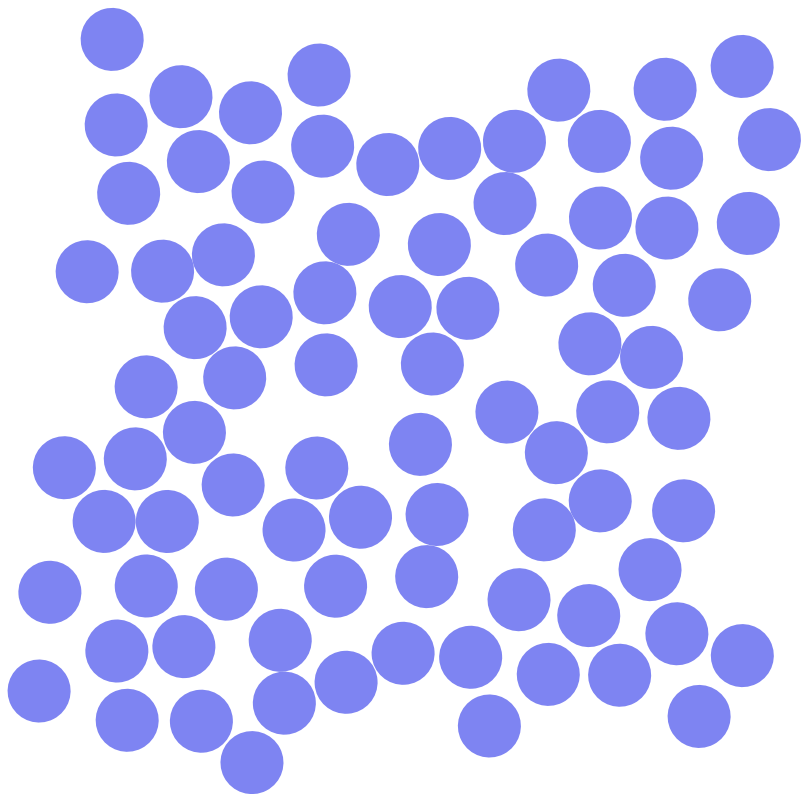




Vol. 2



# AMS<sup>XIV</sup>

XIV International Conference  
«Amorphous and Microcrystalline  
Semiconductors»

30 June-3 July, 2025  
Saint Petersburg

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический  
университет им. Ж. И. Алферова Российской академии наук  
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена

---

## **Аморфные и микрокристаллические полупроводники (AMS14)**

Материалы XIV Международной конференции

В двух частях

(Санкт-Петербург, 30 июня – 3 июля 2025 г.)

**Сборник трудов**

Часть 2

Москва  
МИЭТ  
2025

УДК 621.319.592(06)

ББК 22.379я6

A61 Аморфные и микрокристаллические полупроводники (AMS14).  
Материалы XIV Международной конференции. Сборник трудов.  
В 2 ч. Ч. 2. М. : МИЭТ, 2025. 148 с.

**ISBN 978-5-7256-1065-9 (Ч. 2)**

**ISBN 978-5-7256-1063-5**

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований в области материаловедения и технологии аморфных и микрокристаллических полупроводников.

Для исследователей, разработчиков, студентов и аспирантов, область интересов которых связана с данной тематикой или смежными областями науки и техники.

Presents the results of experimental and theoretical research in the field of materials science and technology of amorphous and microcrystalline semiconductors are presented.

This book will be useful for researchers, developers, students and PhD students whose area of interest is related to this topic or related fields of science and technology.

**Программный комитет:**

Теруков Е.И. – председатель, Алешин А.Н., Бабаев А.А.,  
Вишняков Н.В., Голубев В.Г., Гудовских А.С., Кекелидзе Г.Н.,  
Козодаев Д.А., Козюхин С.А., Колобов А.В., Кудряшов С.И.,  
Лазаренко П.И., Максимов М.Ю., Мазинов А.С., Мошников В.А.,  
Мухин И.С., Орехов Д.Л., Попов А.И., Приходько О.Ю., Рыбин М.В.,  
Саранин Д.С., Серёгин П.П., Светухин В.В., Смирнов А.Г., Тарасов С.А.,  
Takats V., Токмолдин С.Ж., Усачев А.М., Утегулов Ж.Н., Cheng Y.,  
Утамурадова Ш.Б., Шахрай И.С., Шерченков А.А.

**Организационный комитет:**

Теруков Е.И. – председатель, Колобов А.В. – сопредседатель,  
Трапезникова И.Н. – секретарь, Николаев Ю.А., Дронов А.А.,  
Мухин И.С., Лазаренко П.И. – члены организационного комитета

**ISBN 978-5-7256-1065-9 (Ч. 2)**

**ISBN 978-5-7256-1063-5**

**© МИЭТ, 2025**

**Модификация интерфейсов перовскитных фотодиодов  
для рентгеновских систем визуализации непрямого преобразования**

*А.П. Морозов*

*Лаборатория перспективной солнечной энергетики, НИТУ МИСИС,  
Москва, Россия*

*e-mail: morozov.ap@misis.ru*

Перовскитные фотодиоды демонстрируют значительный потенциал для использования в системах непрямого преобразования рентгеновского излучения благодаря их уникальным оптоэлектронным свойствам. В данной работе представлены результаты комплексного исследования модификации интерфейсов микрокристаллического перовскитного поглотителя и электронно-транспортного слоя с использованием полимерного диэлектрика/сегнетоэлектрика поли(винилиден-фторид-трифторэтилен) (P(VDF-TrFE)) с целью повышения чувствительности и быстродействия фотодиодов.

В рамках исследования были созданы p-i-n фотодиоды с перовскитным поглотителем  $\text{Cs}_{0,2}\text{FA}_{0,8}\text{PbI}_{2,93}\text{Cl}_{0,7}$  толщиной 450 нм. Внедрение P(VDF-TrFE) реализовано двумя способами: распределение в объеме перовскита и комбинированное размещение в объеме и на границе с электронно-транспортным слоем PCBM, что позволяет осуществить пассивацию как межзеренных границ в микрокристаллическом перовските, так и интерфейса между поглотителем и электронно-транспортным слоем.

Перовскитные фотодиоды с модифицированным интерфейсом на основе P(VDF-TrFE) продемонстрировали значительное преимущество при регистрации рентгеновского излучения в схеме с использованием сцинтиллятора CsI при низких дозах