возможность микроминиатюризации для охлаждения отдельных компонентов электронных микросхем [2]. Одним из путей повышения эффективности охлаждающих устройств на основе АЭР является создание многослойных активных регенераторов. Многослойные АЭР, в отличие от традиционных однослойных систем используют структуры с чередующимися слоями из материалов, различающихся по температуре фазового перехода (T_C). Такая архитектура позволяет оптимизировать распределение температурного градиента вдоль регенератора, увеличивая эффективность теплопереноса. Благодаря многослойной структуре появляется возможность реализации квазинепрерывного термодинамического цикла за счет последовательной активации слоев, что позволяет увеличить перепад температур (T_{span}), повысить удельную холодопроизводительность и КПД системы.

Наибольшее число исследований по многослойным активным регенераторам было проведено для прототипов, работающих на магнитокалорическом эффекте. Отдельные экспериментальные и модельные результаты в работах [3-6] показали, что увеличение числа активных элементов с разной температурой Кюри, приводит к росту производительности устройства. Ключевой проблемой при разработке многослойных регенераторов является необходимость точного подбора слоев с определенными температурами фазового перехода, что трудно реализуемо в АМР с использованием магнитных материалов. В случае активного электрокалорического регенератора проблема подбора состава элементов легко решается при помощи существующих и хорошо изученных сегнетоэлектрических твердых растворов.

В данной работе проведено теоретическое исследование влияния температуры фазового перехода отдельных элементов многослойного электрокалорического регенератора, на

его производительность. Для целей исследования была разработана компьютерная модель на основе метода конечных элементов. Показано, что существует оптимальное соотношение температур Кюри между элементами, обеспечивающее наибольшую эффективность с точки зрения максимально достижимого температурного перепада и холодопроизводительности.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSEE – 2025-0014).

Список литературы

1. Greco A., Masselli C. Electrocaloric cooling: A review of the thermodynamic cycles, materials, models, and devices //Magnetochimistry. – 2020. – Vol. 6. – P. 67.
2. Zhang T. et al. An electrocaloric refrigerator with direct solid to solid regeneration //Applied Physics Letters. – 2017. – Vol. 110. – №. 24.
3. Engelbrecht K., Bahl C. R. H., Nielsen K. K. Experimental results for a magnetic refrigerator using three different types of magnetocaloric material regenerators //International Journal of refrigeration. – 2011. – Vol. 34. – №. 4. – P. 1132-1140.
4. Aprea C., Greco A., Maiorino A. A numerical analysis of an active magnetic regenerative refrigerant system with a multi-layer regenerator //Energy conversion and management. – 2011. – Vol. 52. – №. 1. – P. 97-107.
5. Tusek J. et al. Experimental comparison of multi-layered La–Fe–Co–Si and single-layered Gd active magnetic regenerators for use in a room-temperature magnetic refrigerator //International journal of refrigeration. – 2014. – Vol. 37. – P. 117-126.
6. Yuan L., Qian S., Yu J. Numerical study on the multi-layered magnetocaloric regenerators //Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 204. – P. 118001.

Диэлектрические свойства пленок 2-метилбензимидазолперхлората $C_8H_8N_2HClO_4$ в кристаллической, жидкокристаллической и фазе ионной жидкости.

Балашова Е. В.¹, Кричевцов Б.Б.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: balashova@mail.ioffe.ru

В настоящее время большой интерес вызывают исследования физических свойств ионных жидких кристаллов (ИЖК) и ионных жидкостей (ИЖ), что связано с перспективностью их использования в различных областях техники [1,2]. Важными характеристиками ИЖ и ИЖК являются их диэлектрические свойства и влияние на них постоянного электрического поля. Целью данной работы было изучение диэлектрических свойств пленок 2-метилбензимидазолперхлората $C_8H_8N_2 \times HClO_4$ ($MBI \times HClO_4$) в фазах ионного кристалла, ИЖК и ИЖ.

Кристаллы $MBI \times HClO_4$ образованы из катионов - протонированных молекул MBI ($MBI + H^+$) и анионов - тетраэдров ClO_4^- . В расплавленном состоянии при $T = 430$ К эти

ионы образуют ИЖ [3,4], а между этими состояниями реализуется промежуточная фаза, которую, как показали исследования, можно отнести к ИЖК [4].

Пленки $\text{MBI} \times \text{HClO}_4$ синтезировались методом испарения при комнатной температуре из водного раствора $\text{MBI} \times \text{HClO}_4$ на подложках сапфира Al_2O_3 . Предварительно для проведения диэлектрических измерений на подложки методом фотолитографии наносились система встречно-штыревых электродов (ВШЭ) из золота с расстоянием между электродами 50 μ .

Исследования фазовых трансформаций в пленках при изменении температуры регистрировались с помощью поляризационного микроскопа. Одновременно проводились измерения емкости C , диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ и проводимости s между ВШЭ в частотном диапазоне $f = 25 - 10^6$ Hz при постоянной температуре с помощью измерителя иммитанса E7-20 или при медленном изменении температуры с помощью LCR meter MIT 9216A в температурном интервале 295-440 К. Постоянное электрическое напряжение U величиной до 4 V прикладывалось к электродам ВШЭ. Амплитуда измерительного поля составляла 0.1 V. Частотные зависимости мнимой ϵ'' и действительной ϵ' частей эффективной диэлектрической проницаемости, а также, комплексного импеданса анализировались в рамках релаксационных моделей.

При комнатной температуре емкость образцов $\text{MBI} \times \text{HClO}_4/\text{ВШЭ}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ($C \sim 20$ pF) определяется в основном подложкой Al_2O_3 и не зависит от электрического поля. При переходе в фазу ИЖК и далее в фазу ИЖ, происходит увеличение емкости, вносимой пленкой, на 5 порядков ($C \sim 0.1$ μ F) и проводимости s на 7 порядков. Проводимость по постоянному току (s_{DC}) в фазах ИК, ИЖК и ИЖ определяется энергиями активации $E_a = 0.94, 1.92$ и 0.35 eV, соответственно. На низких частотах $f < 1$ kHz в фазе ИЖ наблюдается уменьшение проводимости, вызванное явлениями приэлектродной поляризации. Диаграмма Найквиста $Z_2(Z_1)$ демонстрирует релаксационное поведение носителей заряда, а также вклад, связанный с двойным электрическим слоем.

Приложение напряжения $U = 1-2$ V к электродам ВШЭ в ИЖ и ИЖК фазах приводит к небольшому увеличению емкости и проводимости, не меняя характера частотного поведения ϵ , $\text{tg} \delta$ и s , а также вид диаграмм Найквиста и Cole-Cole. При увеличении напряжения до $U = 3$ V емкость C и s_{DC} уменьшаются на порядок и слабо изменяются при дальнейшем увеличении напряжения до 4 V. При этом в диапазоне $f = 10^3-10^6$ Hz превалирует проводимость по переменному току s_{AC} , а область DC проводимости смещается в область $f < 1$ kHz. При приложении электрического поля в пленке проявляется слабая диэлектрическая релаксация с постоянной времени t примерно 10^{-5} s, как следует из анализа диаграмм Cole-Cole и частотных зависимостях мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости.

Основным результатом данной работы является определение диэлектрических параметров структур $\text{MBI} \times \text{HClO}_4/\text{ВШЭ}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в фазах ИЖК и ИЖ и наблюдение влияния электрического поля на их диэлектрические характеристики, что открывают перспективы для создания на основе таких структур элементов питания.

Список литературы

1. D. R. MacFarlane, et. al.. Energy applications of ionic liquids Energy Environ. Sci. 2014, 7, 232; <https://doi.org/10.1039/C3EE42099J>
2. K. Binnemans. Ionic Liquid Crystals. Chem. Rev. 2005, 105, 4148-4204. doi: 10.1021/cr0400919
3. E.Balashova et al. Materials 2023, 16, 1994. <https://doi.org/10.3390/ma16051994>
4. Е.В. Балашова, А.А. Левин, Б.Б. Кричевцов. Письма в ЖТФ, 2024, 50 (24), 84-88. DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59447.6466k.

Атомная физика и физика элементарных частиц

Поиск неупругого рассеяния частиц темной материи на ядрах ^{83}Kr с возбуждением низколежащего ядерного уровня.

Derbin A. ¹, И.С.Драчев¹, Ю.М.Гаврилюк², А.М.Гангапшев², В.В.Казалов², В.В.Кузьминов², В.Н.Муратова¹, Д.А. Семенов¹, Д.А.Текуева², М.В. Трушин¹, Е.В.Унжаков

¹Петербургский институт ядерной физики НИЦ КИ

²Институт ядерных исследований РАН

e-mail: *derbin_av@pnpi.nrcki.ru*

Массивные слабовазаимодействующие частицы (WIMPs) и, в частности, легчайшие суперсимметричные частицы, продолжают оставаться наиболее популярными кандидатами на роль темной материи. Большинство экспериментов, таких как Xenon, LZ, PandaX, CDMS и DarkSide направлено на поиск упругого рассеяния WIMPs на ядрах, в котором регистрируется ядро отдачи. В тоже время, существуют возможности неупругого рассеяния WIMPs с возбуждением низколежащих ядерных уровней. Несмотря на ожидаемое более низкое сечение такой реакции, очевидным преимуществом является возможность регистрации рентгеновских- и гамма- квантов, конверсионных и Оже-электронов, возникающих при разрядке ядерного уровня с определенной суммарной энергией и задержанных на время жизни уровня относительно сигнала от ядра отдачи.

В данной работе мы проанализировали энергетический спектр большого газового пропорционального счетчика, заполненного изотопом ^{83}Kr , который имеет ядерный уровень с энергией всего 9.4 кэВ. Низкофоновая установка с Кг-счетчиком расположена в Баксанской нейтринной обсерватории. Спектр был измерен в интервале (4-20) кэВ с энергетическим разрешением 420 эВ (σ). Первоначальная цель эксперимента состояла в поиске резонансного поглощения солнечных аксионов, при котором происходит возбуждение ядерного уровня ^{83}Kr с энергией 9.4 кэВ [1-3].

Функция отклика газового детектора при регистрации неупругого рассеяния представляет собой сумму сигналов от гамма-квантов и электронов, возникающих при разрядке уровня, и ядра отдачи, при этом сигнал ядра отдачи имеет большой ионизационный дефицит. Ожидаемый сигнал представляет собой гауссов с шириной близкой к энергетическому

разрешению детектора. Ожидаемое число зарегистрированных событий определяется произведением потока WIMPs, зависящего от их массы, и сечения неупругого взаимодействия. Статистически значимого пика с энергией 9.4 кэВ обнаружено не было, в результате установлены новые верхние пределы на сечение неупругого взаимодействия в зависимости от массы WIMPs.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №24-12-00046.

Список литературы

1. Ю.М. Гаврилюк, А.Н. Гангапшев, А.В.Дербин и др., Письма в ЖЭТФ, т.101, в.10, с.739 (2015)
2. Ю.М. Гаврилюк А.Н. Гангапшев, А.В.Дербин и др., Письма в ЖЭТФ, т. 107, в.10, с.617, (2018)
3. Ю.М. Гаврилюк А.Н. Гангапшев, А.В.Дербин и др., Письма в ЖЭТФ, т. 116, в.1, с.13, (2022)

Масс спектрометр легких ядер

Ларионов В. Е.¹, Васильев А. А.¹, Рождественский А. Ю.¹, Трофимов В. А.¹

¹ПИАФ

e-mail: larionov_ve@npni.nrcki.ru

Введение

Эксперимент PolFusion [1], проводимый в Петербургском институте ядерной физики, нацелен на исследование ядерного синтеза поляризованных дейтерия и дейтронов при энергиях пучков в лабораторной системе координат до 100 кэВ. Для данного процесса рассматривается два канала реакции: $^2\text{H}(d, p)^3\text{H}$ и $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$.

Использование поляризованного дейтерия в качестве топлива в термоядерных реакторах, способствует увеличению сечения реакции с образованием трития и подавлению реакции с образованием нейтронов [2]. Также использование поляризованных дейтронов приводит к асимметрии в вылете нейтронов, что требует изменений в конструкции бланкетов реактора[3]. И изучение этих каналов расширяет понимание процесса первичного нуклеосинтеза и эволюции звезд на раннем этапе их формирования.

Для данного эксперимента необходимо разработать и оптимизировать источник поляризованного дейтерия. Интенсивность атомарного пучка зависит от ряда факторов, включая поток газа, подаваемого в диссоциатор, степень диссоциации молекул дейтерия на атомы, а также температуру сопла.

Измерение профиля пучка и степени диссоциации традиционно производятся cross-beam масс-спектрометром [4, 5]. Однако, несмотря на его высокую разрешающую способность в широком диапазоне масс, применение данного устройства связано с рядом недостатков, таких как высокая стоимость приобретения и эксплуатации, а также большие габариты. В связи с этим была поставлена задача разработки специализированного масс-спектрометра

для анализа легких ядер, который бы устранил указанные недостатки и обеспечил высокую точность измерений.

Фильтр Вина

Фильтр Вина представляет собой устройство, использующее взаимноперпендикулярные электрическое (E) и магнитное поля (B) для селекции заряженных частиц по их скоростям. На движущуюся заряженную частицу в таких полях сила Лоренца. Условие равновесия сил выражается формулой: $v = E/B$.

Ионы с другими скоростями отклоняются и не достигают детектора. Таким образом, Вин-фильтр позволяет разделять ионы по их скоростям, что эквивалентно разделению по массам, так как:

$$v = \sqrt{2qU / m}$$

где U — ускоряющее напряжение, а m — масса иона.

В детекторе регистрируется ионный ток, формируемый ионами, пролетевшим фильтр Вина. Данный ток пропорционален количеству ионов, прошедших через фильтрующую систему, что позволяет количественно оценить их концентрацию.

Разрешающая способность Вин-фильтра

Разрешающая способность фильтра определяется соотношением:

$$R = m / dm \sim v / dv$$

где dm — минимальная разница масс, которую можно различить, а dv — соответствующая разница скоростей. Для повышения разрешающей способности необходимо минимизировать величину dv . Минимизация достигается за счет повышения точности позиционирования электродов, уменьшения краевых эффектов и увеличения однородности полей.

Основные элементы прибора были напечатаны на фотополимерном принтере, что позволило достичь высокой точности позиционирования компонентов прибора. Для улучшения однородности электрического поля в промежутке между электродами фильтра был добавлен промежуточный электрод.

Магнитное поле создается с помощью набора неодимовых магнитов, закрепленных на ферромагнитной пластине, что обеспечивает однородность поля на уровне 0.5%. Уменьшение краевых эффектов достигается за счет узкой выборки апертуры пучка: диаметр пучка, влетающего в фильтр Вина, составляет 3 мм, а сечение рабочей области равно $20 \times 25 \text{ мм}^2$.

Измерение масс осуществляется методом сканирования по напряжению. Напряжение на обкладках варьируется в диапазоне от 57 В (для ионов H^+) до 20 В (для ионов Li^+) с дискретным шагом 0.1 В. При этом обеспечивается стабилизация напряжения с точностью 0.01 В.

Все вышеизложенные особенности конструкции и методики измерений позволяют достичь разрешающей способности в диапазоне легких масс, сопоставимой с характеристиками cross-beam масс-спектрометра

Заключение

Применение масс спектрометра легких ядер в рамках эксперимента PolFusion позволило измерить степень диссоциации молекулярного дейтерия с точностью лучше 1% и начать цикл работ по увеличению степени диссоциации.

Разрабатываемый масс-спектрометр может быть применен в следующих областях:

1. Мониторинг плазмы в термоядерных установках (ТОКАМАК) [7].
2. Измерение степени диссоциации в источниках поляризованных атомов и ионов [8].
3. Масс спектрометрический анализ газа на присутствие набора легких атомов и молекул.

Данная работа включает разработку и оптимизацию как отдельных узлов масс-спектрометра, так и всей конструкции в целом.

Список литературы

1. Project on Research of Nuclear dd Synthesis with Polarization of Initial Particles at Low Energies (PolFusion) / A. Yu. Rozhdestvenskij, A. V. Andreyanov, A. A. Vasilyev [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Vol. 87, No. 3. – P. 224-229. – DOI 10.1134/S1063778823600689. – EDN CGPWFM.
2. Theor.: G. Hupin et al. Nature Com. 10, 321 (2019)
3. W.Yang, G.Li, X.Gong, X.Gao, X.Li, H.Li... Effect of the Fusion Fuels' Polarization on Neutron Wall Loading Distribution in CFETR (2021)
<https://doi.org/10.1080/15361055.2021.1969064> (China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR))
4. M. Mikirtychyants, R. Engels, K. Grigoryev [et al.] /The polarized H and D atomic beam source for ANKE at COSY-Jülich // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2013. – Vol. 721. – P. 83-98. – DOI 10.1016/j.nima.2013.03.043. – EDN RFBZSX.
5. A. Nass, B. Braun, A. Golendukhin [et al.] /The HERMES polarized atomic beam source // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Vol. 505. – No 3. – P. 633-644. – DOI 10.1016/S0168-9002(03)00986-0. – EDN MEFHUB.
6. T. Wise et al., Nucl. Instr. Meth. A 556, 1 (2006)
7. АРУЕВ Н. Н. ПРИМЕНЕНИЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС М2 // МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ. 2023.
8. A.N. Solovev et al. Источник поляризованных ионов SPI, поляриметры низких энергий (Октябрь 2024) Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

Физика влияния вихрегенера́тора на обтекание крыла с тянущим воздушным винтом

Багдади М. К., Павленко О.В., Раздобарин А. М.

МФТИ

e-mail: m.khir.baghdadi@gmail.com

Воздушный тянущий винт, обдувая крыло самолета, создает неоднородное поле течения на поверхности крыла, которое оказывает негативное влияние на его аэродинамические характеристики. Для ослабления этого влияния можно использовать пассивные методы воздействия на обтекание крыла. Одним из известных методов такого воздействия является применение вихрегенера́тора. Вихрегенера́тор представляет собой специальное устройство, которое создает продольные вихри для усиления обмена количеством движения между пристеночной и внешней частью пограничного слоя [1].

Пример использования такого вихрегенера́тора был представлен в работе [2]. Настоящая работа является продолжением этого исследования, но рассматривает обтекание модели крыла большего размаха с тянущим воздушным винтом в потоке без влияния границ стенок аэродинамической трубы.

Численное исследование проведено на модели прямого крыла с удлинением $l = 5$ с тянущим воздушным винтом с частотой вращения $N = 10000$ об./мин. в диапазоне углов атаки $\alpha = -20^\circ, 20^\circ$. Расчеты проведены по программе, основанной на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса при числах $M = 0.12$ и $Re = 0.7 \times 10^6$.

Результаты расчетов демонстрируют, что применение вихрегенера́тора на данной модели крыла уменьшает область отрыва потока и уменьшает сопротивление во всем расчетном диапазоне углов атаки. Представлено объяснение физическим процессам инициированным генератором вихрей и его влиянию на обтекание крыла.

Список литературы

1. Брутян М.А., Волков А.В., Вышинский В.В. Основы вычислительной аэродинамики / Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского. – М. : Наука, 2024. – 356 с.
2. Павленко О.В., Раздобарин А.М., Багдади М.К. Численные исследования улучшения обтекания крыла с тянущим воздушным винтом // Журнал технической физики, изд. Иоффе, Аэро-, гидро-динамика, С. 2094-2098.

Численное моделирование для определения рабочего диапазона скоростей газа и температуры стабилизации термоанемометрического датчика расхода газа

Кошелев В. А.¹, Демин Г. Д.¹, Дюжев Н.А.²

¹МИЭТ, ²ЦКП МСТ и ЭКБ (МИЭТ)

e-mail: 90znh06@gmail.com

Современные системы газоснабжения, применяемые в медицинской и лабораторной технике нуждаются в точной и качественной системе подсчёта газа.^{1'2'3'4'5} В исполнение указанной задачи применяют различные типы датчиков расхода газа, использующие широкий спектр эффектов связанных как с механическим воздействием масс газа (мембранные и пьезодатчики), так и с теплопереносом в потоке газа (термометрические датчики).³

В статье проведен анализ моделей датчика расхода газа с двумя видами чувствительного элемента. Оценен расход питания необходимый для работы датчика расхода газа в диапазоне скоростей от 0 до 20 м/с.

Устройство может быть встроено в системы медицинского газоснабжения для расчета скорости и объема потока воздуха, вследствие замера изменения сопротивления чувствительного элемента под действием скорости потока.

Кроме того датчик расхода газа актуален для решений технических задач связанных с проведением экспериментов, где необходима подача точного объёма газа, поскольку схема подразумевает совершенствование электронной части для проведения аналогового вычисления объема поданного газа, основываясь на скорости проходящего потока.¹

Тепловой датчик массового расхода газа по П1, *отличающийся тем, что* измерительный мост схемы обработки сигнала чувствительного элемента составлен из двух плеч, одно из которых состоит из термомоста, замкнутые входы которого подключены к пассивному резистору и инверсному входу операционного усилителя, другое плечо состоит из терморезистора на корпусе чувствительного элемента и пассивных резисторов, точка соединения пассивного резистора и терморезистора на корпусе чувствительного элемента подключена к прямому входу операционного усилителя, выход усилителя подключен к точке соединения пассивных резисторов плеч измерительного моста и поддерживает напряжение его питания таким, что измерительный мост находится в равновесии и обеспечивается постоянный перепад температуры между корпусом чувствительного элемента и термомостом на его диафрагме, при этом напряжение питания измерительного моста повышается при увеличении теплоотвода от термомоста на диафрагме и, таким образом, зависит от потока газа над диафрагмой чувствительного элемента.

Кроме моделирования также была проведена верификация результатов моделирования на экспериментальном образце. На основании проведённого исследования заключено, что рабочий линейный диапазон для представленной конструкции ограничен 10 м/с. При

дальнейшем увеличении наблюдается расхождение с экспериментом, причина которого вероятно заключается в ряде физических эффектов, неучтённых текущей моделью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-15-2021-1350 от 5 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0004).

Список литературы

1. Окулов Р. А. и др. Моделирование и экспериментальное исследование влияния давления в системе подачи газа плазменной установки на скорость потока //Инженерный вестник Дона. – 2024. – №. 8 (116). – С. 48.
2. В.Т. Рябов, Н.А. Дюжев. Исследование теплового МЭМС-сенсора массового расхода газа. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 3–4. С. 216–221.
3. F. Ejeian, et al. Design and applications of MEMS flow sensors: a review. Sens. Actuators A: Phys., 295, pp. 483-502, 2019.
4. N.A. Djuzhev, V.T.Ryabov, G.D. Demin et al. / Sens. Actuator A 330, 112832, 2021
5. V. Koshelev et al, Finite-Element Simulation of the Performance of a Temperature-Compensated Membrane-Based Thermal Flow Sensor // Russian Microelectronics, 2023, Vol. 52, Suppl. 1, pp. S115–S120. © Pleiades Publishing, Ltd., 2023.

Приближенно-аналитическая модель ударно-волновой структуры течения с нерегулярным взаимодействием встречных скачков уплотнения и импульсным энерговыделением на главном скачке

Чернышов М. В.¹, Лаптинская М.М.¹

¹БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова

e-mail: mvcher@mail.ru

В течениях газов и газовых смесей в сопловых каналах, струях, воздухозаборниках летательных аппаратов, совершающих полёты с большой сверхзвуковой скоростью, формируются разветвленные ударно-волновые структуры скачков уплотнения и других газодинамических разрывов. Ярким и широко распространенным примером такой ударно-волновой структуры является тройная конфигурация скачков уплотнения, образующаяся, в частности, при маховском отражении или при нерегулярном взаимодействии («несимметричном отражении») встречных скачков.

Тангенциальные разрывы, исходящие из тройных точек конфигураций симметричного или несимметричного маховского отражения, разделяют набегающий поток на области существенно (порой – в разы и десятки раз) различными параметрами течения. В частности, поток за отраженными скачками в большей степени сохраняет своё давление торможения, а поток за главным (маховским) скачком – обладает заметно большей температурой.

В настоящее время отечественные и зарубежные математические модели [1, 2], позволяющие быстро оценить параметры ударно-волновых структур, образующихся при маховском отражении или нерегулярном взаимодействии встречных скачков в потоке совершенного газа, достигли известной степени совершенства (например, при оценке размеров главного скачка, или при локализации тройных точек). Впоследствии эти модели и методы были обобщены на случай симметричного маховского отражения с импульсным энерговыделением и изменением химического состава газовых смесей на главном скачке ввиду детонационных и других высокотемпературных эффектов [3]. Проанализировано смещение известного критерия фон Неймана смены типа отражения косых скачков, а также увеличение размеров главного скачка вследствие энерговыделения и уменьшения показателя адиабаты газовой смеси. Предложено использовать результаты проведенного анализа при газодинамическом проектировании реактивных двигателей комбинированного типа [4].

В настоящей работе впервые представлена приближенно-аналитическая модель, позволяющая оценить параметры образующейся ударно-волновой структуры и поля течения в целом при несимметричном маховском отражении (нерегулярном взаимодействии встречных скачков), если на главном (маховском) скачке импульсно происходят энерговыделение и изменение химического состава газовой смеси. Проведено сравнение ударно-волновых структур течения при наличии и отсутствии указанных эффектов, выявлены рост образующихся главных скачков и смещение критерия перехода к регулярному взаимодействию благодаря импульсному энергоподводу.

Полученные результаты могут оказаться полезными для разработки перспективных двигательных и энергетических установок беспилотных атмосферных летательных аппаратов, совершающих полеты с большой сверхзвуковой скоростью.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Создание и научное обоснование методологии аэрогазодинамического проектирования общего облика двигательных энергетических установок, технологий разработки массового производства беспилотной аэрокосмической техники для решения задач в экстремальных условиях и чрезвычайных ситуациях», № FZWF-2024-0003).

Список литературы

1. Омельченко А. В., Усков В. Н., Чернышов М. В., Об одной приближенной аналитической модели течения в первой бочке перерасширенной струи, Письма в Журнал технической физики, том 29 (6), 56-62, 2003
2. Chernyshov M. V., Savelova K. E., Kapralova A. S., Approximate Analytical Models of Shock-Wave Structure at Steady Mach Reflection, Fluids, vol. 6 (9), 305, 2021.
3. Chernyshov M. V., Savelova K. E., An Approximate Analytical Model of a Jet Flow with Mach Reflection and Pulsed Energy Supply at the Main Shock, Fluids, vol. 8 (4), 132, 2023.
4. Chernyshov M. V., Murzina K. E., Matveev S. A., Yakovlev V. V. Shock-wave structures of prospective combined ramjet engine, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 618, 012068, 2019.

Параметрические исследования взлётно-посадочной механизации магистрального самолёта на маломасштабной полумодели

Пигусов Е. А.¹, Волков А.И., Крутов А.А., Кузин С.А.

¹ЦАГИ

e-mail: *p-model@yandex.ru*

Разработка и совершенствование взлётно-посадочной механизации крыла магистрального самолета (МС) является сложной и ресурсоёмкой задачей аэродинамического проектирования. При аэродинамическом проектировании механизации крыла требуется проводить большой объём исследований по выбору рациональных параметров предкрылков и закрылков. Получившие в настоящее время распространение CFD методы не позволяют проводить параметрические исследования в широких диапазонах ввиду высоких требований к качеству расчётных сеток и большой продолжительности численного моделирования. Кроме того, для подтверждения достоверности результатов расчётных исследований требуется получение экспериментальных данных из аэродинамической трубы (АДТ). В свою очередь проведение параметрических исследований в промышленных АДТ часто недоступно ввиду высокой стоимости аэродинамической модели и испытаний. С целью существенного повышения доступности использования АДТ для параметрических исследований в рамках проектирования взлётно-посадочной механизации и отработки местной аэродинамики перспективного МС предложено использование маломасштабной полумодели, выполненной с широким применением аддитивных технологий.

В данной работе представлены результаты параметрических исследований механизированного крыла МС на маломасштабной полумодели. Испытания в АДТ проводились при скоростях набегающего потока V от 20 до 60 м/с, соответствующих числам Рейнольдса Re от 0.19×10^6 до 0.56×10^6 . Для испытанной модели получена типичная зависимость максимального коэффициента подъёмной силы $C_{ya \max}$ от числа Re , близкая к степенной, что позволяет также оценить возможные значения $C_{ya \max}$ при натурных условиях. В результате показано влияние изменения параметров взлетно-посадочной механизации на аэродинамические характеристики, а также влияние интерференции с планером. Приведено сопоставление экспериментальных и расчётных данных.

Механизмы кавитационного дробления капель аэрозоля в ультразвуковом поле

Кудряшова О. Б.¹, Шалунов А.В.², Титов С.С.², Титова Н.В.²

¹Томский государственный университет,

²БТИ АлтГТУ, Бийск

e-mail: olgakudr@inbox.ru

Дисперсность и концентрация частиц являются основными характеристиками аэрозолей, обуславливающими эффективность реализации технологических процессов. Технологические условия могут требовать поддержания определенных дисперсных и концентрационных характеристик в течение заданного времени, либо быстрое осаждение частиц. Поэтому актуальной является задача разработки методов управления этими характеристиками. Ультразвуковое воздействие может как способствовать укрупнению частиц, так и их дроблению. В теоретической работе [1] предложен критерий, определяющий преимущественный механизм воздействия ультразвука на капельный аэрозоль (дробление или коагуляция). Несмотря на то, что оба механизма теоретически могут реализоваться, чаще создаются условия для коагуляции частиц аэрозоля, а не для их дробления.

Если процессы ультразвуковой коагуляции хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально, то дробление капель аэрозоля с помощью ультразвука пока не исследовано. Между тем, ультразвуковое дробление частиц в водной среде известно и используется в технологиях гомогенизации, диспергирования порошков и т.п. Применение же ультразвука для дробления частиц в воздушной среде затруднено тем, что высоки потери мощности при передаче из воздушной среды в вещество частицы, следовательно, нужны мощные источники ультразвука и специальные способы фокусировки излучения для реализации именно дробления капель, а не их коагуляции. Такие приборы уже создаются [2], поэтому для практической реализации важно подробнее рассмотреть механизмы ультразвукового дробления капель аэрозоля. Ультразвуковое диспергирование может быть использовано на практике в технологиях, требующих высокую дисперсность аэрозолей, особенно если необходимо дополнительно диспергировать уже существующий в воздухе аэрозоль.

Данная работа имеет целью теоретически рассмотреть механизмы диспергирования капель аэрозоля в мощных ультразвуковых полях. Предложена и подробно исследуется математическая модель кавитационного разрушения капель. Предлагается три сценария разрушения капель в результате наведенной внутри них ультразвуковой кавитации. Это:

- накопление энергии ультразвука в процессе колебаний пузырька около равновесного положения;
- схлопывание пузырька с импульсным ростом температуры в нем;
- взрывной рост объема пузырька.

Реализация конкретного сценария зависит от физико-химических свойств капель, их размеров, газосодержания жидкости, интенсивности ультразвукового поля. Найдены

критические условия кавитационного разрушения в соответствии с различными сценариями и предельный (минимальный) размер получаемых капель.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00875, <https://rscf.ru/project/23-19-00875/>

Список литературы

1. О.Б. Кудряшова, А.В. Шалунов, А.Д. Абрамов, Управление дисперсностью аэрозоля с помощью ультразвука, ПМТФ, 2025 (в печати)
2. A. Shalunov, O. Kudryashova, V. Khmelev, D. Genne, S. Terentiev, V. Nesterov, Innovative Ultrasonic Spray Methods for Indoor Disinfection, *Applied System Innovation*, V. 7(6), 126-145, 2024 г.

Численные исследования уменьшения влияния неблагоприятных метеорологических условий на аэродинамические характеристики профиля крыла

Белусов И. Ю.¹, Павленко О.В.^{1,2}, С.Б. Кинса², Ёе Хтун², Февральских А. В.³

¹ЦАГИ,

²МФТИ

³МАИ

e-mail: ivan.belousov@phystech.edu

Обледенение несущих поверхностей является одним из наиболее опасных природных воздействий на летательный аппарат. Налипание льда на несущих поверхностях искажает их обводы и ухудшает аэродинамические характеристики летательного аппарата.

Известно, что температура воздуха в атмосфере неоднородна и зависит от высоты. Наиболее интенсивное обледенение наблюдается в условиях, когда температура поверхности летательного аппарата близка к температуре замерзания воды, а в воздухе содержится большое количество переохлажденных водных капель, например при полете в облаках. Известно, что наиболее интенсивное обледенение бывает при температуре от 0 до -10° С и ниже.

Проведено численное исследование влияния изменения температуры на образования льда на прямом крыле с асимметричным профилем Clark Y+. Формирование льда в расчете соответствовало условиям, когда капли воды замерзают частично при ударе, и частично растекаются. Размер капель был принят одинаковым и равным 20 микрон, содержание жидкой фазы воды в воздухе LWC = 0.05 кг/м³. Температура замерзания капель варьировалась от 0 до -14°С. Вязкость среды рассчитывалась по формуле Сазерленда в зависимости от изменения температуры.

В результате численных исследований выявлена зависимость от температуры протяженности льда по профилю крыла и его вес. Показано влияние наростшего льда на аэродинамические характеристики крыла.

Неустойчивость местных сверхзвуковых зон на профиле крыла с интерцептором

Кузьмин А. Г.¹

¹СПбГУ

e-mail: a.kuzmin@spbu.ru

В ряде численных и экспериментальных исследований показана возможность существования гистерезиса дозвукового обтекания аэродинамических профилей (профилей крыльев) при изменениях угла атаки в диапазоне от 7° до 28° [1-3]. Возникновение гистерезиса при этом связано с неустойчивостью течения на определенных режимах, на которых происходит резкий отрыв пограничного слоя от профиля или, наоборот, резкий переход к безотрывному обтеканию. Данный вид гистерезиса наблюдается также при дозвуковом обтекании аэродинамических профилей с закрылками и в течениях около 3D крыльев большого и малого удлинений [4,5].

Гистерезис другой природы был выявлен в исследованиях трансзвукового обтекания воздухом профилей с малой локальной кривизной [6-8]. Малая кривизна провоцирует формирование двух или более местных сверхзвуковых зон. Слияние и расщепление этих зон при изменениях угла атаки α или числа Маха набегающего потока M_∞ сопровождается резким изменением положения ударных волн и, как следствие, скачками подъемной силы. В частности, в [8] рассмотрено обтекание симметричного профиля с плоскими боковыми сторонами, имеющими нулевую кривизну, и дан подробный анализ физических причин возникновения неустойчивости и переходов между симметричными и несимметричными режимами обтекания при нулевом угле атаки. В работе [9] проведены расчеты турбулентного трансзвукового обтекания профиля NASA SC(2)-0710 с интерцептором (спойлером), который создает малую локальную кривизну в случае его отклонения от нейтрального положения. При числе Рейнольдса набегающего потока $Re=1,5 \times 10^7$ и отклонении интерцептора на угол $\theta=3^\circ$ получена сложная зависимость подъемной силы от числа Маха M_∞ , содержащая до четырех скачков подъемной силы.

В настоящей работе проводится исследование течения около профиля NASA SC(2)-0710 при том же угле отклонения интерцептора $\theta=3^\circ$ и меньшем числе Рейнольдса $Re=7,5 \times 10^6$. Численные решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, получены на мелких расчетных сетках с помощью вычислительной программы второго порядка точности, основанной на методе конечных объемов. Прослежена эволюция картины обтекания при отрицательных углах атаки и увеличении числа Маха M_∞ от 0,810 до 0,865. Показано, что поведение подъемной силы зависит от двух разнонаправленных факторов: 1) тенденции к расширению местных сверхзвуковых зон Z_1 и Z_2 на верхней стороне профиля вследствие увеличения в целом скорости потока вокруг профиля и 2) тенденции к уменьшению размеров Z_1 и Z_2 вследствие торможения потока у задней кромки из-за более сильного отрыва пограничного слоя от нижней стороны профиля. Возникающая неустойчивость положения зон Z_1 и Z_2 приводит к гистерезису потока в определенных диапазонах числа Маха M_∞ и угла атаки α . Ширина гистерезиса оказывается существенно большей,

чем при числе $Re=1,5 \times 10^7$, рассмотренном в [9]. Переходы между режимами с разным расположением местных сверхзвуковых зон сопровождаются скачками коэффициента подъемной силы. Проведенные расчеты позволили указать область на плоскости параметров (M_∞ , α), в которой возможны неединственные картины трансзвукового обтекания профиля. Реализация того или иного режима зависит от истории изменения M_∞ и α до выхода на заданные значения.

Работа выполнена с использованием ресурсов вычислительного центра СПбГУ (<http://cc.spbu.ru>).

Список литературы

1. Mueller T. J. The influence of laminar separation and transition on low Reynolds number airfoil hysteresis. *Journal of Aircraft*, vol. 22, No. 9, 763–770, 1985.
2. Zifeng Y., Hirofumi I., Mathew M., and Hui H. An experimental investigation on aerodynamic hysteresis of a low-Reynolds number airfoil. *AIAA Paper*, No. 2008-0315, 1–11, 2008.
3. Sereez M., Abramov N.B., Goman M. Prediction of static aerodynamic hysteresis on a thin airfoil using OpenFOAM. *Journal of Aircraft*, vol. 58, No. 2, 1–9, 2020.
4. Колин И.В., Трифонова Т.И., Шуховцов Д.В.. Временные реализации коэффициентов аэродинамических сил и моментов на прямоугольном крыле на режимах статического гистерезиса. *Журнал технической физики*, том 71, вып. 7, 128–132, 2001.
5. Колин И.В., Марков В.Г., Трифонова Т.И., Шуховцов Д.В. Гистерезис в статических аэродинамических характеристиках крыла с несимметричным профилем. *Журнал технической физики*, том 74, вып. 2, 124–127, 2004.
6. Jameson A. Airfoils admitting non-unique solutions of the Euler equations, *AIAA Paper*, No. 91-1625, 1–13, 1991.
7. Kuzmin A. Non-unique transonic flows over airfoils, *Computers and Fluids*, vol. 63, 1–8, 2012.
8. Kuzmin A. Transonic flow bifurcations over a double wedge, *Physica.SPB/2020, Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1697, Article ID 012207, 1–7, 2020.
9. Kuzmin A. Sensitivity analysis of transonic flow past a NASA airfoil/wing with spoiler deployments. *International J. of Aeronautical & Space Sci.*, vol. 15, No. 3, 232–240, 2014.

Управление сверхзвуковым обтеканием затупленного тела в зоне крепления к пластине

Лапушкина Т. А.¹, Белов К.И.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: tanyusha@mail.ioffe.ru

В работе предлагается решение проблемы возрастающих динамических нагрузок на тело, закрепленное на плоскости, при сверхзвуковом обтекании. Задача актуальная, так как рассматривает экспериментальное моделирование процесса сверхзвукового обтекания таких деталей на сверхзвуковых аппаратах, как хвостовое оперение, крыло и т.д. в области их

крепления к фюзеляжу. Проблема таких обтеканий заключается в неравномерном распределении давления на поверхности тела: в районе стыковки с поверхностью крепления давление на теле на порядок ниже, чем в более удаленных областях [1]. Такое падение происходит вследствие взаимодействия нарастающего на плоскости крепления погранслоя с головной ударно-волновой поверхностью, в результате чего образуются подковообразные газодинамические вихри [2], которые всасывая в себя газ у поверхности тела, снижают давление в области стыковки. При этом головная ударно-волновая поверхность искривляется, приближаясь к поверхности тела. Как следствие неравномерности распределения давления возникает крутящий момент [1], который увеличивает нагрузку на закрепленную деталь, в том числе и на детали на поверхности летательного аппарата. Для решения этой проблемы предлагается организация газоразрядной области у поверхности тела в районе крепления, которая будет повышать давление и отодвигать ударно-волновую поверхность, выравнивая ее профиль [3]. Исследования проводятся экспериментальными методами в газодинамическом тракте, созданном на базе ударной трубы. На оси сверхзвукового сопла помещается пластина с закрепленной цилиндрической моделью. Поверхность нарастания погранслоя порядка двадцати диаметров модели. Газовый разряд создается подачей напряжения от специальных ЛС цепочек к электродам, вмонтированным в поверхность модели вблизи области крепления к плоскости пластины. Ключом замыкания газоразрядного тока является приход к поверхности тела ионизованного сверхзвукового потока, то есть начало обтекания. Длительность и интенсивность разряда может варьироваться в широком диапазоне параметров. Основная методика – визуализация картины сверхзвукового обтекания высокоскоростным шпирен методом.

Список литературы

1. Lapushkina T.A., Kolesnik E.V., Monahov N.A., Popov P.A., Belov K.I., Features of Supersonic Flow Around a Blunt Body in the Area of Junction with a Flat Surface. *Fluids*, vol. 10, No 2, 28, 2025.
2. Keshavan N.R., Separation of Turbulent Boundary Layer on a Lifting Cylinder. *AIAA J.*, vol. 12, 252–253, 2012.
3. Lapushkina T.A., Erofeev A.V., Supersonic flow control via plasma, electric and magnetic impacts. *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 69, 313–320, 2017.

Численное моделирование течения жидкости с переменной вязкостью в неизотермической каверне

Мухутдинова А. А.¹, Киреев В.Н.², Урманчиев С.Ф.¹

¹Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН

²Уфимский университет науки и технологий

e-mail: mukhutdinova23@ya.ru

Результаты теоретических и экспериментальных исследований течения жидкостей в каналах с кавернами находят применение при решении инженерных задач, связанных с конструктивными особенностями устройств, применяемых, например, в процессах переработки и транспортировки углеводородов, в системах охлаждения и др. Наличие каверны

может привести к возникновению локальных гидродинамических эффектов, таких как автоколебания [1] или сложные пульсирующие режимы течения [2].

Значительный практический интерес представляет исследование гидродинамических и теплофизических особенностей неізотермических течений жидкостей, вязкость которых зависит от температуры. Результаты численного моделирования течений термовязких жидкостей с монотонными и немонотонными (аномальными) зависимостями вязкости от температуры в кольцевых каналах с заданными условиями теплообмена на стенках представлены в работах [3-5]. В работе [6] с помощью численного моделирования исследовано течение жидкости (45%-ый водный раствор пропиленгликоля) с учетом зависимости вязкости от температуры в плоском канале с каверной, содержащей охлаждающий элемент.

В настоящей работе рассматривается задача о ламинарном течении несжимаемой аномально-термовязкой жидкости в плоском канале с прямоугольной каверной при различных условиях теплообмена на стенках каверны. Математическая модель состоит из уравнения неразрывности, уравнений Навье–Стокса и уравнения сохранения энергии. Для численного решения дифференциальных уравнений математической модели использовался метод контрольного объема и алгоритм SIMPLE, модифицированный для учета переменного коэффициента вязкости. Проанализировано влияние параметров, характеризующих зависимость вязкости жидкости от температуры, условий теплообмена и геометрических параметров каверны и канала на характеристики потока. Показано, что структура течения существенно зависит от теплового режима на стенках каверны. Локальный нагрев или охлаждение одной из стенок каверны приводит к появлению температурного градиента, который существенно влияет на реологические свойства жидкости. В результате наблюдаются эффекты неустойчивости потока, могут возникать нелинейные автоколебания гидродинамических параметров потока, в каверне появляются сложные вихревые структуры, которые оказывают влияние на величину эффективного теплообмена в системе.

Работа выполнена при поддержке средствами госбюджета по госзаданию 124030400064-2 (FMRS-2024-0001).

Список литературы

1. Adibi T., Ahmed S.F., Adibi O., Athari H., Badruddin I.A., Javed S. Fluid flow and mixed heat transfer in a horizontal channel with an open cavity and wavy wall // *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2023. Vol. 37, No. 1. P. 147–163.
2. Агеев А.И., Осипцов А.Н. Пульсирующее течение вязкой жидкости над каверной, содержащей сжимаемый газовый пузырек // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2021. № 6. С. 38–50.
3. Mukhutdinova A.A., Kireev V.N., Urmancheev S.F. Influence of variable thermophysical properties on the flow of fluids in an annular channel under intensive heat exchange // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 269-274.
4. Kireev V.N., Mukhutdinova A.A., Urmancheev S.F. On the critical conditions of heat transfer for a fluid flow with a nonmonotonic dependence of the viscosity on the temperature in an annular channel // *Fluid Dynamics*. 2023. Vol. 58. No. 7. P. 1310-1317.

5. Киреев В.Н., Мухутдинова А.А., Урманчиев С.Ф., Режимы автоколебаний при течении аномально термовязкой жидкости // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2024. Т.514. С. 63-69.
6. Мухутдинова А. А. Задача о течении термовязкой жидкости в канале с каверной, содержащей охлаждающий элемент // Многофазные системы. 2024. Т. 19, № 4. С. 146–151.

Снижение уровня задымления при пожаре ультразвуковым воздействием

Шалунов А. В.¹, Хмелев В.Н.¹, Цыганок С.Н.¹, Данилов П.Д.¹, Синкин А.А.¹

¹БТИ АлтГТУ

e-mail: shalunov@u-sonic.ru

Образование и распространение дыма при пожарах в закрытых помещениях и на открытых пространствах большой площади существенно ограничивает возможность эвакуации людей и снижает скорость ликвидации огня. При этом, известные способы удаления дыма, основанные на принудительной вентиляции помещений или осаждении дыма мелкодисперсной водой, приводят к дополнительному притоку кислорода и усилению распространения пожара или снижают видимость из-за поглощения и рассеяния света на мелких каплях воды.

В настоящее время предпринимаются усилия, направленные на решение проблемы осаждения дыма за счет применения дополнительных физических воздействий на частицы дыма. Одним из наиболее эффективных способов осаждения твердых частиц в газовых средах за счет их коагуляции является воздействие ультразвуковыми колебаниями. При реализации ультразвуковой коагуляции повышение дальности видимости в дыму обеспечивается за счет вовлечения дымовых частиц в колебательное движение, увеличение частоты взаимодействий для объединения частиц в агломераты. Размеры агломератов существенно превышают размеры исходные частицы, что приводит к их осаждению под действием сил гравитации. В результате чего счетная концентрация частиц снижается.

Ранее было установлено, что прямое воздействие синусоидальными ультразвуковыми колебаниями позволяет быстро объединять в агломераты твердые частицы с размерами более 2,5 мкм. Однако, даже воздействие высокочастотными ультразвуковыми колебаниями оказывается недостаточно эффективным для осаждения дыма, поскольку наибольшее число дымовых частиц имеет размер от 0,001 до 1 мкм. При практической реализации УЗ воздействия синусоидальными колебаниями уменьшения концентрации частиц в 10 раз составляет десятки минут, что неприемлемо в случае борьбы с задымлением при пожарах.

Для повышения эффективности осаждения дымов было предложено осуществлять воздействие путем формирования УЗ полей сложной структуры несколькими (минимум двумя) излучателями, работающими на близких частотах.

В предложенном и разработанном способе осаждения дымов интенсификация коагуляции дымовых частиц обеспечивается за счет:

- инициирования вращательного движения агломератов дымовых частиц, обусловленного изменением вектора колебательной скорости акустического поля, как по величине, так и по направлению и приводящего к объединению мелких частиц;
- обеспечения эффективного осаждения образующихся агломератов при инициировании биений на разностной частоте ультразвуковых излучателей (ниже порога слышимости человеческого уха, но выше инфразвуковых, резонансных внутренних органов человека).

Для подтверждения эффективности предложенного способа ультразвукового воздействия и дальнейшей практической реализации новой технологии осаждения дымов были предложены и разработаны высокоэффективные изгибно-колеблющиеся ультразвуковые излучатели, формирующие одновременно излучение ультразвуковых (22 кГц) колебаний с уровнем звукового давления 145...150 дБ (на расстоянии 1 метр) на двух, незначительно отличающихся частотах (не более 300 Гц)

Практическая реализация осаждения дыма в экспериментальной установке обеспечила на расстоянии 1 м, относительную видимость 0,8, а на 2 м – 0,9 (в сравнении с одночастотным воздействием двумя излучателями 0,65 и 0,5, а при воздействии одним излучателем на расстоянии 2 м не более 0,6). При этом, полное осаждение дыма происходило до двух раз быстрее, в сравнении с ультразвуковым воздействием аналогичными двумя излучателями, работающими на одной частоте.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности новой технологии для ускорения процесса осаждения дыма и могут быть рекомендованы для практического применения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00900, <https://rscf.ru/project/24-19-00900/>

Список литературы

1. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н., Нестеров В.А., Данилов П.Д. Ультразвуковой излучатель для осаждения дымов при эвакуации людей и ликвидации пожаров, *Безопасность труда в промышленности*, № 1, 52-58, 2025 г.
2. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Нестеров В.А. Экспериментальное исследование коагуляции аэрозолей при формировании вихревых течений в неоднородном ультразвуковом поле, *Теплофизика высоких температур*, том 62, № 2, 279-286, 2024 г.

О применимости модели монодисперсной среды при численных исследованиях пузырьковых течений

Чернышев А. С.¹, Шмидт А.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

Многофазные течения, и, в частности, пузырьковые течения, являются неотъемлемой частью многих природных и технологических процессов. Примерами могут служить всплывающие со дна моря газовые пузыри (как маркеры глубинных месторождений), спутный газ в виде пузырей при нефтедобыче и транспорте нефтегазовой смеси, химические пузырьковые реакторы. Такие течения, как правило, имеют сложную структуру и характеризуются большим набором процессов межфазного переноса. Исследования многофазных пузырьковых течений имеют большое значение как для развития общих представлений о динамике пузырьковых сред, так и для практических применений в промышленности.

Численное моделирование является эффективным инструментом исследования многофазных течений, позволяя получать картину потока с высокой степенью детализации, недоступной, подчас, экспериментальным методикам. В представленной работе используется математическая модель пузырьковой среды, основанная на эйлера-эйлеровском подходе с учетом взаимного влияния фаз, полидисперсности пузырей и турбулентности несущей фазы, включающей генерацию и диссипацию турбулентности за счет дисперсных включений, и их диффузию [1].

Полидисперсность, как правило, играет важную роль в формировании как глобальной структуры течений [2], так и локальных свойств потока [3]. В представленной работе используется подход, в рамках которого вводится набор классов монодисперсных пузырьков, различающихся по размеру между классами (модель MULTIPLE SIZE GROUP или MUSIG), причем для каждого класса пузырей вводится своя система уравнений сохранения импульса и массы (т. н. гетерогенная модель MUSIG [4]). Этот подход является довольно ресурсоемким из-за необходимости решения дополнительных наборов нелинейных уравнений, однако обеспечивает детальное описание течений в широком диапазоне определяющих параметров.

Предложенная математическая модель была реализована в виде программного кода с использованием конечно-объемной аппроксимации уравнений на неструктурированных гексагональных сетках. Для получения детальной картины течения и минимизации ошибки дискретизации использовался второй порядок точности по пространственным координатам. Для расчета полей давления и скоростей фаз был применен алгоритм SIMPLE с поправкой на многофазность. Итерационный процесс был организован при помощи метода установления по псевдовремени с первым порядком точности.

Численное моделирование течений в пузырьковых реакторах колонного типа, основанное на моделях монодисперсной и полидисперсной сред, позволило выявить различия

динамических характеристик потоков при изменении дисперсности пузырьковой фазы. С увеличением размеров пузырьков $R_b > 1\text{ мм}$ (что соответствует числу Рейнольдса $Re_b > 400$, построенному по относительной скорости фаз, размеру пузырька и вязкости жидкости) эти различия стремятся к нулю.

Анализ силового взаимодействия показал, что при таких размерах пузырька происходит перестройка потока, в частности, меняется характер силы трения (Стокса). Для малых пузырей основной вклад в силу Стокса вносит вязкое трение на границе раздела фаз, а для больших пузырей сила Стокса определяется деформацией пузырька.

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с предсказаниями предложенной аналитической модели для определения равновесной скорости пузырей, основанной на балансе межфазного силового взаимодействия.

Таким образом можно предположить, что изменение характера силового взаимодействия фаз при увеличении размера пузырька, приводит к уменьшению влияния полидисперсности пузырьковой фазы на структуру течений в пузырьковых реакторах колонного типа, что позволяет использовать экономичные модели монодисперсной среды.

Список литературы

1. Chernyshev, A.; Schmidt, A.; Chernysheva, V. An Impact of the Discrete Representation of the Bubble Size Distribution Function on the Flow Structure in a Bubble Column Reactor. *Water* 2023, 15, 778. <https://doi.org/10.3390/w15040778>
2. Besagni, G.; Inzoli, F. Prediction of Bubble Size Distributions in Large-Scale Bubble Columns Using a Population Balance Model. *Computations* 2019, 7, 17. <https://doi.org/10.3390/computation7010017>.
3. Pakhomov, M.A.; Terekhov, V.I. Simulation of the turbulent structure of a flow and heat transfer in an ascending polydisperse bubble flow. *Tech. Phys.* 2015, 60, 1268–1276. <https://doi.org/10.1134/S1063784215090157>.
4. Krepper, E.; Lucas, D.; Frank, T.; Prasser, H.-M.; Zwart P. J. The inhomogeneous MUSIG model for the simulation of polydispersed flows. *Nucl. Eng. Des.* 2008, 238, 1690–1702. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.01.004>.

Исследование распространения волн в насыпной пористой среде, насыщенной неоднородной пузырьковой жидкостью

Гималтдинов И. К.¹, Хусаинов И.Г.^{1,2}

¹УГНТУ

²УУНИТ

e-mail: iljas_g@mail.ru

Насыщенные пористые среды широко применяются в различных областях техники и технологии, в частности, в аэрокосмических технологиях, в архитектурной акустике, в химической технологии, в строительстве и т.п. Нефтяные пласты представляют собой насыщенные жидкостью или пузырьковой жидкостью пористые среды.

Один из методов исследования насыщенных пористых сред – это исследование с помощью акустических волн. В связи с этим, задачи изучения распространения акустических волн в различных типах пористых сред представляет большой интерес. Изучению распространения акустических волн давления в пористой среде, насыщенной жидкостью с пузырьками газа посвящены работы [1,2]. В данной работе впервые исследовано поведение волны, распространяющейся по насыщенной насыпной среде, при прохождении границы «насыпная пористая среда, насыщенная «чистой» жидкостью - насыпная пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью». Ситуация, когда одна часть насыпной пористой среды насыщена «чистой» жидкостью, а другая часть насыщена пузырьковой жидкостью, встречается в газогидратных залежах морского дна.

Математическая модель исследуемого процесса включает уравнения массы для скелета пористой среды и для жидкости в порах в двухскоростном приближении, а также закон сохранения количества пузырьков и уравнение колебания радиуса пузырька. Уравнение импульсов содержит межфазные силы взаимодействия: силу присоединенных масс, силу вязкого трения Стокса и аналог силы Бассэ. Поведение скелета определяется моделью Максвелла. Истинные плотности и объемные доли фаз связаны кинематическими соотношениями.

Решение полученной системы уравнений ищется в виде бегущих затухающих волн. Получено дисперсионное соотношение. Найдены формулы для вычисления фазовых скоростей и коэффициентов затухания «быстрой» и «медленной» волн. Исследованы зависимости фазовых скоростей и коэффициентов затухания «быстрой» и «медленной» волн от круговой частоты при разных параметрах системы. Записаны условия для границы «насыпная пористая среда, насыщенная «чистой» жидкостью - насыпная пористая среда, насыщенная пузырьковой жидкостью». Получены коэффициенты прохождения и отражения волны от границы. Исследовано влияние параметров системы, теплообмена между жидкостью и газом, а также нестационарных сил межфазного взаимодействия на коэффициенты прохождения и отражения волны от границы. Проанализированы зависимости фазовых скоростей и коэффициентов затухания «быстрой» и «медленной» волн от круговой частоты, а также графики коэффициентов прохождения и отражения волны от границы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-11-00274, <https://rscf.ru/project/24-11-00274/>

Список литературы

1. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Распространение возмущений давления в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде, Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки, том. 157, 101-106, 2015 г.
2. Ахметов А. Т., Гималтдинов И. К., Ситдикова Л. Ф. [и др.] О влиянии водонасыщенности на распространение ударных волн слабой интенсивности в насыпных средах, Инженерно-физический журнал, том. 94, 418-423, 2021 г.

Экспериментальные и численные исследования оптимизации потока перед воздушным двигателем

Губский В. В.¹, О.В. Дружинин¹, О.В. Павленко¹

¹ФАУ «ЦАГИ»

e-mail: Vitaly.Gubsky@tsagi.ru

Одним из возможных путей уменьшения потребной мощности двигателя является размещение воздушного двигателя (винта, кольцевого канала и направляющих лопаток, создающих общую тягу силовой установки) в заторможенном потоке за различными конструктивными элементами, например за фюзеляжем [1]. При этом, становится актуальной проблема оптимизации потока вблизи винта, ввиду различных ограничений на его режимы его работы. Воздушные двигатели используются в различных сферах человеческой деятельности. В настоящее время во многих странах для производства электроэнергии применяются ветрогенераторы. Существуют различные способы для увеличения их коэффициента полезного действия. Современные ветровые энергетические установки разрабатываются с концентраторами ветровой энергии, которые представляют собой конфузорные или диффузорные установки, способные увеличивать скорость потока в зоне лопастей ветрогенератора, тем самым увеличивая его мощность и коэффициента полезного действия.

В данной работе представлены результаты исследований, направленных на решение проблемы оптимизации потока перед воздушным двигателем, путем применения специальных направляющих стационарных лопаток. Для изучения влияния интерференции лопастей воздушного винта и лопаток были проведены численные и экспериментальные исследования. Численные исследования проведены по программе, основанной на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Экспериментальные исследования проведены на модели схематизированного фюзеляжа, представляющего собой тело вращения с установленным шестилопастным толкающим винтом в аэродинамической трубе ЦАГИ [2].

Разработано конструктивное дополнение к воздушному винту, которое разворачивает и направляет воздушный поток под оптимальным углом атаки к лопасти. В качестве конструктивных направляющих потока воздуха могут быть использованы поверхности, образованные совместно с центральным телом или специальные каналы. Дополнительно можно установить выпрямляющие лопатки за воздушным винтом для минимизации сопротивления системы. Их форма определяется математическим путем и напрямую связана с режимом полета.

В процессе работы были выведены теоретические закономерности и формулы, позволяющие рассчитать форму направляющего устройства для лопасти воздушного винта различной длины и толщины. Экспериментальные и численные исследования показали, что это устройство позволяет создавать оптимизировать поток перед винтом в большем диапазоне скоростей. В результате применения уменьшается шум и повышается коэффициент полезного действия двигателя в целом или его отдельных элементов.

Список литературы

1. Алесин В.С., Губский В.В., Дружинин О.В., Ерёмин В.Ю., Павленко О.В. Исследования интерференции толкающего винтокольцевого движителя с фюзеляжем летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии, Т 72 № 2, стр. 91–96, 2018 г.
2. Алесин В.С., Губский В.В., Дружинин О.В., Павленко О.В. Исследования аэродинамических особенностей аппарата для оптимизации потока перед толкающим воздушным движителем// Инженерный журнал: наука и инновации # 6•2022, С. 18-23

Исследование течения жидкости в микроканале с массивом препятствий с учетом теплообмена

Низамова А. Д.¹, Галиева К.А., Солнышкина О.А.

¹УУНиТ

e-mail: delinka555@gmail.com

В современных теплообменных технологиях всё большую роль играют микроскопические охлаждающие системы, такие как микроканальные теплообменники. Эти устройства обеспечивают эффективное отведение тепла и поддержание стабильной температуры в микроэлектромеханических системах, интегральных схемах и других микроустройствах, подвергающихся кратковременным высоким тепловым нагрузкам. Их применение распространяется на охлаждение электроники, управление температурными режимами в аэрокосмической отрасли, биологические и химические исследования [1]. Ранее были представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на усиление тепло- и массообмена на макро-, микро- и наноуровнях в одно- и двухфазных средах [2]. Важным аспектом в конструировании эффективных микротеплообменных устройств является подбор оптимальной геометрии внутренней структуры микроканалов. Данная работа посвящена численному исследованию влияния изменения внутренней конфигурации микроканалов, в частности введения второго масштаба упорядочивания столбиков, на особенности тепломассопереноса.

В настоящей работе рассмотрено течение холодной жидкости в микроканале с распределенным массивом столбиков под действием перепада давления. Нижняя стенка канала и столбики поддерживаются при постоянной температуре. Площадь препятствий варьировалась от 50 до 100 мкм² в зависимости от необходимого значения пустотности, а высота микроканала от 30 до 100 мкм. Варианты расположения столбиков – равномерное и с двумя масштабами упорядочивания (выделялись группы по 4 элемента, образующие узкие каналы между столбиками и широкие каналы между группами столбиков). Варьировались расстояния между столбиками и между группами столбиков. При моделировании использовались теплофизические свойства воды, как рабочей жидкости, и кремния, как материала микроканала. Ранее аналогичные исследования были проведены в плоском канале численно с помощью метода контрольного объема и алгоритма SIMPLE [3]. Исследование гидродинамических характеристик течения в аналогичных структурах было

выполнено ранее авторами с использованием численного подхода на основе метода граничных элементов, ускоренного быстрым методом мультиполей на гетерогенных вычислительных архитектурах [4], но без учета теплообмена. В представленной работе для численного моделирования течения жидкости в микроканале с препятствиями с учетом теплообмена использована универсальная лицензионная программная система анализа методом конечных элементов Ansys. Тестирование модулей проводилось для случая плоского микроканала в отсутствии препятствий для изотермического случая и с учетом теплообмена на стенках канала.

В рамках данной работы проведено многопараметрическое исследование течения жидкости в микроканале с препятствиями с учетом теплообмена. Приведены графики зависимости максимального значения температуры от пустотности микроканала (от 40% до 60%) и перепада давления. Были изучены распределения скоростей и температурные поля внутри каналов, а также влияние введения второго масштаба распределения на интенсивность поперечных потоков жидкости. Кроме того, была проведена серия лабораторных экспериментов с использованием микрофлюидных чипов, изготовленных методом мягкой литографии. Более подробно используемая установка и методика проведения эксперимента представлены в предыдущей работе авторов [4]. Полученные экспериментальные данные по полям скоростей были сопоставлены с расчетными.

Исследование показало, что трехмерное моделирование и учет реальных характеристик рабочей жидкости и материала микроканала позволяет выявить оптимальные условия теплообмена. Выявленные особенности влияния изменения расположения столбиков внутри микроканала с сохранением общей пустотности и режима закачки жидкости на гидродинамические и теплофизические параметры системы, могут быть использованы при конструировании микротеплообменников.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24- 19-00697 <https://rscf.ru/project/24-19-00697>

Список литературы

1. Фадеев С. И., Косцов Э. Г., Пиманов Д. О., Численное исследование математических моделей микроэлектромеханических резонаторов разного типа, Сиб. журн. индустр. Математики, том 14, № 4. 120-135, 2014
2. Дзюбенко Б. В., Кузма-Кичта Ю. А., Леонтьев А. И., Федик И. И., Холпанов Л. П., Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах, ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008
3. Низамова А.Д., Булатова А.З., Моделирование течения жидкости в плоском микроканале со структурами с учетом теплообмена, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687077, 14.11.2024
4. Солнышкина О.А., Батыршин Э.С., Питюк Ю.А., Исследование гидродинамических потоков в микромоделях сред с двойной пористостью, Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа, № 4, 9-18, 2021

Уравнение состояния жидкого и газообразного алюминия при высоких давлениях и температурах

Боярских К. А.¹, Хищенко К. В.¹

¹ОИВТ РАН

e-mail: shagom55@gmail.com

Функциональная связь термодинамических параметров, характеризующих вещество, называется уравнением состояния, важность которого состоит в замыкании системы законов сохранения массы, энергии и импульса и, соответственно, в обеспечении возможности решения гидродинамических задач. Настоящее исследование посвящено термодинамическим свойствам алюминия в жидком и газообразном состоянии. Рассмотрены такие процессы, как испарение, изобарическое расширение, ударное нагружение и изоэнтروпическая разгрузка образцов этого металла. Построено термодинамически полное, согласованное уравнение состояния, позволяющее описать имеющиеся опытные данные.

Под термодинамически полным уравнением состояния понимается функциональная зависимость термодинамического потенциала от собственных переменных. В настоящем исследовании модель представлена в виде удельной свободной энергии, зависящей от удельного объема и температуры. Функция определена, как сумма трех вкладов: упругой части уравнения состояния, задающей поведение вещества при нулевой абсолютной температуре, и тепловых составляющих электронов и тяжелых частиц (атомов и ионов). Холодная кривая задана трехчленной зависимостью, позволяющей достичь одновременного описания скорости звука при нормальных условиях и удельной теплоты испарения. Тепловой вклад тяжелых частиц построен на основе квазигармонического приближения и позволяет успешно описать имеющиеся данные ударно-волновых экспериментов. Тепловой вклад электронной подсистемы записан в рамках приближения вырожденного электронного газа.

Работа ориентирована на описание свойств вещества в экстремальных условиях (при высоких значениях давления и температуры). Рассмотрены экспериментальные данные, полученные в опытах по взрыву алюминиевых проволок и ударному сжатию и изоэнтропическому расширению образцов алюминия различной исходной плотности.

По полученному уравнению состояния рассчитаны граница области фазового перехода жидкость – пар, температурная зависимость плотности в процессе изобарического расширения жидкой фазы металла, ударные адиабаты и изоэнтропы разгрузки образцов алюминия различной начальной плотности. Результаты расчетов сопоставлены с имеющимися опытными данными, таким образом установлена область применимости модели. Полученное в работе уравнение состояния может быть использовано для гидродинамического моделирования интенсивных процессов в жидком и газообразном алюминии.

Исследование струйного течения термовязких жидкостей

Муртазин Н. Э.¹, Мухутдинов Д.А.², Низамова А.Д.

¹УГНТУ

²УУНТ

e-mail: reginaufa@yandex.ru

В настоящее время проблема сбора нефти и других жидкостей с водоемов после аварий, которые наносят значительный ущерб экологии, является наиболее актуальной. Понимание распространения струй жидкостей даст возможность разработать стратегию сбора и оценить их интенсивность истечения.

Для охраны прибрежных и шельфовых зон морей от загрязнения [1] важно также изучение затопленных потоков. В работе [2] установлено, что размеры загрязнения зависят от скорости потоков, глубины трубопроводов, размеров разрывов и свойств жидкостей, а моделирование струйного течения позволяет разрабатывать устройства для сбора нефтепродуктов при разливах [3]. Стоит отметить, что и для нефтяной промышленности [4, 5] важно проведение исследований течения вязких жидкостей при изменении температуры.

В ранее проведенных исследованиях проанализированы особенности течений жидкостей с температурной зависимостью вязкости в различных каналах. Исследования выявили термогидродинамические характеристики и их влияние на теплообмен в промышленных системах, а также показали, что учет температурной зависимости вязкости значительно влияет на устойчивость [6] и характеристики [7] течения жидкостей.

В настоящей работе рассмотрено течение затопленной струи с температурной зависимостью вязкости жидкости. В результате проведенного исследования получена математическая модель неизотермического струйного течения двух несмешивающихся жидкостей с учетом зависимостей вязкости фаз от температуры. Численно смоделировано решение двумерной задачи о втекании горячей струи термовязкой жидкости в неподвижную жидкость. Созданная и протестированная экспериментальная установка для проведения экспериментов по визуализации эффектов струйных течений термовязкой жидкости позволила получить качественное и количественное сходство полученных численных и экспериментальных результатов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-71-10078

Список литературы

1. Мельников Н.Н., Калашник А.И., Шельфовые нефтегазовые разработки западного сектора российской Арктики: геодинамические риски и безопасность, Газовая промышленность, № 661, 46-55, 2011
2. Гильманов С.А., Шабаев Р.Б., Экспериментальное исследование струй положительной плавучести в воде, Современные проблемы физики и математики, т. 2, 44-48, 2004
3. Кильдибаева С. Р., Гималтдинов И. К., Динамика многофазной затопленной струи с учетом образования гидратов, Вестник Тюменского государственного

- университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, т. 1, № 3, 92-101, 2015
4. Сандитов Д.С., Модель вязкого течения стеклообразующих жидкостей и стекол, Доклады Академии наук. Федеральное государственное бюджетное учреждение» Российская академия наук», т. 451, № 6, 2013
 5. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Об устойчивости конвективного течения жидкости с вязкостью, зависящей от температуры, Теплофизика высоких температур, т. 13, № 4, 771-778, 1975
 6. Nizamova A.D., Kireev V.N., Urmancheev S.F., Influence of Temperature Dependence of Viscosity on the Stability, Lobachevskii Journal of Mathematics, Vol. 44, No. 5, 1778-1784, 2023. DOI: 10/1134/S1995080223050463
 7. Kireev V.N., Mukhutdinova A.A., Urmancheev S.F., Towards heat transfer critical conditions for flow of fluids with a nonmonotonic dependence of viscosity on the temperature in annular channel, Fluid Dynamics, Vol. 58, No. 7, 1310-1317, 2023

Численные исследования особенностей обтекания сверхкритического профиля с интегрированной в него импеллерной распределенной силовой установкой

Кузин С. А.¹, Волков А.И.¹, Долотин М.В.¹, Пигусов Е.А.¹

¹ЦАГИ

e-mail: sergey.kuzin.1994@mail.ru

При формировании облика перспективного регионального самолета, обладающего расширенными условиями базирования, высокой крейсерской скоростью полета, а также приемлемыми показателями топливной экономичности, необходимо использовать энергетические системы увеличения подъемной силы на взлетно-посадочных режимах полета. Существенное увеличение несущих свойств крыла можно обеспечить за счет интеграции импеллерной распределенной силовой установки (ИРСУ) с отклоняемым закрылком крыла. Аэродинамическая эффективность использования ИРСУ подтверждается ранее проведенными расчетно-экспериментальными исследованиями [1-3]. Повышение дозвуковой крейсерской скорости полета обычно достигается за счет использования стреловидного крыла со сверхкритическими профилями небольшой относительной толщины порядка 10-12 % [4], оснащенного механизацией передней кромки крыла. Таким образом, возникает задача об исследовании аэродинамических характеристик крыла (профиля) с механизацией передней кромки при наличии интегрированной в закрылок ИРСУ.

В данной работе представлены результаты расчетных исследований крыла бесконечного размаха (профиля), оснащенного трехзвенным выдвижным закрылком с интегрированной в него ИРСУ, а также двумя типами механизации передней кромки (отклоняемый носок и щиток Крюгера) во взлетной и посадочной конфигурациях. Рассмотрены различные углы отклонения механизации передней кромки: для отклоняемого носка рассмотрены $\delta_n = 30^\circ / 40^\circ / 50^\circ$; щиток Крюгера отклонялся на те же углы ($\delta_{к.г.} = 30^\circ / 40^\circ / 50^\circ$).

Расчеты выполнены при условиях набегающего потока, соответствующих $H = 0 \text{ km}$ по МСА; число Маха $M = 0.15$; число Рейнольдса $Re = 8.2 \cdot 10^6$. Коэффициент тяги, представляющий собой отношение тяги импеллера к скоростному напору и к характерной площади крыла, составлял $C_T = 0.25$. Угол атаки изменялся в диапазоне от 0° до закритических значений.

Расчетные исследования выполнены путем численного решения уравнений Навье–Стокса, осредненных по методу Рейнольдса. При вычислениях замыкание уравнений выполнено с использованием модели турбулентности SST (Shear Stress Transport). Моделирование ИРСУ производилось методом «активного диска» аналогично работам [1–3, 5].

В результате численных исследований показано, что использование механизации передней кромки на профиле с ИРСУ позволяет получить приращения критического угла атаки $\Delta\alpha_{cr}$ до 8° во взлетной и до 12° в посадочной конфигурациях (приращения коэффициента максимальной подъемной силы $\Delta C_{y_{amax}}$ до 29% и 37% соответственно). Показано, что наиболее эффективным вариантом механизации передней кромки является щиток Крюгера с углом отклонения $\delta_{k.f.} = 40^\circ$.

Список литературы

1. Кажан В.Г., Кузин С.А. Численное исследование аэродинамических характеристик крыла с импеллерными движителями при различных вариантах интеграции // Ученые записки ЦАГИ. 2022. Т. LIII, № 6. С. 71-81.
2. Волков А.И., Долотин М.В., Кажан В.Г., Кузин С.А., Пигусов Е.А. Метод приближенной оценки несущих свойств крыла конечного размаха с интегрированной распределенной силовой установкой // Ученые записки ЦАГИ. 2023. Т. LIV, № 6, с. 12-27.
3. Волков А.И., Долотин М.В. Кузин С.А, Пигусов Е.А. Расчетно-экспериментальные исследования влияния импеллерной распределенной силовой установки на аэродинамические характеристики прямоугольного крыла малого удлинения // Ученые записки ЦАГИ. 2024. Т. LV, №6, с. 30-59.
4. Anderson J.D. Fundamentals of Aerodynamics, Sixth Edition, p. 775-777. NY: McGraw-Hill Education, 2017
5. Michele Trancossi, Mauro Madonia. The Efficiency of an Electric Turbofan vs. Inlet Area: A Simple Mathematical Model and CFD Simulations // SAE Technical Papers 10 // DOI:10.4271/2012-01-2217

Уравнения состояния смесей кремнезема в широком диапазоне давлений, температур и плотностей

Середкин Н. Н.¹, Хищенко К.В.¹

¹ОИВТ РАН

e-mail: nikser12@yandex.ru

При газодинамическом моделировании физических процессов в веществе во всем диапазоне реализуемых состояний для замыкания системы уравнений движения среды, выражающих законы сохранения массы, импульса и энергии, используется уравнение состояния, устанавливающее связь между термодинамическими параметрами этого вещества.

В настоящей работе уравнение состояния кремнезема и других материалов, используемых в качестве компонентов смесей, в широком диапазоне давлений, температур и плотностей задается в рамках полуэмпирического подхода. В качестве характеристической функции термодинамических параметров вещества (удельного объема и температуры) выбран термодинамический потенциал свободная энергия Гельмгольца. В предлагаемой модели уравнения состояния вещества свободная энергия состоит из трех слагаемых. Первое определяет упругую часть взаимодействия при абсолютном нуле температуры, второе — тепловой вклад атомов, третье — тепловой вклад электронов. Зная характеристическую функцию свободной энергии от объема и температуры с помощью термодинамических соотношений можно получить калорическое и термическое уравнения состояния вещества, т.е. зависимости внутренней энергии и давления от объема и температуры.

Для построения уравнения состояния смеси в работе применяется следующая модель термодинамики. Предполагается, что в смеси устанавливается механическое и тепловое равновесие в компонентах, и конструируется функциональная зависимость энергии Гиббса от давления и температуры как сумма энергий Гиббса компонентов с учетом их массовых долей. Из этого термодинамического потенциала определяется внутренняя энергия и удельный объем смеси при заданных значениях давления и температуры, которые можно рассчитать с помощью уравнений состояния компонентов.

На основе предлагаемой модели уравнений состояния проведены расчеты термодинамических характеристик смесей кремнезема с другими компонентами, и полученные результаты сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными по ударному сжатию образцов этих материалов при высоких давлениях и температурах. Представленные уравнения состояния компонентов и смесей могут быть использованы при газодинамическом моделировании различных физических процессов в веществе в широком диапазоне давлений, температур и плотностей.

Моделирование явления коллапса одиночного кавитационного пузырька вблизи твёрдой стенки с использованием трёхмерных CFD-расчётов

Махнов А. В.^{1 2}

¹СПбПУ

²АО «Инжиниринговый центр «Кронштадт»

e-mail: a_makhnov@mail.ru

Коллапс кавитационных пузырьков часто служит источником волн сжатия в жидкостях [1], а также причиной развития кумулятивных струй [2], взаимодействие которых с твёрдыми стенками приводит к эрозии элементов конструкций гидравлических устройств и, как следствие, к снижению производительности устройств, к их механическому повреждению. Но существуют и примеры, когда коллапс кавитационных пузырьков является положительным для практики эффектом. Сюда относятся такие примеры, как применение кавитации в технологиях очистки, а также некоторые биомедицинские приложения [3].

Насколько известно автору настоящей работы, в научной группе Лаутерборна было в своё время сделано первое детальное экспериментальное исследование (см. работу [4]) процесса коллапса кавитационного пузырька вблизи плоской твёрдой стенки. В этих экспериментах была впервые применена высокоскоростная съёмка для визуализации распространения волн и развития кумулятивной струи. Первое известное теоретическое исследование процесса коллапса сферического пузырька у плоской твёрдой стенки было опубликовано Плессэ и Чепмэном (см. работу [5]) для случая несжимаемой жидкости. Позднее начали публиковаться и исследования с учётом сжимаемости жидкой фазы (см., например, работу [6]) и подробным анализом структуры течения, формирующегося при коллапсе, но в данных работах моделирование проводилось без учёта испарения и конденсации.

В настоящей работе сделана попытка провести моделирование с учётом как сжимаемости в жидкой фазе, так и фазового перехода (испарение и конденсация учитываются путём решения дополнительного уравнения переноса объёмной доли с источником членом, который рассчитывается согласно принятой полуэмпирической модели кавитации). Сделана также попытка разрешить и исследовать трёхмерные эффекты, нарушающие осесимметричный характер коллапса и существенно влияющие на возникающие в результате коллапса высокие давления в жидкости и на стенке. Именно с этой целью методом исследования был выбран трёхмерный CFD-расчёт.

Моделируемое явление коллапса кавитационного пузырька включает в себя следующие последовательно протекающие процессы. На начальной стадии взаимодействия пузырька с окружающей жидкостью давление в жидкости падает вследствие волны разрежения, распространяющейся от пузырька. Затем давление в локальной области между пузырьком и стенкой уменьшается ещё сильнее из-за отражения волны разрежения, в зоне за фронтом отражённой волны разрежения возникает вторичная кавитация. После прохождения

волн разрежения вся жидкость в рассматриваемом объёме совершает постепенно ускоряющееся движение по направлению к пузырьку, и возникает существенный рост локального давления в зоне начального расположения пузырька (фокусировка давления). В результате происходит коллапс, а предшествовавшая ему фокусировка давления приводит к распространению волны сжатия. Сначала эта волна сжатия встречается со стенкой в окрестности точки эпицентра, затем положение максимума давления смещается на периферию, на некоторое расстояние от оси симметрии (под точкой «эпицентра» здесь подразумевается точка пересечения оси симметрии со стенкой).

Для детального понимания структуры течения, сходящегося к пузырьку и приводящего к фокусировке давления, анализировались полученные в результате трёхмерных CFD-расчётов распределения скорости. Анализ картины течения показал, что до начала взаимодействия волны сжатия со стенкой жидкость подтекает со всех сторон по направлению к пузырьку. Во-первых, показано, что на этой стадии начального подтекания среды уже заметно нарушается исходная геометрическая форма пузырька. Во-вторых, показано, что существенная асимметрия имеет место и в самом поле скорости подтекания жидкости, что приводит к развитию направленной в сторону стенки кумулятивной струи. Полученные векторные поля скорости демонстрируют также и то, что после коллапса (и начала распространения волны сжатия из центра на периферию) есть как растекание жидкости на периферию за счёт давления, так и подтекание жидкости с периферии к центру, которое продолжается под действием силы инерции. Можно предположить, что именно эта разнонаправленность течения в достаточно близко расположенных областях и создаёт вихревой характер движения жидкости в некоторых локальных областях вблизи коллапсирующего пузырька. Этот вопрос интересен для дальнейшего изучения.

Получены немонотонные распределения давления вдоль стенки, качественно согласующиеся по виду с имеющимися в литературе результатами экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Rayleigh L., 1917, *Phil. Mag.*, 34
2. Kornfeld M. and Suvorov L., 1944, *J. Appl. Phys.*, 15
3. Jamaluddin A. R., Ball G. J., Turangan C. K. and Leighton T. G., 2011, *J. Fluid Mech.*, 677, 305–41
4. Vogel A, Lauterborn W. and Timm R., 1989, *J. Fluid Mech.*, 206, 299–338
5. Plesset M. S. and Chapman R. B., 1971, *J. Fluid Mech.*, 47, 283–90
6. Johnsen E. and Colonius T., 2008, *J. Acoust. Soc. Am.*, 124(4), 2011–20

Влияние плотности дугогасящей среды на скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка

Куракина Н. К.¹, Аверьянова С.А.¹, Образцов Н.В.¹, Тонконогов Е.Н.¹

¹СПбПУ

e-mail: nkuriee@gmail.com

Проблема создания современных генераторных выключателей больших разрывных мощностей (свыше 1000 МВт) и отсутствие отечественного задела по элегазовым генераторным выключателям [1] заставляют ученых искать способы повышения отключающей способности дугогасительных устройств газонаполненных выключателей (ДУ) путем проведения фундаментальных исследований физических процессов в ДУ, освоения новых конструкций, технологий, материалов, изоляционных дугогасительных сред. Элегаз (SF_6) является парниковым газом с высоким значением потенциала глобального потепления ($\text{GWP}=23500$). Продукты распада элегаза, низшие фториды, высокотоксичны. Внимание исследователей уделяется изоляционным газовым средам с небольшой относительно SF_6 плотностью (сухой воздух, N_2 , CO_2), а также газам, обладающим плотностью, близкой или большей, чем у SF_6 ($\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$, $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$) и их смесям с более легкими газами (сухой воздух, N_2 , CO_2) [2].

ДУ представляет собой канал сложной конфигурации на основе сопла Лаваля. До-, транс-, сверхзвуковые зоны течения газа в таком канале взаимодействуют с электрической дугой на всех этапах процесса отключения. Отключающая способность ДУ характеризуется скоростью восстановления электрической прочности межконтактного промежутка. Существенное влияние на скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка оказывает структура газового потока (распределение полей давления, наличие ударных волн, переход в турбулентный режим течения). В настоящей работе проводится аналитический анализ влияния плотности газа на скорость роста энергии турбулентности в нуле тока на основе уравнения баланса энергии турбулентности; исследуется скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка в атмосфере газов N_2 , CO_2 , SF_6 ; проводится сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными [3]. В работе подтверждено, что в процессе дугогашения при подходе тока к нулю на границе между дугой отключения и дугогасящим потоком существенно возрастает уровень турбулентных пульсаций (рост кинетической энергии турбулентности). Показано, что с ростом плотности дугогасящей среды увеличивается электрическая прочность газа, что положительно сказывается на отключающей способности ДУ в тепловой фазе пробоя.

Список литературы

1. Шульга Р. Н. и др., Генераторные выключатели для атомных электростанций, Электричество, том 9, 20–27, 2020.
2. Zhong, L. et al., Effects of Buffer Gases on Plasma Properties and Arc Decaying Characteristics of $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}-\text{N}_2$ and $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}-\text{CO}_2$ Arc Plasmas, Plasma Chem Plasma Process, том 39, 1379–1396, 2019.

3. Рагаллер К., Отключение токов в сетях высокого напряжения, М.: Энергоиздат, 301, 1981

Влияние турбулентности на параметры плазменного потока высоковольтного плазмотрона переменного тока

Образцов Н. В.^{1,2}, Быков Н.Ю.^{1,2}, Суров А.В.²

¹СПбПУ

²ИЭЭ РАН

e-mail: obraztsovnika@yandex.ru

Плазмогенераторы переменного тока перспективны для создания новых энергоэффективных технологий благодаря хорошим эксплуатационным характеристикам. Высокий термический КПД и продолжительное время непрерывной работы относятся к несомненным достоинствам таких устройств [1,2]. На сегодня актуальны технологии плазменного синтеза новых аддитивных материалов, плазменного риформинга и пиролиза углеводородов, а также технологии плазменной деструкции опасных отходов. Создание оптимальных технологических процессов требует максимально полного понимания процессов, протекающих в разрядных камерах и в потоке истекающего рабочего газа. Экспериментальная диагностика параметров имеет свои ограничения по доступности объекта исследования. Численное моделирование предоставляет возможность получить более полные данные о картине течения, но также является сложной исследовательской задачей. Поле температур в реакторе зависит от режима истечения, который в свою очередь определяется расходом газа и рабочей мощностью плазмотрона. Для исследования процессов, протекающих в каналах плазмотрона и в струе, используется магнитогидродинамическое моделирование, предполагающее совместное решение уравнений электромагнетизма, газовой динамики и теплообмена. Задача расчета осложняется тем, что в низкотемпературной плазме наблюдаются различные неустойчивости плазменного потока, которые можно разделить на две основные группы. Первая группа — это силовые неустойчивости, связанные с флуктуациями импульса среды. Вторая группа — тепловые неустойчивости, вызванные колебаниями джоулева тепловыделения и протеканием химических реакций. Моделирование параметров потока в рамках ламинарной постановки не соответствует реальным параметрам работы плазмотрона при умеренных и больших расходах плазмобразующего газа [3,4]. Газодинамическая часть рассматриваемой задачи в традиционном подходе описывается уравнениями Навье-Стокса, где для учета турбулентных эффектов применяются различные RANS модели, такие как $k-\varepsilon$, $k-\omega$, SST и другие. Эти модели позволяют рассчитать турбулентные течения, возникающие в каналах плазмотрона и струе. При расчетах двух- и трехмерных течений в генераторах плазмы часто используют $k-\varepsilon$ модель турбулентности [5]. Однако Realizable $k-\varepsilon$ лучше подходит для задач с сильными вихревыми структурами, обратными течениями или анизотропными турбулентными полями [6], что соответствует рассматриваемому устройству. В данной работе с использованием различных

моделей турбулентности проведен расчет течения низкотемпературной плазмы. Показана необходимость учета турбулентности потока при оценке параметров работы плазмотрона.

Список литературы

1. Surov A. V. et al., Multi-gas AC plasma torches for gasification of organic substances, Fuel, том 203, 1007-1014, 2017
2. Рутберг Ф. Г. и др. Многофазные электродуговые плазмотроны переменного тока для плазменных технологий, Теплофизика высоких температур, том 44, №2, 205-211, 2006
3. Bykov N. Y. et al. Modeling of an AC Plasma Torch—Part I: Electrical Parameters and Flow Temperature, IEEE Transactions on Plasma Science, том 49, №. 3, 1017-1022, 2020
4. Bykov N. Y. et al. Modeling of an AC Plasma Torch—Part II: Gasdynamic Pattern and Effect of Flow Rate, IEEE Transactions on Plasma Science, том 49, №. 3, 1023-1027, 2020
5. Shigeta M., Turbulence modelling of thermal plasma flows, Journal of Physics D: Applied Physics, №46, 493001, 2016
6. Shaheed, R., Mohammadian, A. & Kheirkhah Gildeh, H., A comparison of standard $k-\epsilon$ and realizable $k-\epsilon$ turbulence models in curved and confluent channels, Environ Fluid Mech, 19, 543–568, 2019

Влияние мембраны на прохождение ударно-волнового импульса в песке

Ахметов А. Т.^{1,2}, И.К. Гималтдинов², Р.Ф. Гизатуллин^{1,2}, М.А. Азаматов³, Д.Р. Богданов^{1,2}

¹Имех УФИЦ РАН

²ФГБОУ ВО «УГНТУ»

³Салым Петролеум Девелопмент Н.В

e-mail: alfir@anrb.ru

Удивительный эффект усиления ударных волн в песке при последовательном воздействии ударно-волновых импульсов был обнаружен [1] с использованием зондирующих импульсов в ударной трубе [2]. Поскольку одна из интерпретаций увеличения амплитуды и усиления зондирующих импульсов связана с совместным воздействием падающей волны на скелет и на воздух между песчинками, то возникает задача выявить влияние экранирования от проникновения воздуха через поверхность песка на преобразование структуры песка при воздействии ударно-волнового импульса.

Традиционно распространение ударно-волновых импульсов в песках изучается в ударных трубах, при этом с особой тщательностью измеряются изменения параметров эпюры давления импульса при прохождении слоя песчаной насыпки. В нашем случае вертикальная ударная труба диаметром 52 мм оснащена секцией насыпных сред (ЧНС). Для регистрации ударных волн используются пьезоэлектрические датчики, один из которых располагался посередине камеры низкого давления (D0), остальные три (D1-D3) в песке на стенке ЧНС. Расстояние между датчиками (D1-D2-D3) 105 мм, между датчиком D3 и

нижним торцом СНС – 20 мм. Система регистрации (усилитель заряда LE-41 с АЦП Е14-440) на базе L-CARD сопряжена с компьютером. Ударная волна формировалась после разрыва диафрагмы из алюминиевой фольги, разделяющей камеры высокого давления (КВД) и низкого (КНД). Исследуемая среда представляла собой насыпку из песчинок, размеры которых находятся в диапазоне от 160 до 650 мкм, среднеарифметический размер 390 мкм [2].

В ударной трубе происходит отражение импульса давления от поверхности песчаной насыпки, при этом необходимо отметить, что большая часть энергии отражается, малая доля проникает в песок. Далее происходит его переотражение от верхнего торца ударной трубы, через небольшой промежуток времени (порядка 13 мс) переотраженный импульс падает на поверхность песчаной насыпки, за это время основной импульс распространяется в толще песка слоем 232 мм и уменьшается по амплитуде на порядок, амплитуда отраженного от дна импульса (прошедшего 40 мм) на уровне датчика D3 сопоставима с уровнем шума.

Проведены эксперименты с тремя типами диафрагм с амплитудами разрыва 34 ± 2 , 52 ± 2 , 97 ± 2 кПа. Для экранирования песчаной насыпки были использованы следующие мембраны: фольга с загнутыми вверх краями чтобы минимизировать прохождение воздуха; медный диск с толщинами 0,5 и 1,5 мм с диаметром на 0,2 мм меньше диаметра СНС; медный диск на фольге с загнутыми вверх краями, для сравнения также были проведены опыты с открытым песком.

В случае экранирования фольгой при амплитуде разрыва 33 кПа падающий (основной) импульс проходит без искажений, на зондирующем импульсе на уровне датчика D1 формируется пик на переднем фронте, амплитуда которого вдвое превышает амплитуду основного импульса. При прохождении слоя 105 мм между датчиками D1-D2 основной и зондирующий импульсы сильно затухают. Для амплитуды разрыва 55, 65, 98 кПа на зондирующем импульсе пик не образуется, форма его близка к форме основного.

При экранировании насыпки медным диском толщиной 0,5 мм ударно-волновой импульс амплитудой 33 кПа не приводит к образованию пика на зондирующем импульсе. При амплитуде основного импульса 66 и 95 кПа на зондирующем образуется симметричный пик и полочка на заднем фронте. В случае более толстой мембраны из меди (1,5 мм) характерным является то, что при малом давлении (33 кПа) крутизна основного импульса существенно уменьшается, как в рыхлом песке [3].

Эксперименты с медным диском (1,5 мм) на фольге показали, что форма зондирующего импульса практически повторяет форму падающего, при прохождении зондирующего импульса пики не формируются.

Установлено:

– амплитуда сформировавшегося в песке основного импульса меньше амплитуды импульса без экранирования порядка 10%;

– при экранировании фольгой для малых амплитуд разрыва (33 кПа) на зондирующем импульсе формируется четкий пик на переднем фронте с амплитудой вдвое выше основного, при больших амплитудах пик не формируется;

– небольшая щель между инертным диском (толщинами 0,5 и 1,5 мм) и стенками трубы порядка 0,2 мм приводит формированию пиков на зондирующем импульсе, возрастающих с увеличением амплитуды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-11-00274, <https://rscf.ru/project/24-11-00274>

Список литературы

1. Ахметов А. Т., Гималтдинов И. К., Мухаметзянов А. Ф., Гизатуллин Р. Ф., Эффект усиления ударных волн в насыпных средах, Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, том. 519, 41-46, 2024
2. Ахметов А. Т., Гималтдинов И. К., Азаматов М. А. [и др.], Зондирование водогазонасыщенных насыпных сред переотраженными волнами непосредственно после воздействия ударной волны, Письма в Журнал технической физики, том. 48, 23-26, 2022
3. Ахметов А. Т., Гималтдинов И. К., Мухаметзянов А. Ф., Выявление условий формирования пиков давления в зондирующем импульсе, Инженерно-физический журнал, том. 98, 190-196, 2025

Разработка и физические особенности применения адаптивных механизмов крыла в условиях обледенения и обильных осадков

Амелюшкин И. А.¹, Губский В.В.¹, Кудров М.А.², Павленко О.В.^{1,2}, Дружинин О.В., Мусса Х.²

¹TsAGI

²MIPT

e-mail: Amelyushkin_Ivan@mail.ru

Моделирование и управление взаимодействием дисперсных сред с обтекаемым телом представляет большой интерес в широкой области практических приложений [1–5] – обледенение, снижение трения, управление тепломассобменом и др. В настоящей работе развиты модели, исследована и показана возможность противодействия обледенению летательной техники путем использования адаптивных механизмов крыла. Разработаны, исследованы и созданы новые конструкции адаптивных крыльев. Показано влияние материала и формы обтекаемого тела на взаимодействие с ним переохлажденных капель, кристаллов льда и других частиц естественного происхождения. Разработаны математические модели и программы расчета обтекания тел произвольной физической природы с учетом основных процессов, сопровождающих взаимодействие с обтекаемым телом гетерогенного потока, состоящего из частиц произвольной физической природы. Показаны преимущества и недостатки применения адаптивной механизации крыла в условиях

обледенения, рассмотрены проблемы перекрытия щели льдом, образованным на носовой части закрылка. Достоверность обоснована сравнением с данными физического эксперимента[1] и верификацией численного моделирования. Численное исследование проведено на модели гражданского самолета [2], скомпонованного из фюзеляжа и крыла с отклоненной механизацией в условиях захода на посадку. Показаны преимущества адаптивного крыла с точки зрения аэродинамики и борьбы с обледенением, исследованы процессы налипания льда на щелевое механизированное крыло и бесщелевое адаптивное крыло. Исследованы физические особенности, описаны физические механизмы, сформулированы практические рекомендации.

Список литературы

1. Anderson D.N. Rime-, Mixed- and Glaze-Ice Evaluations of Three Scaling Laws // 32nd Aerospace Sciences Meeting & Exhibit January 10-13, 1994 / Reno, NV
2. Мусса Х., Павленко О.В. Численные исследования обтекания щелевой и бесщелевой механизации крыла магистрального самолета в реальных условиях полета // Письма в ЖТФ, 2024, том 50, вып. 23, С.34-36
3. Амелюшкин И.А., Дружинин О.В. Адаптивное крыло с профилем изменяемой кривизны // Патент на изобретение 2777139 С.1, дата выдачи 01.08.2022, Заявка № 2021119711 от 06.07.2021.
4. Амелюшкин И.А., Кривопалова Е.В., Кудров М.А. Особенности взаимодействия жидкости с поверхностью в приложении к проблеме обледенения летательных аппаратов. Научный вестник МГТУ ГА. 2024; 27(5):8-23.
<https://doi.org/10.26467/2079-0619-2024-27-5-8-23>.
5. Амелюшкин И.А. Критерии подобия и особенности обледенения тел в потоках воздуха, содержащего переохлажденные капли // Ученые записки ЦАГИ – 2023, Т. LIV, № 3, С. 22–41.

Ударная сжимаемость железа при высоких плотностях энергии

Хищенко К. В.¹

¹ОИВТ РАН

e-mail: konst@ihed.ras.ru

Для решения физических задач, связанных с гидродинамическим моделированием разнообразных процессов при интенсивном импульсном воздействии на вещество, необходимо знать уравнение состояния рассматриваемого материала во всем реализуемом диапазоне термодинамических характеристик. В качестве примера таких процессов можно указать взаимодействие интенсивного лазерного излучения с веществом или высокоскоростное соударение твердых тел. В подобных процессах может произойти повышение внутренней энергии вещества, как и давления с плотностью при нагружении с последующим охлаждением и расширением при разгрузке. Построение уравнения состояния вещества в широком диапазоне плотностей и давлений обычно осуществляется в рамках полуэмпирических моделей. В таких моделях из теоретических соображений выбирается вид

функциональной зависимости термодинамического потенциала от термодинамических переменных, а экспериментальные данные привлекаются для нахождения числовых констант в этой зависимости, что обеспечивает согласованное описание свойств вещества в удобной для практического использования форме.

Настоящая работа посвящена полуэмпирическому описанию свойств железа при высоких плотностях энергии. Уравнение состояния металла строится на основе зависимости удельной внутренней энергии от удельного объема и давления. Учитывается холодная часть энергии и тепловой вклад. Для холодной энергии используется новая форма зависимости, обеспечивающая правильную асимптотику внутренней энергии и давления в пределе высоких степеней сжатия в случае нерелятивистского движения электронов в веществе. Для тепловой части описание проводится в рамках квазигармонического приближения. По полученному уравнению состояния проведены расчеты ударной сжимаемости твердых образцов железа различной начальной пористости. При сжатии таких образцов в достаточно интенсивной ударной волне происходит нагрев и плавление вещества, а в последующей волне изэнтропического расширения возможно испарение жидкой фазы. Результаты расчетов ударных адиабат сплошных и пористых образцов железа представлены в сравнении с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов. Это сравнение демонстрирует хорошее согласие расчетных кривых с экспериментальными точками. Полученное уравнение состояния железа может быть эффективно использовано при численном моделировании гидродинамических процессов в металле при высоких плотностях энергии.

Другие вопросы физики

«Белый список»: смена мерности или парадокс посева на турнире

Истомина Н. Л.

ОФН РАН

Недавно опубликована российская часть Единого государственного перечня научных изданий (ЕГПНИ или «Белого списка»). В него вошли 3125 научных журналов, публикующих результаты научных исследований: на 1 уровне – 635 изданий, отнесенных ко 2 уровню – 706 изданий, к уровню 3 – 917 и к уровню 4 – 867.

Свои мысли в виде статей оформляют тысячи людей. Можно ли оцифровать весь мир человеческих мыслей? Уровни, ключи, кварталы журналов – это свойства нашего восприятия важности информации. Но это и попытка распределителя финансовых средств создать рамки, фундаментальный framework, которую он накладывает на реальность, чтобы сделать ее для себя упорядоченной и измеримой. Новое пространство, полученное путём наращивания размерностей, является не более чем математической абстракцией, то есть игрой воображения, и введение ключевых показателей эффективности KPI (Key Performance Indicators) — попытка объективно оценивать результаты работы института, то есть компании.

Публикации научных результатов – это не просто игры разума. Это бизнес. Романтизация великих идей, отражающихся на страницах научных журналов, на этом заканчивается. Можно радоваться красоте мысли, лаконичности методики измерений. Но возникают деловые отношения между научными группами, грантодателями, грантополучателями, между научными сотрудниками. Авторские результаты стали легко перемещаться через границы. Появился рынок научных журналов, все ранжирование и дизайн правил появились как раз с того момента, когда этот рынок начал очень быстро расти. Постепенно складывается цепочка участников рынка. Инвесторы готовы вкладываться в журнальный бизнес. Тогда по законам жанра должны появиться те, кто создает правила. Так появляется некий орган, например, например РЦНИ, который подобен ФИФА, живущей одним событием раз в 4 года (чемпионат мира по футболу).

Темпы роста мировой экономики зависят от научного задела. Когда деньги приходят на рынок научных результатов, то те, кто приносит деньги, хотят распоряжаться ими по неким правилам. В такой ситуации возникает необходимость иметь данные для более точного принятия решений.

Если посмотреть на проблему подготовки научных кадров и трансфер технологий в индустрию более глобально, то это и взаимодействие руководителей научных групп, которые выбирают стратегию проведения серии экспериментов, это и взаимодействие руководителей научных институтов, которые подбирают состав команды и приглашают (покупают) новых сотрудников.

Ситуация развивается очень похоже на развитие рынка футбольной индустрии. Справедливо ли утверждение, что переход игрока из одного клуба в другой отражает его ключевые профессиональные способности? Нет, не только, – есть еще и медийные поводы. Если стоимость продукта на рынке, например, производителей макаронных изделий, можно прогнозировать, так как производителей и потребителей этих продуктов много, то футбольных команд мало. А потому нет понятного рынка для определения стоимости футболиста. Так нет понятного рынка научных журналов. KPI у журналов разный. ЕГПНИ – это попытка оцифровать журналы. Генерация огромной базы данных поможет распознать лидеров, и на их поле обнаружить итоговую трансферную цену.

Ранжирование журналов на уровни, квартили и тому подобные структуры – это мероприятия, подобные турнирам на выбывание, или турнирам по олимпийской системе. Появляются задачи из области создания дизайна правил проведения турниров. Одна из задач – оптимальный посев команд турнира.

То есть перед началом турнира команды можно ранжировать по силе. Турнирная сетка строится в зависимости от целевой функции организаторов. А какая она? Она может строиться по олимпийской системе формата турнира на выбывание, а может быть – собрать максимальное количество денег, а может быть и другая. Чем меньше разница сил участников матча, тем выше готовность болельщиков платить за просмотр такого матча. Таким образом, организаторы турнира могут поставить перед собой задачу максимизации прибыли по какому-то параметру. Рассматриваем эту ситуацию не с точки зрения наукометрии, а как аналогию с журналами.

В новом Белом списке наблюдается дисбаланс между академическими традиционными журналами и новыми быстро рождающимися журналами, доступными на издательском рынке. Сложность измерения квалификации (уровней значимости) журналов опирается на несоответствие применений инструментария наукометрии для оценки качества научных журналов и публикуемых результатов, методик определения их KPI и разногласие принятия авторитарных решений органов, создающих правила. Можно ли сделать шансы журналов равными? Этот дискуссионный вопрос рассматривается в предлагаемом докладе.

Список литературы

1. Рубинштейн А.Я. О наукометрических рейтингах и журнальной ВАКханапии. *Экономический журнал ВШЭ*. 2023; 27(2): 290–305. DOI: 10.17323/1813-8691-2023-27-2-290-305
2. Рубинштейн А.Я., Бураков Н.А. (2023). Журнальный табель о рангах: теория, методология, библиометрия. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. Т. 16. № 6. С. 174–190. DOI: 10.15838/esc.2023.6.90.10

Дагаев Д.А., Еремин Г.А. Анализ факторов, влияющих на ценообразование трансферов в европейском профессиональном футболе. Журнал НЭА, № 4 (40), 2018, с.

174–183. DOI: 10.31737/2221-2264-2018-40-4-8

Механизм лазерного спекания полимерных структур с использованием воды

Минаева Е. Д.¹, Попырина Т.Н.², Дёмина Т.С.², Игнатьева Н.Ю.³, Юсупов В.И.¹, Минаев Н.В.¹

¹ИФТ КККиФ

²МАИ

³МГУ М.В. Ломоносова

e-mail: minaeva.e.d@bk.ru

Полимерные материалы играют ключевую роль в создании искусственных тканевых эквивалентов, матрицы для которых могут быть сформированы методом поверхностно-селективного лазерного спекания (ПСЛС). Перспективный ПСЛС использует инфракрасное лазерное излучение с $\lambda=1,9$ мкм и воду в качестве сенсibilизатора. Это обеспечивает минимальное воздействие на полимерные структуры и способствует формированию матриц с оптимальной биосовместимостью [1]. Предполагается, что возможность формирования структур обусловлена локальным прогревом только поверхностного гидратированного слоя полимерных микрочастиц [2-5]. Это связано с тем, что лазерное излучение с $\lambda=1,9$ мкм имеет высокий коэффициент поглощения в воде и низкий в материале полимера.

Тем не менее, на сегодняшний день механизм ПСЛС с использованием воды в качестве сенсibilизатора остается недостаточно изученным. Совершенно неясно, каким образом вообще происходит спекание. Так, согласно данным, полученным с использованием тепловизионных измерений, температуры при лазерном воздействии оказываются значительно ниже тех, которые необходимы для перехода полимера в низковязкое состояние, и даже ниже температуры кипения воды. Одно из возможных объяснений связано с некорректным измерением температуры поверхности полимера из-за неучета уровня серости, поглощения излучения в парах воды и образования спекл-структур в приповерхностном слое материала.

Целью работы является в прояснении механизма лазерного спекания полимерных структур с использованием воды с помощью мультиспектральной термографии и численного моделирования.

Первоначально производилась подробная характеристика спекаемого материала, включающая в себя измерения геометрических и оптических характеристик микрочастиц, анализ термограмм ДСК ТГ, насыпной плотности при использовании различных видов полимерных частиц.

Затем на калибровочном стенде с двумя термографами, работающими в спектральных диапазонах 3-5 мкм и 8-14 мкм, получены зависимости отклонений измеряемой и истинной температуры поверхности полимера от температуры, угла обзора, типа полимерных

микрочастиц и увлажнения. Далее, на установке ПСЛС для двух образцов проведены экспериментальные исследования температурных полей, возникающих при формировании линейных структур с различными параметрами воздействия и скоростями перемещения пятна. На заключительном этапе проведено численное моделирование температур и оптических полей, возникающих в приповерхностных слоях полимерного материала при ПСЛС.

В результате проведенных исследований было показано, что эффективное спекание полимерных частиц в присутствии воды может происходить при средних температурах ниже тех, которые необходимы для перехода полимера в низковязкое состояние. Обсуждается влияние спекл структур, а также перегрева воды в микропорах на механизм ПСЛС.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. Баграташвили В.Н., Антонов Е.Н., Попов В.К., Юсупов В.И. Установка для формирования биосовместимых структур // Патент №150514. 20.02.2015 Бюл. №5.
2. Минаев Н.В., Антонов Е.Н., Минаева С.А. и др. Установка для исследования процессов поверхностно-селективного лазерного спекания порошковых биосовместимых материалов // Приборы и техника эксперимента. 2019; № 1:150–152.
3. Антонов Е.Н., Кротова Л.И., Минаев Н.В., и др. Поверхностно-селективное лазерное спекание термолабильных полимерных частиц с использованием воды как сенситизатора нагрева. // Квантовая электроника. 2015;45(11):1023-8.
4. Минаев Н.В., Демина Т.С., Минаева С.А. и др. Развитие метода поверхностно-селективного лазерного спекания: модификация и формирование 3D структур для тканевой инженерии. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020;84(11):1530-6.
5. Popyrina T.N., Minaeva E.D., Emelyanov K. V. et al. Alkylated derivatives of chitosan for stabilization of polylactide microparticles used as building blocks for 3D structures // Polymer Engineering & Science. 2025; 65(2): 873-883

Synergistic effect of SPD and hydrogenation on superplasticity of Ti-2Fe-0.1B alloy

Konglan Meng¹, Yuecheng Dong², Igor V. Alexandrov¹

¹Ufa university of science and technology

²Nanjing Tech University, Nanjing

e-mail: 19172026074@163.com

Titanium alloys have low specific gravity, high strength, and high corrosion resistance. The unique properties of titanium alloys lead to high demand for titanium alloy products in various industries, including aviation, automotive, marine and medicine.

The chemical and phase compositions significantly affect the properties of titanium alloys, including strength and superplasticity. In this regard, the search for new titanium alloy compositions, including those modified using cheap chemical elements, is relevant.

Several years ago the development of a titanium alloy Ti-2Fe-0.1B, which contains a cheap element Fe, was done. Fe can be used as a substitute for the alternative Al, V elements, reducing production costs, but also as -stabilizing element, which can effectively improve the thermal stability of the alloy. A small amount of B is added to form TiB phase, which eliminates embrittlement, promotes grain refinement, and improves the mechanical properties of the alloy.

Appropriate hydrogen treatment improves the microstructure of Ti-2Fe-0.1B alloy, reduces the resistance to deformation at elevated temperatures, promotes the superplastic behavior, and enhances the machinability.

It is known that the structural and functional properties of metallic materials can be significantly improved by using the method of severe plastic deformation (SPD), which allows the formation of ultrafine-grained nanostructured states in various metallic materials, including titanium alloys.

This paper presents the results of a study of the synergistic effect of SPD and hydrogenation on the manifestation of the superplasticity effect in the Ti-2Fe-0.1 alloy. The studies were conducted on the alloy in various states, including the initial state obtained by double melting in vacuum arc melting furnace and then rolled, the hydrogenated state, the state after SPD by high pressure torsion (HPT), and the hydrogenated state subjected to HPT.

Superplastic tensile tests were carried out on Ti-2Fe-0.1B alloy in the above mentioned structural states at a deformation temperature of 500 °C and a strain rate of $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. The effect of the structural state of the superplastic behavior was investigated. These results provide valuable insights into the microstructural evolution of hydrogenated Ti-2Fe-0.1B titanium alloy during superplastic deformation and lay the groundwork for future application of superplastic deformation in industry.

Keywords: Ti-2Fe-0.1B alloy, Superplastic deformation, hydrogenation

Acknowledgement

This research was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 23-43-00041(<https://rscf.ru/project/23-43-00041>), and the National Natural Science Foundation of China, grant No. 52261135539.

Влияние магнитного поля на магнитоупругую динамику плёнок с параметрами марганец-цинковой шпинели в области магнитного фазового перехода

Майбуров М. В.¹, Котов Л.Н.¹, Абрамовский И.Е.¹

¹Сыктывкарский государственный университет

e-mail: mayburov@rambler.ru

Нелинейная магнитоупругая динамика магнитных плёнок в области магнитных фазовых переходов в настоящее время начинает привлекать повышенное внимание исследователей

[1, 2]. Многообразие режимов магнитных колебаний в магнитных плёнках даёт возможность использовать их в нелинейных устройствах преобразования частоты, сверхчувствительных датчиках магнитного поля, а также в качестве поглотителей электромагнитного поля, акустических колебаний и волн. Несмотря на достаточно большое количество исследований по данной тематике за последние годы многие из нелинейных эффектов, связанных с особенностью кристаллической структуры твердых тел, особенно в области магнитных фазовых переходов, продолжают оставаться мало изученными [2]. Согласно результатам моделирования магнитоупругой динамики в работах [1, 2] были выявлены новые нелинейные колебательные режимы вектора намагниченности в пластине, внутренние параметры которой выбирались в соответствии материальным параметрам кристалла марганец-цинковой шпинели (МЦШ) нестехиометрического состава $Mn_{0.61}Zn_{0.35}Fe_{2.04}O_4$, для которого выполняются условия магнитного ориентационного перехода в некотором интервале температур [2]. Данная работа является продолжением работ [1, 2] и раскрывает новые особенности по влиянию постоянного магнитного поля на нелинейную магнитоупругую динамику в плёнках МЦШ с охватом области магнитного переориентационного перехода, при её возбуждении СВЧ переменным магнитным полем. Вблизи нулевых значений K_1 наблюдается магнитные и упругие колебания бесконечно малой амплитуды и гигантское затухание колебаний [2]. Малое значения постоянного поля, возбуждает колебания различной амплитуды, при этом затухание колебаний значительно уменьшается. На кривых зависимостей магнитных компонент от отношения констант анизотропии K_1/K_2 обнаружены узкие пики, обусловленные ферромагнитным резонансом (ФМР), которые отсутствуют для амплитуды упругого смещения. Амплитуды упругого смещения возрастают при увеличении значений $|K_1|$ вплоть до достижения максимальных значений компонент намагниченности, после чего их значения достигают насыщения. Обнаруженное отсутствие пика ФМР на зависимостях упругих смещений в отличие от магнитных компонент можно объяснить значительными различиями в релаксационных частотах колебаний упругой и магнитной подсистем кристалла МЦШ. Результаты моделирования магнитоупругой динамики плёнок с параметрами МЦШ сравнивались с экспериментальными результатами по затуханию упругих волн в области магнитного ориентационного перехода и влияния на них постоянного магнитного поля, полученными для кристалла МЦШ [1].

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №21-72-20048).

Список литературы

1. Л.Н. Котов, П.А. Северин, В.С. Власов, Д.С. Безносиков, Е.Л. Котова, В.Г. Шаров. Магнитные и упругие колебания в кристаллах марганец-цинковой шпинели в зависимости от константы анизотропии // Физика твердого тела, 2018, том 60, вып. 6. 1142-1146 с. DOI:10.21883/FTT.2018.06.45989.25M
2. Л. Н. Котов, П. А. Северин, В. С. Власов, В. В. Миронов. Магнитные и упругие колебания в кристалле марганец-цинковой шпинели в области спиновой переориентации // Известия РАН. Серия физическая, 2023, том 87, № 3, с. 422–428. DOI:10.31857/S0367676522700740

Управление локализованными структурами генерации в полупроводниковом лазере обратной оптоэлектронной связью

Мамаев И. С.¹, Ковалев А. В.¹, Викторов Е. А.¹

¹ИТМО

e-mail: is_mamaev@itmo.ru

Управление локализованными импульсными пакетами в лазерах представляет собой перспективное направление в области оптической обработки информации и нейроморфной фотоники. Локализованные структуры (ЛС) характерны для нелинейных систем и обычно возникают в результате сосуществования структурированных и однородных состояний. Как известно, генерация ЛС в полупроводниковом лазере возможна за счет эффекта возбуждимости, то есть реакции на внешние возмущения генерацией одиночных или периодических импульсов, взаимодействия между различными продольными модами лазера или фронтами между различными состояниями интенсивности, которые могут стабилизироваться за счет нелинейных эффектов [1]. При этом генерация случайных импульсов является стохастическим возбуждимым событием и может быть вызвана детерминированным образом, например посредством коротких фазовых возмущений [2] в фазово-синхронизированной области платформы, основанной на лазере с квантовыми точками.

В настоящей работе рассматривается возможность детального контроля и управления ЛС, в системе на основе полупроводникового лазера с положительной нелинейной оптоэлектронной обратной связью [3]. Оптоэлектронная обратная связь в лазерном диоде приводит к характерному набору динамических особенностей, включая хаотические всплески импульсов [4]. В двумерных фазовых пространствах нерегулярные всплески возникают вблизи бифуркаций неподвижных точек или предельных циклов только при наличии шума. Временная шкала этой динамики определяется фильтром верхних частот в контуре обратной связи и находится в наносекундном диапазоне. Вблизи порога лазерной генерации возможно формирование различных устойчивых режимов генерации лазерных импульсов. При этом локальное во времени изменение параметров накачки позволяет управлять отдельными импульсами внутри структуры, добавлять или убирать их.

В настоящей работе показано, что при увеличении времени задержки обратной связи возможно стабильное сосуществование пачек таких управляемых импульсов. Особенностью данной системы является отсутствие дополнительных внешних условий для стабилизации и управления локализованными структурами. Это обеспечивает перестройку динамики импульсов, позволяя эмулировать нейронное поведение, что может быть использовано для решения задач нейроморфных вычислений, включая распознавание образов и обработку сигналов.

Список литературы

1. Camelin P. et al. Electrical addressing and temporal tweezing of localized pulses in passively-mode-locked semiconductor lasers // Phys. Rev. A. American Physical Society. 2016. Vol. 94. P. 063854.

2. Dillane M., Lingnau B., Viktorov E. A. et al. Asymmetric excitable phase triggering in an optically injected semiconductor laser // Optics Letters. 2021. Vol. 46. PP. 440–443.
3. Md Shariful Islam, Kovalev A., Viktorov E. et al. Optical square-wave generation in a semiconductor laser with optoelectronic feedback // Optics Letters. 2021. Vol. 46 № 24. P.6031.
4. Al-Naimee K., Marino F., Ciszak M. et al. Chaotic spiking and incomplete homoclinic scenarios in semiconductor lasers with optoelectronic feedback // New Journal of Physics. 2009. Vol. 11 № 7. P. 073022.

Спонсоры конференции



ТИДЕКС

НАУЧНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ОПТИКА

ОПТИКА ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ, FTIR И ТЕСТИРОВАНИЯ:

внеосевые параболические зеркала, делители-компенсаторы для FTIR, плоские и сферические зеркала, окна, призмы, голографические notch-фильтры, ИК-поляризаторы, ATR-элементы



ОПТИКА ДЛЯ ПИРОМЕТРИИ И ТЕРМОГРАФИИ: фронтальная оптика для тепловизионных ИК-систем: сферические и асферические линзы из Si (включая EMI-grade), Ge (включая EMI-grade), ZnSe и ZnS, защитные стекла, обтекатели, иллюминаторы

ОПТИКА ДЛЯ СЕНСОРОВ И ДЕТЕКТОРОВ: компоненты для высокотемпературных сенсоров, пиранометров, пиргеометров, для C_2H_4 -, NH_3 -, CO_2 -, CO- и CH_4 - детекторов

ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ: Ge, Si, GaAs, ZnS, ZnSe, CaF_2 , BaF_2 , MgF_2 , LiF, сапфир (оптический и профилированный), KBr, NaCl, KCl, плавленный и кристаллический кварц, оптические стёкла, ситалл, TPX, Zeonex, TOPAS, керамика

ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ: просветляющие, диэлектрические отражающие, металлические, комбинированные, ИК-солнцезащитные, алмазоподобные, токопроводящие, ТГц просветляющие покрытия

ЗАЩИТНАЯ ФРОНТАЛЬНАЯ ОПТИКА ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ

ПРИМЕНЕНИЙ: Системы раннего обнаружения, дневного и ночного наблюдения, контроля пространства, слежения, прицеливания, удержания и сопровождения объектов широко используют ИК оптику. ООО «ТИДЕКС» производит:



- Защитные окна для прицелов и тепловизоров, работающих в диапазоне 3-5 мкм и 7-14 мкм;
- Менисковые линзы для тепловизионных систем наведения, ориентирования в пространстве, слежения и сопровождения движущихся объектов;
- Оптические окна-пленки прозрачные в диапазонах 3-5 мкм и 7-14 мкм для БПЛА.

Система менеджмента качества компании применительно к разработке, производству и поставке оптических изделий из стекла, кристаллов и пластиков, оптических систем и оптико-электронных приборов соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2015.

ООО «ТИДЕКС», 194292 Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, д. 16.

Тел: (812) 334-67-01, (812) 331-87-02 Факс: (812) 309-29-58

E-mail: optics@tydex.ru, вебсайт: www.tydex.ru



ТИДЕКС

НАУЧНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ ОПТИКА

ТГц ПРИБОРЫ: детекторы Голя, комплекс для работы детекторов Голя с ПК, оптико-механический модулятор, комплекс калибровки детекторов Голя, ТГц сканирующие интерферометры Фабри-Перо, синхронный усилитель, электрооптический детектор импульсного ТГц излучения

ТГц УСТРОЙСТВА: фотопроводящие антенны, перестраиваемый прецизионный аттенюатор, дифракционные решетки, объективы, аттенюаторы, расширители пучка, длинноволновые и полосовые резонансные фильтры, фильтры высоких частот, кюветы

ТГц ПОЛЯРИЗАТОРЫ: плёночные и проволочные поляризаторы, проволочные поляризаторы микроволнового излучения широкополосные фазовые преобразователи, перестраиваемые преобразователи поляризации, моно- и ахроматические волновые пластины, сегментные волновые пластины

ТГц ОПТИКА: окна, линзы, линзы Френеля, f-theta линзы, призмы, зеркала, спектроредители, лучеделители



Система менеджмента качества компании применительно к разработке, производству и поставке оптических изделий из стекла, кристаллов и пластиков, оптических систем и оптико-электронных приборов соответствует требованиям
ГОСТ Р ИСО 9001-2015.

ООО «ТИДЕКС», 194292 Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, д. 16.

Тел: (812) 334-67-01, (812) 331-87-02 Факс: (812) 309-29-58

E-mail: optics@tydex.ru, вебсайт: www.tydex.ru

ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ИМПУЛЬСНЫЕ YAG ЛАЗЕРЫ

Энергия в импульсе до 2,5 Дж
П-образный профиль луча
Частота следования импульсов до 200 Гц
Все гармоники от 1064 до 213 нм
Регулируемая длительность импульса
Регулируемая форма импульса



ФЕМТО- И ПИКОСЕКУНДНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Длительность импульса до 110 фсек
Выходная мощность до 7 Вт
Выходная энергия до 1 мДж
Генераторы гармоник
Диодная накачка
Селектор импульсов

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ЛАЗЕРЫ

Ti:Sapphire лазеры, DFG-преобразователи
Параметрические генераторы света
Перестройка длины волны от 0,2 до 20 мкм
Ширина линии генерации до 0,005 нм
Энергия в импульсе до 100 мДж



ЛАЗЕРЫ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Компактный и «сухой» промышленный дизайн
Встроенные или внешние генераторы гармоник
до 150 мДж в импульсе при частоте 20 Гц
до 3 Вт @ 355 нм при частоте 30 кГц

СПЕКТРАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

МОНОХРОМАТОРЫ-СПЕКТРОГРАФЫ

- Одинарные и двойные
- Фокусное расстояние от 44 до 522 мм
- Широкий выбор регистраторов оптического излучения



СПЕКТРОМЕТРЫ

- Спектральный диапазон от 190 до 2560 нм
- Высокая чувствительность
- Многоволоконный ввод

ИЗМЕРИТЕЛИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРОВ И ДИОДОВ

- Спектральный диапазон от 190 до 1800 нм
- Точность определения длины волны ± 3 пм
- Анализ полуширины и формы спектральной линии



ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

- Диапазон перестройки от 190 до 2500 нм
- Спектральное разрешение до 0,1 нм

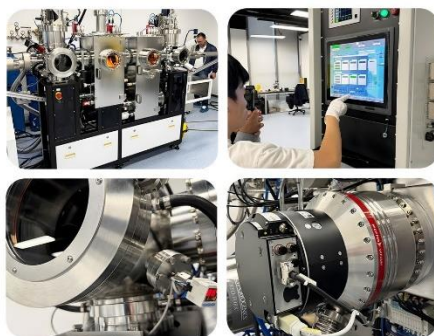
5 стран
9+ компаний



ВАКУУМНОЕ, КРИОГЕННОЕ И ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Группа компаний «Криосистемы» занимает лидирующие позиции как в РФ, так и в дружественных зарубежных юрисдикциях по всем вопросам, касающимся создания и разработки сложных конструкторских схем и документации, сборочных чертежей, реализации масштабных технических проектов.

- **ПОСТАВКИ ОБОРУДОВАНИЯ**
- **МОНТАЖ И ПУСКО-НАЛАДОЧНЫЕ РАБОТЫ**
- **КОНСТРУКТОРСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ**
- **СЕРВИСНОЕ, ГАРАНТИЙНОЕ И ПОСТГАРАНТИЙНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ**



ДОЛЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ОБОРОННЫХ ЗАКАЗОВ И ГОСУДАРСТВЕННЫХ КОНТРАКТОВ

75%

в 2022-2024

ОБЩАЯ СУММА ДОГОВОРОВ И КОНТРАКТОВ

1,7 млрд ₽

в 2022-2024

ОБЩИЙ ОБОРОТ ПРОДУКЦИИ И УСЛУГ

3,75 млрд ₽

в 2022-2024

РЕАЛИЗОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ >300

за время существования компании

ГК «Криосистемы» обеспечивает государственные предприятия РФ высокотехнологичным оборудованием и современными технологиями в образовании, медицине, науке, космосе и атомной отрасли.

НАШИ ЗАКАЗЧИКИ:



Приглашаем к сотрудничеству! Будем рады стать Вашим надежным партнёром и поставщиком: **+7 (495) 215-55-65 | cryosystems.ru | info@cryosystems.ru**

Инжекционный электростатический септум ОИЯИ, Дубна, 2017-2019

Разработка вакуумного комплекса «Септум» с двумя цилиндрическими камерами (Ø450 мм и Ø320 мм), соединёнными сильфоном Ду160. Оборудован электродами, UHV-откачкой, датчиками вакуума и фланцами ускорителя. Сдан «Под ключ».

Вакуумная установка для электронно-лучевой сварки, 40 м³ НИТИ-Прогресс, Ижевск, 2019

ГК «Криосистемы» разработала безмасляную систему откачки вакуумной камеры 40 м³ для ОАО «НИТИ «Прогресс». Установка достигает давления 1×10^{-4} Торр за 20 минут благодаря винтовому, турбомолекулярному и криогенным насосам.

Сверхвысоковакуумная установка для тепловых испытаний элементов космической техники Роскосмос, 2018-2020

Установка объёмом 0,2 м³ предназначена для испытаний материалов и элементов пилотируемого корабля при давлении 10^{-6} – 10^{-10} мм рт. ст. и температуре 77–393 К.

Мишенная камера ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2022-2023

ГК «Криосистемы» разработала и поставила вакуумную камеру для оптических испытаний в Институте прикладной физики. Оснащена оптическим столом с резьбовыми отверстиями для фиксации мишеней.

Установка КРИОС ТВУ 1,0/16.1000.825 с термостолом и замкнутым термостатом Корпорация «Комета», Москва, 2024

Разработка тепловывакуумной установки 1,0 м³ с безмасляным вакуумом до 1×10^{-6} мм рт. ст. на насосах Anest Iwata и Pride Cryogenics. Оборудована термостолом (70...+100 °C), термостатом Huber, ASU. Первичная аттестация по ГОСТ Р 8.568, 53618, 54437.

ПРОИЗВОДСТВО ВАКУУМНЫХ КОМПОНЕНТОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

Мы специализируемся на разработке и производстве высокоточных вакуумных систем, компонентов и узлов для научных исследований и промышленных применений. Наши инженеры проектируют и изготавливают нестандартное оборудование, полностью соответствующее потребностям заказчиков.

Мы обеспечиваем полный цикл — от идеи до ввода в эксплуатацию. Это позволяет нашим клиентам получать готовые решения, адаптированные под конкретные задачи и гарантированно соответствующие международным стандартам.

- **ПРОЕКТИРОВАНИЕ С УЧЁТОМ СПЕЦИФИКИ ЗАДАЧИ**
- **ПРОИЗВОДСТВО И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА НА КАЖДОМ ЭТАПЕ**
- **ФИНАЛЬНАЯ СБОРКА И НАСТРОЙКА ОБОРУДОВАНИЯ**



Наши компетенции:

Термическое и магнетронное напыление тонких плёнок.

Современные методы создания покрытий с высокой точностью и воспроизводимостью.

Электронно-лучевое нанесение материалов (Nb, Ti, Al и др.).

Высокая степень чистоты и контроль над процессом осаждения.

Химическое паро-осаждение (CVD).

Получение плёнок с уникальными свойствами для микроэлектроники и нанотехнологий.

Пульсационно-лазерное осаждение тонких плёнок.

Передовая технология для формирования функциональных покрытий.

Сверхвысоковакуумные установки.

Применяются для процессов напыления, травления и анализа материалов.

НАШ ОПЫТ И ПРЕИМУЩЕСТВА:

>20 лет

лет на рынке

Университеты, НИИ и ОПК

Мы понимаем специфику научных исследований и работу в высокотехнологичных отраслях.

Нормы и стандарты

Вся продукция проходит строгий контроль качества и отвечает международным требованиям.

Реализация под ключ

От разработки концепции и проектирования до сборки, испытаний и передачи оборудования заказчику.

Решения для науки

Оборудование для экспериментов в области физики, материаловедения, квантовых технологий и смежных направлений.

Полный производственный цикл

Заготовка, механическая обработка, сварка, финальная сборка.

Квантовые технологии и инженерия.

Оборудование для задач квантовой физики и квантовых вычислений.

Криогенные системы и криостаты растворения.

Решения для достижения и поддержания сверхнизких температур в экспериментах.

Наши технологические установки используются как в фундаментальной науке, так и в прикладных направлениях, включая микроэлектронику и новые материалы. Мы проектируем и производим оборудование, которое позволяет решать задачи на стыке науки и промышленности.

ВАШ ИНТЕГРАТОР ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Приглашаем к сотрудничеству!
Будем рады стать Вашим надежным партнёром и поставщиком:

+7 (495) 215-55-65 | cryosystems.ru | info@cryosystems.ru



Астрономия и астрофизика	3
О возможном влиянии солнечного квазидвухвекового цикла на температуру Северного полушария Земли Огурцов М. Г.	4
Эксперимент TAIGA – новые результаты и перспективы развития. Буднев Н. М.	5
Влияние темпа фотоионизации на нагрев полярной шапки радиопульсара J0901-4046 Барсуков Д. П., Попов А.Н.	6
Исследование корреляций и частотно-фазовой синхронизации в динамике спектральной плотности потока радиоизлучения квазаров Демин С. А., Демина Н.Ю., Минкин А.В.	8
Оценка чувствительности детектора Борексина к ядерным переходам с нарушением принципа Паули Драчнев И. С., А.В. Дербин, И.С. Ломская, В.Н. Муратова, Н.В. Ниязова, Д.А. Семенов, Е.В. Унжаков.....	10
Спектральная эволюция коротких гамма-всплесков по наблюдениям в эксперименте Конус-Винд Свинкин Д. С. Пантелеева В. А., Фредерикс Д. Д., Лысенко А. Л.	11
Астероид 2024 PT5: «спутник» Земли сроком на два месяца Мартюшева А. А., Девяткин А.В., Петрова С.Н.	12
Особенности релятивистского вращения тел Солнечной системы на примере некоторых спутников Юпитера Пашкевич В. В., Вершков А. Н.....	13
Новые системы для оценки распространенности первичного дейтерия в SQUAD и KODIAQ Кислицын П. А., Балашев С.А., Иванчик А.В.	15
Проявление магнитного цикла Хейла на Солнце в вариациях характеристик солнечного ветра Веретененко С. В.....	16
Возможность детектирования излучения надтепловых частиц, ускоренных обратными ударными волнами в остатках сверхновых Зибинская Д. А., Кропотина Ю. А., Быков А. М.....	17
Спектральные задачи в теории галактического динамо: асимптотические и вычислительные подходы Михайлов Е. А., Желиговский В. А., Таранюк А. А., Фролова М. В.	19
Модельная оценка качества методики восстановления данных установки Tunka-Grande Иванова А. Л., коллаборация TAIGA	21

Моделирование расширенного основания эмиссионных линий в спектрах НП областей <i>Ананьев Я. О., Куричин О. А., Иванчик А. В.</i>	22
Накопление позитронов, образовавшихся при взаимодействии фоновых гамма- и оптических квантов <i>Попов А. Н., Барсуков Д.П., Иванчик А.В., Бобашев С.В.</i>	24
Об устойчивости орбитальной динамики кандидатов в спутники экзопланет <i>Мельников А. В.</i>	25
Создание физической модели спутника Сатурна Энцелада с использованием данных миссии «Кассини» <i>Мубаракшина Р. Р., Нефедьев Л.А., Андреев А.О., Нефедьев Ю.А.</i>	26
Условия и механизмы роста крупномасштабного магнитного поля во внешних областях галактических дисков <i>Хасеева Т. Т. , Михайлов Е. А.</i>	27
Создание синтетического метода распознавания планетарных объектов на основе нейронных сетей <i>Андреев А. О., Нефедьев Ю.А., Колосов Ю.А.</i>	29
Поиск дополнительных спектральных компонент и изломов спектра гамма-всплеска GRB 990123 <i>Белова С. И., Цветкова А.Е.</i>	30
Орбитальная эволюция околоземных астероидов, связанных с метеороидным потоком April chi-Librids <i>Сергиенко М. В., Нефедьев Ю.А., Андреев А.О.</i>	32
Анализ субсекундной структуры рентгеновских и радиовсплесков в солнечных вспышках <i>Шабалин А. Н., Чариков Ю.Е., Складорова Е.М.</i>	34
Нагрев и разрушение пористого поверхностного слоя кометного ядра <i>Быков Н. Ю., Андреева Т.А., Захаров В.В., Лукин А.Я., Шмыр Д.С.</i>	35
Моделирование транспорта космического излучения с учетом влияния плазменных и гравитационных неоднородностей <i>Лукьянцев Д. С., Афанасьев Н.Т., Танаев А.Б.</i>	36
Результаты наблюдения туманности Бумеранг с помощью установки TAIGA-HiSCORE <i>Самолига В. С.</i>	37
Анализ вспышечной активности мазеров H_2O в молекулярном облаке DR21OH <i>Латин Н. И., Лапинов А.В., Киселев А.К., Толмачёв А.М., Трофимова Е.А.</i>	38
Влияние распадов тяжелых стерильных нейтрино на наблюдаемый первичный химический состав вселенной <i>Киреев А. О., Куричин О.А., Иванчик А.В.</i>	39
Моделирование ускорения частиц и античастиц пульсарной туманностью в замагнитенной среде <i>Петров А. Е., Быков А.М.</i>	41

Разработка метода анализа данных лазерной локации Луны <i>Загидуллин А. А., Нефедьев Ю.А., Петрова Н.К., Jiangau Yan</i>	42
Исследование динамики осцилляций световой кривой гамма-всплеска GRB240825A <i>Дмитриев П. Б., Драневич В.А.</i>	43
Оценка изменения функционального состояния человека с помощью методики критической частоты слияния мельканий: особенности светового воздействия и видов нагрузки <i>Терехин С. Г., Власова О.Л., Черняков А.Е., Забродская Я.А., Аладов А.В.</i>	45
Конформационный анализ флавиномононуклеотида в растворах, влияние дисперсионного взаимодействия <i>Смолин А. Г.</i>	47
Экспериментальное изучение особенностей течения крови в микроканалах со стенозом и бифуркациями с помощью разработанных микрожидкостных устройств <i>Рахимов А. А., Валиев А.А.</i>	48
Динамика температурного поля в биологических тканях при локальном лазерном нагреве <i>Седова Ю. К., Свиридов А.П., Коновалов А.Н., Захаркина О.Л., Игнатьева Н.Ю.</i>	50
Использование метода главных компонент для анализа ИК спектров сыворотки крови пациентов с множественной миеломой <i>Бутяев Р. В., Чернышев, Д. А., Михайлец, Э. С., Плотникова Л.В., Поляничко А.М.</i>	51
Равновесная модель связывания интеркалирующего красителя SYBR Green I в ходе амплификации ДНК <i>Ибрагимов Д. Р., Федоров А.А.</i>	53
ABDS — прижизненный флуоресцентный DIY-краситель для оптической диагностики биоэлектронных интерфейсов <i>Абелит А. А., Бойцова Н. А., Ступин Д. Д.</i>	54
Исследование динамики одиночных белковых молекул с помощью твердотельного нанопорового SiN биосенсора <i>Ваулин Н. В., Друян Л. М., Афоничева П. К., Лебедев Д. В., Мухин И.С.</i>	56
Проточная ячейка для выделения нуклеиновых кислот <i>Петров Д. Г., Антифеев И.Е., М.В. Зайцева М.В., Гермаш Н.А.</i>	57
Влияние электронного излучения на эритроциты крови в патологии <i>Гоголева Т. Е., С.Н. Мамаева, М.М. Рычков, Г.В. Максимов</i>	59
Перспективы применения микрочип-лазера с длиной волны 1.55 мкм в лазерной биопечати <i>Ашихмин Д. И., Седова Ю.К., Шаленов А.С., Минаев Н.В., Юсупов В.И.</i>	60
Подходы к детектированию наличия патологии крови: синергия аппаратной реализации методов БИК-спектрометрии и интеллектуального анализа данных <i>Мазинг М. С., Зайцева А.Ю</i>	62
Методика адаптации процесса сорбции в микрофлюидной системе <i>Михайлова О. А., Зайцева М. В., Антифеев И. Е, Петров Д. Г.</i>	63

Исследование процесса абсорбции воды алифатическими полиэфирами <i>Дунаев А. Г., Минаев Н.В., Минаева С.А., Попов В.К., Трифанова Е.М., Свиридов А.П.</i>	65
Желатиновая подложка для сбора ДНК <i>Гермаиш Н. Н., Зайцева М.В., Петров Д.Г., Антифеев И.Е., Макарова Е.Д.</i>	66
Взаимодействие комплексов SMC бактерий с ДНК в одномолекулярных экспериментах <i>Запругаева Е. Ю., Морозова Н.Е., Румянцева Н.А., Кудрявцева М.А., Сапожникова А.П., Хасанова А.А., Ведяйкин А.Д.</i>	68
Влияние редкоземельных примесей на структурные свойства материалов на основе фосфата кальция методом ЭПР-спектроскопии <i>Садовникова М. А., Шуртакова Д.В., Мамин Г.В., Мурзаханов Ф.Ф., Гольдберг М.А., Комлев В.С., Гафуров М.Р.</i>	69
Флуоресцентная микроскопия для визуализации взаимной локализации белков RecA и RecN внутри клеток E.coli <i>Нестеренко В. А., Рошкетасва В.Д., Морозова Н.Е.</i>	71
Аналитическое решение начально-краевых задач на конечном интервале в рамках гиперболического уравнения теплопроводности <i>Руколайне С. А.</i>	73
О решении гомотопии задач Эйлера продольного изгиба в области нелинейных деформаций для однородной колонны с полужёстко закреплёнными концами <i>Чистяков В. В.</i>	75
NELM – открытое программное обеспечения для анализа импедансных спектров. Применение для исследования полупроводников и биоэлектродов <i>Бойцова Н. А., Абелит А. А., Ступин Д. Д.</i>	77
Моделирование влияния радиационного теплообмена на фронт кристаллизации β -Ga ₂ O ₃ в процессе роста из расплава по методу Чохральского <i>Шапенков С. В., Годяев М.В., Крымов В.М., Галактионов Е.В.</i>	79
Анализ чувствительности характеристик фильтров на круглых волноводах к погрешности производства <i>Губский Д. С., Земляков В.В., Крутиев С.В., Лонкина Д.В.</i>	80
Теоретическое описание кубической решётки из бианизотропных резонаторов, поддерживающей топологические состояния <i>Розенблит А. Д., Олехно Н. А.</i>	82
Calculation of the fusibility diagrams of quasi-simple ternary systems model (QSTSM). Algorithm and thermodynamic justification. <i>V. V. Kuznetsov, Bagdat N.Azamatov, Nikolay A.Charykov, Natalya A. Kulenova, Marzhan A. Sadenova , Dmitry S. Dogatkin, V.V.Keskinov, M.V.Keskinova</i>	84
Влияние коэффициентов поверхностного натяжения на форму вертикальных трехмерных жидких мостов между лиофильными и лиофобными твердыми плоскостями <i>Галактионов Е. В., Галактионова Н.Е.</i>	86

Индукцированные запаздыванием квазипериодические колебания в большой цепочке двунаправлено связанных лазеров Григорьева Е. В., Кащенко С.А.	87
Обоснование режимов детектирования флуоресценции и обеспечения температур образцов при формировании графиков плавления ДНК Белов Д.А., Буляница А.Л.	88
Физическое моделирование развития усталостного разрушения на различных масштабно-структурных уровнях при программном нагружении конструкционных материалов Завойчинская Э. Б., Лавриков Г.Е.	90
Моделирование электронных пучков высоких энергий Мамаева С. Н., Павлов А.Н., Максимов Г.В.	92
Флуктуации, ренормировка и диаграммная техника в теории критического скейлинга Варнашев К. Б.	94
Термоупругие напряжения, действующие в системах скольжения при выращивании из расплава методом Степанова (EFG) ленточных кристаллов оксида галлия Крымов В. М., Галактионов Е.В., Бахолдин С.И., Шапенков С.В.	95
Исследование газовой динамики в плазмотроне для спектрального анализа с использованием численного моделирования Мельников А. С., Никифоров С. А., Нагулин К. Ю., Гильмутдинов А. Х.	96
Численное моделирование ударно-волновых структур в сверхзвуковых потоках неравновесного колебательно-возбужденного газа Храпов С. С., Хоперсков А. В., Храпов Н.С.	98
Анализ нанопористых структур с помощью АСМ на примере пленки TiO ₂ Безверхний В. П., Муратова Е.Н., Гагарина А.Ю., Мошников В.А., Максимов А.И., Врублевский И.А., Лушпа Н.В.	101
Статистические закономерности ранних стадий процесса самозалечивания интерфейсов несовместимых высокомолекулярных твёрдых тел Бойко Ю. М.	103
Концентрационные зависимости параметров линии ферромагнитного резонанса двух серий композитных плёнок CoFeB/SiO ₂ с разной структурой для различных углов между направлением магнитного поля и плоскостью плёнок Блинов З. Н., Котов Л.Н., Устюгов В.А. Заварин Д.В. , Ковалёв П.Д. , Калинин Ю.Е., Ситников А.В.	105
Tunable negative differential resistance in SnO ₂ : Co memristors on p-Si Murodov J. ., Yuldashev.Sh.U	107
Роль асимметрии угловых зависимостей критического тока в оптимизации потерь на перемагничивание композитных ВТСП лент Гурьев В. В., Чумаков Н.К., Крылов В.Е., Шавкин С.В.	109
Использование освещения для идентификации газовых сред полупроводниковыми датчиками на основе оксида цинка Клычков Н. А., Симаков В.В. Синёв И.В.	110

Электрофизические свойства гибридных графен-нанотрубных квази-2D структур <i>Слепченко М. М., Барков П. В., Глухова О. Е.</i>	112
Получение и свойства электродов на основе тонких пленок композитных материалов вида $\text{BiFO}_3/\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ для фотоэлектрохимического разложения воды <i>Никольская А.Б., Козлов С.С., Алексеева О.В., Карягина О.К., Петрова В.И., Ларина Л.Л., Шевалеевский О.И.</i>	114
Хеометрический анализ функционирования тонких плёнок PdO в качестве химического сенсора на молекулы озона в атмосфере <i>Чистяков В. В., Рябцев С.В., Аль-Хабиб А.А.К., Соловьев С.М., Домашевская Е.П.</i>	115
Модификация поверхности CdS при нанесении и отжиге структурированного металлом органического покрытия <i>Харитонов П. Г., Стецюра С.В., Козловский А.В.</i>	118
Сканирующая ионная микроскопия как метод измерения количества слоев эпитаксиального мультиграфена <i>Ю.В. Петров, Т.С. Аргунова, С.П. Лебедев, А.В. Анкудинов, С.Ю. Приображенский</i>	120
Электрические свойства объемных наноструктурированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15} < \text{Te} >$ <i>Tagiyev M. M., Х.Ф. Алиева, Г.Д. Абдинова, И.А.Абдуллаева, Т.И. Пириева, С.Г Джафарова</i>	121
Экспериментально-аналитическое исследование проблемы компенсации механических напряжений в системе InGaAs множественных квантовых ям для излучателей ближнего ИК диапазона <i>Салий Р. А., Малевская А.В., Малевский Д.А., Минтаиров С.А., Надточий А.М., Калюжный Н.А.</i>	123
СВЧ экранирующие свойства природных углеродсодержащих композитов <i>Королев Р. И., Антонец И. В., Голубев Е. А.</i>	125
Локализованный поверхностный плазмонный резонанс квазиупорядоченной системы наночастиц Bi в матрице GaAs <i>Поленок Е.Д., Берт Н.А., Иванов А.А., Преображенский В.В., Путятю М.А., Семягин Б.Р., Снигирев Л.А., Ушанов В.И., Яговкина М.А., Чалдышев В.В.</i>	127
Magnetic nanomaterials for modern technologies of imaging and treatment of human organs <i>Камзин А. S.</i>	129
Электронные и транспортные свойства гетероструктуры графен/ MoS_2 <i>Шарин Е. П., Балахнин А.В.</i>	131
Исследование мемристорных структур с односторонней проводимостью на основе Cu_2O <i>Дзюба Д. А., Саенко А. В., Вакулов З. Е., Смирнов В. А.</i>	132
Синтез шестигранных наноалмазов в германий-аргоновой электродуговой плазме <i>Тимеркаев Б. А., Соавтор А.А. Хуснутдинова,, Соавтор Б.Р.Шакиров, Соавтор Н.Г.Андреева</i>	134

Нетканые материалы (полотна) сополи(уретан-имидов), аппретированные электропроводящим полипирролом <i>Диденко А. Л., Шишов М.А., Сапурина И.Ю., Бурсиан А.Э., Саприкина Н.Н., Иванова А.С., Крафт В.Е., Ваганов Г.В., Камалов А.М., Юдин В.Е., Светличный В.М., Кудрявцев В.В.</i>	136
Поверхностные плазмон-поляритоны в упорядоченных массивах углеродных нанотрубок с диэлектрическим наполнением <i>Санников Д. Г., Зайцев В.А., Афанасьев С.А., Моисеев С.Г., Санников Д.Г., Сыса А.В., Шаман Ю.П.</i>	137
Проводимость, магнитопроводимость композитных плёнок CoFeB/SiO ₂ с разной структурой при температурах 80-400 К и магнитных полях 0-9 Тл <i>Уткин А.А., Котов Л.Н., Семяшкин И.В., Калинин Ю.Е., Ситников А.В.</i>	138
Влияние положения поверхности образца относительно фокальной плоскости оптической системы на эффективность выхода наночастиц ZnS при лазерной абляции <i>Харькова А. В., Кочуев Д.А., Хорьков К.С., Вознесенская А.А.</i>	140
Теоретическое исследование электронной структуры ультратонких 2D полиморфов HgTe <i>Гавриков А. А., Кузнецов В.Г., Колобов А.В.</i>	141
Структурные свойства твердого раствора GaInAsSbBi на разориентированной подложке GaSb <i>Пащенко А. С., Блохин Э.Е., Никулин Д.А.</i>	143
Фотокаталитические материалы на основе диоксида титана <i>Дорогов М. В., Чиркунова Н.В.</i>	146
Исследование структурных особенностей природного разупорядоченного углерода методом текстурного анализа изображений ВРЭМ <i>Устюгов В. А., Антоненц И. В., Голубев Е. А.</i>	147
Оптические и фотоэлектрические свойства многослойных структур GaN/InP, сформированных методом плазмохимического атомно-слоевого осаждения <i>Ярчук Э. Я., Уваров А.В., Максимова А.А., Гудовских А.С.</i>	150
Создание пленок нитрида кремния с высоким содержанием кремния. <i>Гердт А. Д., Литвинов М.А.</i>	151
Динамика лазерных пучков в массиве углеродных нанотрубок под действием механической нагрузки <i>Трофимов Р. Р., Конобеева Н.Н.</i>	153
Особенности диэлектрических спектров пленок йодида серебра, легированных медью <i>Тимофеева И. О., А.В. Ильинский, Р.А. Кастро, А.В. Климов, А.А. Кононов, С.В. Сенкевич, Е.Б. Шадрин</i>	154
Экспериментально-теоретическое исследование формирования наночастиц с помощью лазерной абляции в водной среде для биомедицинских приложений <i>Лукашенко С.Ю., Фроня А.А., Григорьева М.С., Маврешко Е.И., Иванов Д.С.</i>	156
Тонкая структура диэлектрических спектров пленок VO ₂ <i>Шадрин Е. Б., А.В. Ильинский, А.А. Кононов</i>	158

Молекулы 2-метилбензимидазолперхлората $C_8H_8N_2 \cdot HClO_4$ в нанопорах боратных стекол: рентгеновские и диэлектрические исследования <i>Левин А. А., Фокин А.В., Балашова Е.В., Кричевцов Б.Б.</i>	159
Анизотропия оптических свойств опалоподобных фотонных кристаллов, синтезированных из композитных полимерных частиц типа ядро/оболочка <i>Селькин А. В., Нещерет В.И., Шевченко Н.Н., Якобсон О.Д.</i>	160
Исследование влияния температуры на параметры решетки и фазовую сегрегацию твердого раствора $Ca_{1-x}Ba_xF_2$ на Si(001) с эпитаксиальным подслоем CaF_2 <i>Алексеев Е. А., Кавеев А.К.</i>	162
Моделирование гетероструктуры графен-фосфорен-графен методом классической молекулярной динамики с использованием потенциала межатомного взаимодействия, полученного методами глубокого обучения <i>Завьялов Д.В., Конченков В. И., Полянский Е. О., Шеин Д.В.</i>	164
Магнеторезистивные характеристики гетероструктуры $SrIrO_3/La_{2/3}Sr_{1/3}MnO_3$ <i>Константинян К. И., Ульев Г.Д., Москаль И.Е., Овсянников Г.А.</i>	166
Исследование влияния условий спекания на прочность прекурсоров, получаемых из реакторных порошков СВМПЭ, синтезированных на разных катализаторах <i>Шидловский Т. Д., М.М. Цыганков, Л.П. Мясникова, Ю.М. Бойко, А.К.Борисов, А.О. Поздняков, Е.М. Иванькова</i>	167
Влияние механизмов неоднородной деформации кристаллической решетки на полярные свойства сферолитовых тонких пленок цирконата-титаната свинца <i>Валеева А. Р., Старицын М.В., Пронин В.П., Немов С.А., Каптелов Е.Ю., Сенкевич С.В., Пронин И.П.</i>	168
Самокаталитический рост GaInP наноструктур на подложках кремния из паровой фазы: выбор состава источника и каталитических капель. <i>Карлина Л. Б., А.С. Власов, Р.В.Левин, И.П. Сошников</i>	170
Пленки на основе наноструктур полутораокиси ванадия для лент высокотемпературных сверхпроводников <i>Березина О. Я., Игнахин В.С., Секирин И.В., Козорез Д.Р., Яковлев Д.А.</i>	172
Оценка ориентировки структуры разупорядоченного sp^2 углерода с помощью просвечивающей микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света <i>Голубев Е. А., Антонец И.В., Устюгов В.А.</i>	173
Экспериментальное исследование самоорганизации коллоидных наночастиц в электрическом поле <i>Гордеева А. Б., Анкудинов А. В.</i>	175
Функционализация углеродных нанотрубок в азотной плазме для электрохимических применений <i>Князев Е. В., Несов С.Н., Болотов В.В., Поворознюк С.Н., Ивлев К.Е., Матюшенко С.А., Закранцов А.Р.</i>	177

Исследование тонких перовскитных слоёв FAPbI_3 методами сканирующей зондовой микроскопии.	
<i>Дунаевский М. С., Алексеев П.А., Фурасова А.Д., Саранин Д.С., Теруков Е.И.</i>	178
Исследование механических свойств интерфейса нитевидный нанокристалл InAs - ростовая подложка методом атомно-силовой микроскопии	
<i>Шаров В.А., Малыш М.А., Федоров В.В., Мухин И.С.</i>	179
Исследование чувствительности сенсоров на основе пленок La-SnO_2 к парам этанола	
<i>Петров В. В., Толстяк Г.В., Баян Е.М., Давиденко В.А.</i>	180
Влияние морфологии на фотокаталитические свойства оксида цинка	
<i>Гриценко Л. В., Калкозова Ж.К., Абдуллин Х.А.</i>	182
Управление направлением роста планарных нитевидных нанокристаллов	
<i>Сибирев Н. В., Штром И. В.</i>	184
Импедансная спектроскопия углеродных наноматериалов при высоких давлениях	
<i>Соколовский Д. Н., Волкова Я.Ю., Бабушкин А.Н.</i>	186
Mapping the chemistry of boron-nitride molecules	
<i>Федяева М. А. , Лепешкин С.В. , Оганов А.Р.</i>	187
Синтез колончатых микрокристаллов GaN комбинированным PA-MBE/HVPE методом	
<i>Корякин А.А., Гридчин В.О., Шарофидинов Ш.Ш., Дворецкая Л.Н., Штром И.В., Цырлин Г.Э.</i>	188
Formation of a low-defect local area on the surface of silicon carbide by plasma etching	
<i>Климин В. С.</i>	190
Управление упругими напряжениями при росте гетероструктур $(\text{Al})\text{GaN/SiC}$	
<i>Заварин Е. Е., Родин С.Н., Ключев Б.Ю., Лундин В.В., Николаев А.Е., Артеев Д. С., Сахаров А. В., Цацульников А.Ф.</i>	191
Влияние состава композита $(\text{CoFeB}+\text{SiO}_2)$ на температурные и частотные зависимости импеданса и тангенса угла потерь двухслойной планарной структуры: полимер – композит	
<i>М.В. Якимов, Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, А.В. Ситников Ю.Е. Калинин</i>	192
Разработка инструмента анализа экспериментальных вольт-амперных характеристик полупроводниковых полевых катодов в режиме реального времени	
<i>Нечаев М. С. , Соков С.А. , Колосько А.Г., Филиппов С.В., Попов Е.О.</i>	194
Исследование характеристик графенового чипа в трехэлектродной схеме для биосенсорных применений	
<i>Смирнов А. Н., Воробьев С.В., Усиков А.С., Шмидт Н.М., Плеханов А.Ю., Терновых И.К., Роевков А.Д., Пузык М.В., Шабунина Е.И., Гущина Е.В., Амельчук Д.Г., Приображенский С.Ю., Лебедев С.П., Лебедев А.А.</i>	196
Синтез и свойства ветвистых нитевидных нанокристаллов AlGaAs на кремнии.	
<i>Андреева А. С., Резник Р. Р. , К. П. Котляр , А. И. Хребтов , И. П. Сошников , А. В. Сую , А. Кузнецов , А. Д. Большаков , Г. Э. Цырлин , В. Г. Дубровский .</i>	197

Исследование стабильности транспортных свойств чипов графен/SiC <i>Приображенский С.Ю., Полоскин Д.С., Оганесян Г.А., Гущина Е.В., Роенков А.Д., Лебедев С.П., Лебедев А.А., Смирнов А.Н., Елисеев И.А., Шабунина Е.И., Воробьев А.А., Шмидт Н.М., Усиков А.С.</i>	199
N-образные вольт-амперные характеристики массива разупорядоченных углеродных нанотрубок <i>Моисеев С. Г., Афанасьев С.А., Зайцев В.А., Санников Д.Г., Сауров М.А., Сыса А.В., Шаман Ю.П.</i>	200
Влияние высокоэнергетических ионов гелия на свойства n-GaN/GaN/c-Al ₂ O ₃ контактных слоев, выращенных с помощью МПЭ ПА <i>Гайворонская А. А., Середин П.В., Голощапов Д.Л., Костомаха Д.Е., Пешков Я.А., Буйлов Н.С., Мизеров А.М., Тимошнев С.Н., Соболев М.С., Нащекин А.В.</i>	202
Получение и исследование люминофоров состава Al ₂ O ₃ :Ln _x Ln _{2-x} O ₃ для визуализаторов лазерного ИК-излучения <i>Денисюк С. В., Куданович О.Н., Мухуров Н.И., Ходин А.А., Лугин В.Г., Камлюк Т.В.</i>	203
Локальное селективное травление кремния фокусированным ионным пучком в сочетании с методами жидкостного травления <i>Коломийцев А. С., Родригес Салазар Д.Х., Милованов А.В., Тарончик А.А., Пяк М.А., Якимов В.А.</i>	204
Проводимость и магнитосопротивление многослойных плёнок [(CoFeB+SiO ₂)+ZnO] ₅₀ на ситалловой подложке в интервале температур 20–400 К и в магнитных полях 0–9 Тл <i>Котов Л. Н., Уткин А. А. , Заговорич А. Д , Ситников А. В. , Калинин Ю. Е.</i>	206
Минимальный «якорь» в графеновом биосенсоре <i>Смирнов А. Н., Плеханов А.Ю., Пузык М.В., Воробьев С.В., Усиков А.С., Роенков А.Д., Лебедев С.П., Лебедев А.А., Шмидт Н.М.</i>	208
Спектральные исследования мультиэлементных высокоэнтропийных танталатов/ниобатов висмута со структурой пироклора, допированных атомами 3d-металлов <i>Некителов С. В., Жук Н.А., Сивков В.Н.</i>	209
Анализ чернил рукописи XV века методом спектроскопии комбинационного рассеяния <i>Деркачева О. Ю., Неелова А.Д., Лоцманова Е.М., Быстрова Е.С.</i>	210
Фотолюминесценция квантовых точек PbS в матрице неорганического стекла при возбуждении светодиодами: спектры и квантовый выход <i>Иванов А. Е., А.В. Аладов, АЛ. Закгейм, А.А. Онущенко, А.Е. Черняков, М.З. Шварц</i>	211
Лазерная абляция при создании тонких пленок гидроксиапатита <i>Дудник Ю. Д., Васильев М.И., Сафронов А.А., Ширяев В.Н., Васильева О.Б.</i>	213
Теоретический анализ дифракционного условия резонансной вудовской аномалии в оптических спектрах отражения и пропускания латеральных периодических структур <i>Воронов М. М.</i>	215

Энергетическая структура низших возбужденных состояний и дипольные моменты оптических переходов в бихромофорах в полярной среде <i>Антипов И. Ф., Феськов С.В., Иванов А.И.</i>	217
Поглощение и рассеяние ультракоротких лазерных импульсов в среде: описание с учетом эффектов распространения <i>Астапенко В. А.</i>	218
Исследование преобразования сингулярных пучков Лагерра-Гаусса при отражении от шероховатой поверхности <i>Шостка Н. В., Соколенко Б.В., Егоров Ю.А.</i>	220
Высокоскоростная адаптивная система коррекции атмосферных флуктуаций фазы <i>Галактионов И. , Топоровский В., Кудряшов А.</i>	222
Исследование влияния ориентационной вытяжки на структурные и электроактивные свойства пленок ВДФ методом спектроскопии комбинационного рассеяния <i>Деримедведь Д. К., Бурьянская Е.Л., Мальцев А.А., Коновалова И. Б. Мареев Е. И., Михалев П. А., Минаев Н. В.</i>	224
Пространственно-разрешенное исследование усиления в полупроводниковых оптических усилителях на основе квантовых ям-точек. <i>Харченко А. А., Надточий А. М., Корнышов Г. О., Паюсов А. С., Бекман А. А., Гордеев Н. Ю., Шерняков Ю. М., Симчук О.И., Ткач Ю.С., Максимов М. В.</i>	226
Пространственно-периодические гибридные структуры на основе пленок опала, покрытых слоем α -Si:C:H: синтез и излучающие свойства <i>Грудинкин С. А., Феоктистов Н. А., Голубев В. Г., Павлов С. И., Дьяков С. А., Певцов А. Б.</i>	228
Оптические свойства в ТГц области перспективных халькогенидных стекол, разработанных для ИК диапазона <i>Каплунов И. А., Кропотов Г.И., Рогалин В.Е., Сивов Н.В., Шахмин А.А.</i>	229
Гребёнки резонансов Фано в рассеянии света на диэлектрическом разомкнутом кольцевом резонаторе <i>Бочкарев М. Э., Солодовченко Н.С., Самусев К.Б., Лимонов М.Ф.</i>	231
Шестиволновое взаимодействие с удвоенным обращением волнового фронта в многомодовых волноводах с тепловой и резонансной нелинейностями <i>Шмойлова С. С., Ивахник В.В., Багров А.Р.</i>	232
Развитие методов спектроскопии высокого разрешения для медицинских исследований тканей патологий ЛОР-органов <i>Вакс В. Л., Айзенштадт А.А., Домрачева Е.Г., Черняева М.Б., Анфертьев В.А., Глушкова К.А., Черняева А.С.</i>	234
Модифицированный метод Джадда-Офельта для анализа интенсивностей оптических переходов ионов редкоземельных элементов <i>Дукин А. А.</i>	235
Асимметричное рассеяние света в гибридных метаповерхностях на основе α -Si:C:H волновода с массивом α -Si:H наноколонн <i>Марков Д. П., Павлов С.И., Певцов А.Б., Николаева А.В., Свинкин Н.А.</i>	237

X-ray-induced ultraviolet persistent luminescence in $\text{YPO}_4\text{:Bi}$ <i>Kuznetsova Yu. A., Ogorodnikov I. N., Raikov D. V., Kiselev S. A., Voynov V. S.</i>	238
Влияние фазовых трансформаций на частоты молекулярных колебаний в пленках 2-метилбензимидазолперхлората $\text{C}_8\text{H}_8\text{N}_2\text{-HClO}_4$ <i>Кричевцов Б. Б., Павлов С.И., Редьков А.В., Балашова Е.В.</i>	240
Спектры и кинетика люминесценции $\text{LiNbO}_3\text{:Er/Mg}$ в интервале температур 80 – 430К <i>Скворцов А. П., Певцов А.Б., Старухин А.Н., Резницкий А.Н.</i>	241
Взаимодействие резонансов Ми и квазиволноводных резонансов в светоизлучающих диэлектрических метаповерхностях на основе материалов родственных аморфному кремнию <i>Павлов С. И., Марков Д. П., Певцов А. Б., Николаева А.В., Свинкин Н.А.</i>	242
Взаимная ориентационная динамика стабилизированных радикалов, CH_3 , и матричных молекул, CH_4 , в твёрдом метане в температурном диапазоне 1.4 - 35 К <i>Дмитриев Ю. А.</i>	244
Оптические и морфологические свойства композитной структуры a-SiC:H/Ag/c-Si <i>Пригода К.В., Большаков В.О., Ермина А.А., Марков Д.П., Грудинкин С.А., Жарова Ю.А.</i>	246
Увеличение эффективности сбора излучения центров окраски кремний-вакансия из алмазных микроскопических полусфер с помощью стеклянной микросферы <i>Медведев А. В., Грудинкин С.А., Феоктистов Н.А.</i>	248
Влияние дефектов на люминесцентные свойства YAG <i>Гусев Г.А., Дымченко В.С., Сырников П.А. , Заморянская М.В</i>	249
Сочетание методов люминесцентной и время-разрешенной спектроскопии для измерения температуры с помощью наносенсора на основе комплексов $\text{NaYF}_4\text{:Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ <i>Буриков С. А., Федянина А.А., Доленко Т.А.</i>	250
Оптически индуцированная анизотропия полимерных пленок поли(9,9-диоктилфлуорена-альта-бензотиадиазола) <i>Зедоми Т.Э., Котова Л.В., Кочерешко В.П.</i>	252
Выделение гомогенных флуорофоров, получаемых на разных этапах гидротермального синтеза углеродных точек <i>Лептинский К. А., Вервальд А.М., Корепанова А.А., Доленко Т.А.</i>	253
Управляемое подавление дефектной моды фотонного кристалла с графеновыми частицами <i>Глухов И. А., Моисеев С. Г.</i>	254
Выращивание кристаллов K_2O x pGa_2O_3 из раствора в расплаве KF и исследование их оптических свойств <i>Носов Ю. Г., Шапенков С.В., Вывенко О.Ф., Варыгин Г.В., Щеглов М.П., Кицай А.А., Чикиряка А.В., Николаев В.И.</i>	255

Магнитные свойства, XPS и NEXAFS спектры $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, допированного хромом <i>Симпелева Р. А.,</i> Некипелов С.В., Королева А.В., Федорова А.В., Макеев Б.А., Жук Н.А.....	257
Фокусировка электрического поля плоской волны в отверстии диэлектрического кольца <i>Болкунов М. А.,</i> М.Ф. Лимонов , К.А. Бронников.....	258
Оптические свойства и кристаллическая структура $\text{Bi}_2\text{Mg}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Ta}_2\text{O}_9+\Delta$ со структурой пирохлора <i>Кетова Д. А.,</i> Кржижановская М.Г., Селютин А.А., Жук Н.А.	260
Трансформация спектров поглощения и люминесценции углеродных наноточек под влиянием УФ облучения <i>Нельсон Д. К.,</i> Старухин А.Н., Еуров Д.А., Курдюков Д.А.....	261
XPS, NEXAFS исследования танталата висмута со структурой пирохлора, допированного Cu/Co <i>Паришуква К. Н.,</i> Некипелов С.В., Королева А.В. , Лебедев А.М. , Макеев Б.А. , Королев Р.И. , Жук Н.А.	262
Формирование отражающей поверхности крупногабаритных зеркал ИТЭР из нержавеющей стали марки 316L(N)-IG <i>Тереценко И. Б.,</i> Самсонов Д. С., Марчий Г.В., Голубев М.С., Кузнецов Ф.К., Мухин Е.Е.....	263
Проявление оптического охлаждения ядер в эффективном поле электронов в эффекте Ханле в твердом растворе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ <i>Давыдов М. Н.,</i> Джиоев Р.И., Намозов Б.Р., Козырев Н.В., Кусраев Ю.Г.	264
Численное моделирование зависимости эффективного показателя преломления SiN волновода от концентрации водорода в атмосфере <i>Кузнецов И. В.,</i> Перин А.С.....	267
Спектральные и пространственные характеристики излучения вертикально-многомодовых торцевых лазерных диодов с экстремально широким волноводом <i>Бекман А. А.,</i> И.А. Мельниченко, Г.О. Корнышов, Ю.М. Шерняков, Н.Ю. Гордеев, А.С. Паюсов, О.И. Симчук, Ткач Ю.С., М.В. Максимов	269
Фотоэлектрический преобразователь лазерного излучения $\lambda = 1064$ нм на основе GaInAsP/InP <i>Гаврилов К. А.,</i> Минтаиров С.А., Надточий А.М., Нахимович М.В., Салий Р.А., Калужный Н.А., Шварц М.З.	270
Оптический сенсор углекислого газа на основе гетеродиодов из твердых растворов InAsSb(P). <i>Кунков Р. Э.,</i> Карандашев С. А., Климов А. А., Лухмырина Т. С., Ременный М. А. .	272
Фотодетекторы на основе CVD-MoS ₂ атомарной толщины <i>Елисеев И. А.,</i> Kurtash V. A., Pezoldt J., Давыдов В. Ю.	274
Спектральные характеристики оптического излучения микроплазм полупроводниковых приборов <i>Казанков А.А.,</i> Фролов И.В., Сергеев В.А., Радаев О.А.....	276

Энергоэффективность вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1.3 мкм, реализованных в рамках технологии спекания пластин	
Ковач Я. Н., Блохин С.А., Бобров М.А., Блохин А.А., Воропаев К.О., Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Копытов П.Е., Андриюшкин В.В., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Егоров А.Ю., Сапунов Г.А., Дербезов И.А., Tian S.C., Bimberg D.	278
Свойства датчиков МНПВО на основе двойных гетероструктур p-InAsSbP/n-InAs, облученных гамма-квантами	
Лухмырина Т. С., С. А. Карандашев, А. А. Климов, Р. Э. Кунков, В.Н. Ломасов, Б. А. Матвеев, М. А. Ременный, Е. И. Шабунина, Н. М. Шмидт.....	279
Кластеризация фазовых соотношений в оптической частотной гребенке	
Журавлев Г. С., Ковалев А.В., Викторов Е.А.	281
Исследование оптических свойств интегральных X-разветвителей на основе нитевидных нанокристаллов GaP	
Аникина М. А. , Кузнецов А., Шаров В. А., Абрамов А. Н., Кондратьев В. М., Большаков А.Д.	282
Снижение внешней квантовой эффективности УФ-светодиодов, вызванное перелегированием барьеров кремнием	
Шабунина Е. И., Шмидт Н.М., Черняков А.Е., Тальнишних Н.А., Закгейм А.Л., Иванов А.Е., Полякова А.Я., Алексанян Л.А.	285
Разработка активных компонент для GaAs фотонных интегральных схем на основе микродисковых лазеров с InGaAs/GaAs квантовыми точками	
Федосов И. С., Н.А. Фоминых , Н.В. Крыжановская, И.С. Махов, Ю.А. Гусева , М.М. Кулагина , С.А. Минтаиров , Н.А. Калюжный , Р.А. Хабибуллин , Р.Р. Галиев , А.Ю. Павлов , К.Н. Томош , М.С. Солодовник , Н.Е. Черненко , Н.А. Шандыба , А.Е. Жуков.....	286
Фотоэлектрические преобразователи на основе гетероструктур $Al_{0,1}Ga_{0,2}In_{0,7}Sb_{0,2}P_{0,8}/InP$	
Лунин Л. С., Лунина М. Л., Донская А. В.	287
Гибридные каскадные солнечные элементы на основе бондинга материалов A^3B^5 и кремния	
Минтаиров С. А., Емельянов В.М., Калюжный Н.А., Нахимович М.В., Салий Р.А., Шварц М.З.	289
Анализ расположения управляющих элементов в биморфном деформируемом зеркале с радиально-кольцевой геометрией электродов	
Топоровский В. В., Галактионов И.В., Кудряшов А.В.	291
Исследование фотоэлектрических и электрофизических свойств гетероструктур i-aSi:H/SiO ₂ /p-Si	
Котина И. М., Базлов Н.В., Бондаренко А.С., Дербин А.В., Драчнев И.С., Коньков О.И., Муратова В.Н., Трушин М.В., Унжаков Е.В.....	292
Конструкция чипа полупроводникового лазера с резонатором, сформированным двумерным фотонным кристаллом	
Золотарев В. В., Некрасов А.С., Орешко И.В., Казакова А.Е., Слипченко С.О., Пихтин Н.А.....	294

Исследование предельных энергетических возможностей мощных УФ (370 нм) матричных излучателей: токовый и температурный факторы Черняков А.Е., Закгейм А.Л., Иванов А.Е., Тальнишних Н.А, Шабунина Е.И.	296
Технология изготовления планарных фотонных интегральных схем на основе нитрида кремния Абанин А. И., Р.М. Рязанов, А.Д. Голиков	298
Импульсные характеристики однопереходных и 3-х переходных фотопреобразователей лазерного излучения Калиновский В. С., Толкачев И.А., Контрош Е.В., Прудченко К.К. , Юферев В.С. , Иванов С.В.	299
Высокотемпературные фотодиоды на основе ДГС N-InAsSbP/InAs/P-InAsSbP Климов А. А., Кунков Р.Э., Лухмырина Т.С., Матвеев Б.А., Ременный М.А.	301
Встроенное пьезоэлектрическое поле и Оже-рекомбинация через глубокие центры: влияние на эффективность лазеров и светодиодов на InGaN/GaN Самосват Д. М., Карпова А.А., Зегря Г.Г.	302
Моделирование оптического спектрального фильтра на основе мультиплексированных трёхслойных КПЖК дифракционных структур Чубаров Д. М., Алтухов Ю. А., Растрыгин Д. С., Долгирев В. О., Шарангович С. Н.	303
Портативный оптоэлектронный датчик вибрации на основе автодинного эффекта в лазерных диодах Рыбалтовский А. В., Мамаев И.С., Ковалев А.В.	305
Исследование спектральных и пространственных характеристик излучения длинноволновых вертикально-излучающих лазеров для систем визуализации, обнаружения и определения дальности Копытов П. Е., Ковач Я. Н., Блохин С. А., Бобров М. А., Блохин А. А., Воропаев К. О., Бабичев А. В., Гладышев А. Г., Андришкин В. В., Новиков И. И., Карачинский Л. Я., Егоров А. Ю.	306
Гетерогенная интеграция кремниевой фотонной интегральной схемы с активными элементами Сауров М. А., М.А. Ладугин, Н.В. Гулытиков, В.В. Светухин	308
МОС-гидридная эпитаксия для современных задач фотоники Ладугин М. А., Мармалюк А. А.	310
Селективное определение компонентов газовых смесей $C_3H_8-H_2$ и H_2-CH_4 при исследовании электропроводности полупроводникового сенсора на основе SnO_2 в режиме термомодуляции Казаков С. А., Дугин А.А., Гагиев Т.С., Гревцев М.А., Соколов А.В., Арефьева О.А., Шишкин А.Ю., Хворов В.Н.	311
Ионно-плазменная дезактивация внутриконтурного оборудования реакторных установок Петровская А. С., Цыганов А.Б.	312

Исследование влияния размеров искусственных дефектов на механические свойства полимерных покрытий <i>Осипов С. В.,</i> Никоноров А.А., Рузаев Д.С., Максимова О.Г.	313
Адсорбция калия на поверхности $Al_{0.5}Ga_{0.5}N(0001)$ <i>Лапушкин М. Н.</i>	314
Получение пористой поверхности на германии путем воздействия наносекундными лазерными импульсами <i>Рогалин В. Е.,</i> Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А., Сергеев А.А., Ивакин С.В., Каплунов И.А., Иванова А.И., Андреева М.С., Кропотов Г.И.	316
Компьютерное моделирование эффектов облучения ионами аргона в Bi_2Se_3 <i>Байдак С. Т.,</i> Лукоянов А. В.	317
Изменение морфологии поверхности органических пленок под действием лазерного излучения <i>Туриев А. М.,</i> Березов А.В., Дзагоев А.Т.	318
Газочувствительные свойства композитов состава $Fe_2O_3/Co_xO_y/NiO$: влияние морфологии и режимов термической обработки <i>Соколов Д. В.,</i> Стенькин Ю.А., Болотов В.В., Ивлев К.Е.	320
Моделирование профиля светового пятна на экране полевого проектора одиночного эмиттера из полупроводника <i>Мутыгуллин Б. Э.,</i> Мицкевич А.А., Колосько А. Г., Филиппов С.В., Попов Е.О.	322
Термоциклирование поверхности меди в доабляционном режиме при нагреве уф лазерными наносекундными импульсами <i>Малинский Т. В.,</i> Рогалин В.Е., Жаховский В.В., Иногамов Н.А., Колобов Ю.Р., Манохин С.С., Неласов И.В., Перов Е.А., Петров Ю.В., Хомич Ю.В.р А.А., Соавтор Б.Б.	324
Использование энергетических параметров при исследовании структурных особенностей грунтобетона на основе органоминерального реактивного связующего <i>Соколова Ю. В.,</i> Фролова М. А., Айзенштадт А. М.	325
Моделирование спектров СВ, распространяющихся на суб-терагерцовых частотах в плёнках ЖИГ. <i>Хрошин Д. А.,</i> Устинов А.Б.	328
О влиянии межпиксельного расстояния пространственного модулятора терагерцового излучения на качество фантомных изображений <i>Благова Т. В.,</i> Хасанов И.Ш.	330
Теплоэлектрические процессы в мощных нитрид-галлиевых транзисторах с каскодной структурой <i>Гавриков А. А.,</i> Смирнов В.И., Сергеев В.А.	331
Диод с барьером Шоттки 1-кВ класса на основе оксида галлия <i>Яковлев Н. Н.,</i> Алмаев А.В.	333
Дипольная и квазинейтральная неустойчивые моды в биполярном эффекте ганна <i>Слободнюк А. С.,</i> М.С. Иванов, П.Б. Родин	335

Многоэлектродные эмиттеры на основе одностенных углеродных нанотрубок <i>Зайцев В. А., Афанасьев С. А., Моисеев С. Г., Рожлейс И.А., Санников Д. Г.</i>	337
Квазиэллиптический волноводный полосно-пропускающий фильтр <i>Крутиев С. В., Губский Д.С., Букин С.П.</i>	338
Численное моделирование коэффициента передачи активного кольцевого резонатора с ультратонким магнетонным кристаллом <i>Ведерников Л. С., Хрошин Д.А., Фомина Е.А., Устинов А.Б.</i>	340
Применение композитных подложек 6H-SiC/3C-SiC(001) для синтеза кубического политапа карбида кремния методом сублимации <i>Мясоедов А. В., Мынбаева М.Г., Приображенский С.Ю., Амелчук Д.Г., Лебедев С.П., Лебедев А.А.</i>	342
Использование углерода для формирования дискретных зон на основе алюминия при их термомиграции <i>Середин Б. М., Попов В.П., Степченко А.Д., Малибашев А.В., Заиченко А.Н.</i>	343
Особенности фотопроводимости монокристаллов $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $0.50 \leq x \leq 0.95$ <i>Бабаева Р. Ф., Абдинов А.Ш., Амирова С.И., Рагимова Н.А., Расулов Э.А.</i>	345
Влияние температуры облучения на скорость удаления носителей в GaN. <i>Лебедев А. А., В.В.Козловский, Д.А. Малевский, К.С.Давыдовская, М.Е.Левинштейн, А.Е. Николаев</i>	347
Влияние локального ближнего порядка в неупорядоченных твердых растворах V-Ti на энергию образования вакансий <i>Мирзоев А. А., Верховых А.В.</i>	349
Дислокационная структура индентированных объемных кристаллов AlN <i>О.А. Гогина, Ю.В. Петров*, Е.В. Убийвовк*, О.Ф. Вывенко, Т.С. Аргунова, С.С. Нагалюк</i>	351
Комплексы собственных точечных дефектов в кремнии, сформированные в результате ионной имплантации ксенона высоких энергий и постимплантационных отжига <i>Маслова Н. А., Данилов Д. В., Вывенко О. Ф., Скуратов В. А., Володин В. А., Калядин А. Е., Соболев Н. А.</i>	352
Электрон-ядерное взаимодействие вакансий бора в гексагональном нитриде бора <i>Дмитриева Е. В., Мамин Г.В., Мурзаханов Ф.Ф.</i>	354
Магнито-оптическая спектроскопия возбужденного состояния центров окраски в SiC для применения в термометрии <i>Учаев М. В., К. В. Лихачев, А. М. Скоморохов, Р. А. Бабунц, П. Г. Баранов</i>	355
Оптические исследования структурных дефектов в объемном теллуриде германия <i>Давыдов В. Ю., Смирнов А.Н., Елисеев И.А., Константинов П.П., Шабалдин А.А., Бурков А.Т.</i>	356
Влияние спиновой поляризации оптически ориентированных электронов и ядер на электрическое сопротивление объемного n-GaAs <i>Рагоза М. Д., Козырев Н. В., Намозов Б. Р., Некрасов С. В., Кусраев Ю. Г.</i>	358

Эффект штарка на бесфононном переходе ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ в ионах Cr^{3+} в кристаллах титаната стронция <i>Скворцов А. П., Трепаков В.А.</i>	359
Электронно-лучевой синтез высокоэнтропийной керамики со структурой перовскита <i>Гынгазов С. А., Васильев И.П., Болтуева В.А.</i>	361
Глубокие уровни дислокаций в гетероэпитаксиальных слаболегированных слоях AlGaAsSb/GaAs <i>Солдатенков Ф. Ю., Соболев М.М.</i>	362
Изучение механических свойств интерметаллидов на основе Ti, армированных углеродными нанотрубками <i>Янковская У. И., Захаров П.В.</i>	363
Увеличение эффективности ввода оптической мощности в AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователях лазерного излучения <i>Романчук А. К., Малевская А.В., Калюжный Н.А., Нахимович М.В., Шварц М.З., Андреев В.М.</i>	365
Преобразование субнаносекундных лазерных импульсов в электрический ток многопереходными фотопреобразователями: роль туннельных диодов <i>Толкачев И. А., Юфереv В. С.</i>	367
Мощный импульсный повышающий преобразователь на нитрид-галлиевых транзисторах <i>Шериунова Е. А., Мошкунov С.И., Хомич В.Ю., Иголкин А.А.</i>	368
Повышение термоэлектрической эффективности полупроводника с помощью создания градиентно-варизонной структуры материала <i>Марков О. И.</i>	369
Метаморфные InGaAs/GaAs гетероструктуры для радиационно-стойких фотопреобразователей лазерного излучения <i>Шварц М. З., Емельянов В.М., Корниенко П.Д., Минтаиров С.А., Нахимович М.В., Салий Р.А., Калюжный Н.А.</i>	371
Влияние резистивных параметров фотоэлектрических преобразователей на карты электролюминесценции и вольт-амперные характеристики. <i>Малевская А. Д., Минтаиров М.А., Евстропов В.В., Малевский Д.А., Малевская А.В., Салий Р.А, Калюжный Н.А.</i>	373
Исследование времен жизни неравновесных носителей заряда электролюминесцентным методом в многопереходных солнечных элементах при облучении протонами и электронами высоких энергий <i>Левина С. А., Емельянов В.М., Корниенко П.Д., Нахимович М.В., Шварц М.З.</i>	374
Установка для испытания чипов полевых транзисторов на устойчивость лавинному пробую при работе на индуктивную нагрузку <i>Михайлов Е. М., Люблинский А.Г., Богданов А.А., Тубольцев Ю.В.</i>	376
Особенности тестирования характеристик микроразмерных фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения <i>Покровский П. В., Хвостиков В.П. , Малевская А.В. , Хвостиков О.А.</i>	377

Емкостные исследования солнечных элементов на основе наноструктурированного “черного” кремния с пассивирующим слоем GaP <i>Михайлов О. П., Е.А. Вячеславова А.А., Максимова, А.В. Уваров, А.И. Баранов, А.С. Гудовских</i>	379
Определение дисбаланса <i>фотогенерированных</i> токов в многопереходных фотопреобразователях лазерного излучения <i>Минтаиров М. А., В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, М. В. Нахимович, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный</i>	380
Исследование влияния метода центрифугирования и состава суспензии PEDOT:PSS на характеристики солнечных элементов b-Si/PEDOT:PSS <i>Поздеев В. А., Вячеславова Е. А., Михайлов О.П., Максимова А.А., Гудовских А.С.</i>	381
Исследование теплоотведения от второго контура ядерной энергетической установки в гранулированную среду <i>Беклемишева А. В., Александров П.А.</i>	383
Моделирование трёхкубитного кода повторений в цепочке сверхпроводниковых кубитов с соединительными элементами <i>Березкин Н. Г, Симаков И. А., Мажорин Г. С.</i>	384
Modern statistical approach to quantum systems with dissipation Zloshchastiev K.	386
Исследование температурной зависимости вклада экситонов и свободных носителей в люминесценцию гетероструктуры CdTe/CdMgTe <i>Философов Н. Г., В.Ф. Агемян, С.Ю. Вербин, А.Ю. Серов, И. В. Штрот, G.Karczewski</i>	387
Структура уровней и оптические переходы в сферических нанокристаллах ядро/оболочка <i>Кокурин И. А., В.Д. Макеев</i>	388
Гигантское линейное магнитосопротивление в структурах с множественными квантовыми ямами на основе CdHgTe <i>Васильев Ю. Б., Михайлов Н.Н.</i>	390
Особенности спиновой динамики ионов марганца в двойной полумагнитной квантовой яме <i>Кузьменко М. И., Афанасьев М.М., Грибакин Б.Ф., Кавокин К.В., Кусраев Ю.Г., Калевич В.К.</i>	391
Двуслойные структуры на основе графена и гексагонального нитрида бора: электронная структура и фононный спектр <i>Михайленко Е. К., Дунаевский С.М.</i>	393
Сравнение спиновых свойств структур с квантовыми ямами и квантовыми яма-точками (In,Ga)As/GaAs <i>Кузнецова Я. А., Некрасов С.В., Рагоза М.Д., Гварамия А.Г., Кусраев Ю.Г., Максимов М.В., Надточий А.М.</i>	394

Андреевские генераторы терагерцевого излучения <i>Таранец К. Б., Н.Т.Баграев, С.А. Кукушкин, Л.Е.Клячкин, А.М.Маляренко, А.В. Осипов, В.В. Романов, Н.И. Руль</i>	395
Исследование зарядовых состояний диэлектрических покрытий методами сканирующей зондовой микроскопии <i>Родин В. Д., В. Ю. Аксенов, А. В. Анкудинов, А. С. Власов, И. В. Илькив, А. В. Малевская, А. М. Минтаиров.....</i>	397
Оптическое детектирование квантового эффекта Холла в кремниевых наносандвич-структурах <i>Руль Н. И., Таранец К. Б., Баграев Н. Т., Клячкин Л. Е., Маляренко А. М., Романов В. В.</i>	398
Supersolid optically trapped polariton condensates <i>P. Kozhevnikov, A. Lyubomirov, R. Cherbunin, I. Chestnov, A. Kavokin, A. Nalitov.....</i>	400
О создании инверсной функции распределения электронов в тлеющем разряде с полым катодом <i>Кудрявцев А. А., С. Zhou, А.М. Астафьев, Е.А. Богданов, С. Yuan.....</i>	402
Применение магнитореологической жидкости на основе сферических частиц полученных методом жидкого анода для полировки ВТСП-подложек <i>Барышников Ю. С., Родионов И.А., Орлов Ф.А., Трофимук А.Д., Поняев С.А.....</i>	404
Система управления положением плазменного шнура на токамаке ФТ-2 <i>Богданов А. А., Тубольцев Ю.В., Чичагов Ю.В., Жубр Н.А., Кантор М.Ю., Лазутков В.П., Есипов Л.А., Шаталин С.В.</i>	406
Зависимость мощности излучения от длины сильноточной вакуумной дуги в области вакуумного ультрафиолета. <i>Забелло К. К., Ю.А. Баринов, А.А. Логачев, И.Н. Полуянова, С.М. Школьник.....</i>	407
Оптимизация параметров диодного плазменного стабилизатора напряжения <i>А.С. Мустафаев, А.Ю. Грабовский, Е.В. Штода, А.А. Фицак</i>	409
Кинетическая теория прикатодного слоя в низковольтных пучковых разрядах. <i>Бадр А.Х., А.С. Мустафаев, В.С. Сухомлинов, О.Д Бербенева.....</i>	410
Атомная кинетика в плазме при воздействии лазерных импульсов <i>Нагель Н. Н., Астапенко В.А., Лисица В.С., Кутузов Д.С.....</i>	411
Теоретическое и экспериментальное исследование обработки мелкодисперсного порошка оксида эрбия в высокочастотной плазменной струе для получения светоизлучающих микросфер <i>Сергеев В.А., Зверев С.Г., Грачев С.Ю., Медведев А.В., Иванов Д.В., Машигин А.А.</i>	413
Разработка компонентов оптического тракта диагностики томсоновского рассеяния, расположенных на диверторных кассетах токамака ИТЭР <i>Кунгурцев Н. А., Коваль А.Н., Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Раздобарин А.Г., Букреев И.М., Кириенко И.Д., Жадковский А.А., Модестов В.И., Богачев Д.Л.</i>	415

Разряд в смесях инертных газов с азотом, поддерживаемый мощным излучением лазера на свободных электронах <i>Сидоров А. В., Кубарев В.В., Веселов А.П., Водопьянов А.В., Шевченко О.А., Горбачев Я.И.</i>	417
Исследование неустойчивости плавающего потенциала зонда для разрядов с плоским и полым катодом <i>Астафьев А. М., С. Zhou, А.А. Кудрявцев, О.С. Алексеева, С. Yuan</i>	418
Применение метода жидкого анода для получения сферических частиц при плазменном распылении золота, серебра, меди <i>Барышников Ю. С., Орлов Ф. А, Трофимук А.Д., Чижилова А.С., Чикиряка А.В., Теневич М.И., Поняев С.А.</i>	420
Электронно-циклотронный резонансный разряд высокой плотности, поддерживаемый излучением гиротрона, для генерации интенсивных пучков многозарядных ионов <i>Скалыга В. А., Выбин С.С., Голубев С.В., Изотов И.В., Поляков А.В., Разин С.В., Смагин Д.М.</i>	422
Численный эксперимент применения плазменного плавления для производства чистого алюминия <i>А. С. Мустафаев, Н. А. Буковецкий, В. С. Сухомлинов, Р. С. Смердов, А. В. Суров</i>	423
Численное и экспериментальное исследование характеристик плазменного актуатора с логарифмическим распределением электродов <i>Жарков Я. Е., Воеводин В.В., Коржова О.И., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А.</i>	424
Структура и физические свойства высокотемпературной пьезокерамики $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3$, модифицированной самарием <i>Гук Е. Г., Е.П. Смирнова, В.Н. Климов, П.А. Панкратьев, Н.В. Зайцева, Е.Е. Мухин</i>	426
Твердотельные охлаждающие устройства на основе многослойного активного электрокалорического регенератора <i>Мишинёв М. А., Еськов А.В., Анохин А.С., Антонова А.С., Семенов А.А.</i>	428
Диэлектрические свойства пленок 2-метилбензимидазолперхлората $\text{C}_8\text{H}_8\text{N}_2\text{HClO}_4$ в кристаллической, жидкокристаллической и фазе ионной жидкости. <i>Балашова Е. В., Кричевцов Б.Б.</i>	429
Поиск неупругого рассеяния частиц темной материи на ядрах ^{83}Kr с возбуждением низколежащего ядерного уровня. <i>Derbin A. ., И.С.Драчнев, Ю.М.Гаврилюк, А.М.Гангапшев, В.В.Казалов, В.В.Кузьминов, В.Н.Муратова, Д.А. Семенов, Д.А.Текуева, М.В. Трушин, Е.В.Унжаков</i>	432
Масс спектрометр легких ядер <i>Ларионов В. Е., Васильев А. А., Рождественский А. Ю., Трофимов В. А.</i>	433
Физика влияния вихрегенератора на обтекание крыла с тянущим воздушным винтом <i>Багхдади М. К., Павленко О.В., Раздобарин А. М.</i>	436

Численное моделирование для определения рабочего диапазона скоростей газа и температуры стабилизации термоанемометрического датчика расхода газа <i>Кошелев В. А., Демин Г. Д., Дюжев Н.А.</i>	437
Приближенно-аналитическая модель ударно-волновой структуры течения с нерегулярным взаимодействием встречных скачков уплотнения и импульсным энерговыведением на главном скачке <i>Чернышов М. В., Лаптинская М.М.</i>	438
Параметрические исследования взлётно-посадочной механизации магистрального самолёта на маломасштабной полумодели <i>Пигусов Е. А., Волков А.И., Крутов А.А., Кузин С.А.</i>	440
Механизмы кавитационного дробления капель аэрозоля в ультразвуковом поле <i>Кудряшова О. Б., Шалунов А.В., Титов С.С., Титова Н.В.</i>	441
Численные исследования уменьшения влияния неблагоприятных метеорологических условий на аэродинамические характеристики профиля крыла <i>Белоусов И. Ю., Павленко О.В., С.Б. Кинса, Йе Хтун, Февральских А. В.</i>	442
Неустойчивость местных сверхзвуковых зон на профиле крыла с интерцептором <i>Кузьмин А. Г.</i>	443
Управление сверхзвуковым обтеканием затупленного тела в зоне крепления к пластине <i>Лапушкина Т. А., Белов К.И.</i>	444
Численное моделирование течения жидкости с переменной вязкостью в неизотермической каверне <i>Мухутдинова А. А., Киреев В.Н., Урманчеев С.Ф.</i>	445
Снижение уровня задымления при пожаре ультразвуковым воздействием <i>Шалунов А. В., Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Данилов П.Д., Синкин А.А.</i>	447
О применимости модели монодисперсной среды при численных исследованиях пузырьковых течений <i>Чернышев А. С., Шмидт А.А.</i>	449
Исследование распространения волн в насыпной пористой среде, насыщенной неоднородной пузырьковой жидкостью <i>Гималтдинов И. К., Хусаинов И.Г.</i>	450
Экспериментальные и численные исследования оптимизации потока перед воздушным движителем <i>Губский В. В., О.В. Дружинин, О.В. Павленко</i>	452
Исследование течения жидкости в микроканале с массивом препятствий с учетом теплообмена <i>Низамова А. Д., Галиева К.А., Солнышкина О.А.</i>	453
Уравнение состояния жидкого и газообразного алюминия при высоких давлениях и температурах <i>Боярских К. А., Хищенко К. В.</i>	455
Исследование струйного течения термовязких жидкостей <i>Муртазин Н. Э., Мухутдинов Д.А., Низамова А.Д.</i>	456

Численные исследования особенностей обтекания сверхкритического профиля с интегрированной в него импеллерной распределенной силовой установкой <i>Кузин С. А., Волков А.И., Долотин М.В., Пигусов Е.А.</i>	457
Уравнения состояния смесей кремнезема в широком диапазоне давлений, температур и плотностей <i>Середкин Н. Н., Хищенко К.В.</i>	459
Моделирование явления коллапса одиночного кавитационного пузырька вблизи твёрдой стенки с использованием трёхмерных CFD-расчётов <i>Махнов А. В.</i>	460
Влияние плотности дугогасящей среды на скорость восстановления электрической прочности межконтактного промежутка <i>Куракина Н. К., Аверьянова С.А., Образцов Н.В., Тонконогов Е.Н.</i>	462
Влияние турбулентности на параметры плазменного потока высоковольтного плазмотрона переменного тока <i>Образцов Н. В., Быков Н.Ю., Суров А.В.</i>	463
Влияние мембраны на прохождение ударно-волнового импульса в песке <i>Ахметов А. Т., И.К. Гималтдинов, Р.Ф. Гизатуллин, М.А. Азаматов, Д.Р. Богданов</i>	464
Разработка и физические особенности применения адаптивных механизмов крыла в условиях обледенения и обильных осадков <i>Амелюшкин И. А., Губский В.В. , Кудров М.А., Павленко О.В., Дружинин О.В., Мусса Х.</i>	466
Ударная сжимаемость железа при высоких плотностях энергии <i>Хищенко К. В.</i>	467
«Белый список»: смена мерности или парадокс посева на турнире <i>Истомина Н. Л.</i>	469
Механизм лазерного спекания полимерных структур с использованием воды <i>Минаева Е. Д., Попырина Т.Н., Дёмина Т.С., Игнатъева Н.Ю., Юсупов В.И., Минаев Н.В.</i> ..	471
Synergistic effect of SPD and hydrogenation on superplasticity of Ti-2Fe-0.1B alloy <i>Konglan Meng , Yuecheng Dong, Igor V. Alexandrov</i>	472
Влияние магнитного поля на магнитоупругую динамику плёнок с параметрами марганец-цинковой шпинели в области магнитного фазового перехода <i>Майбуров М. В., Котов Л.Н., Абрамовский И.Е.</i>	473
Управление локализованными структурами генерации в полупроводниковом лазере обратной оптоэлектронной связью <i>Мамаев И. С., Ковалев А. В., Викторов Е. А.</i>	475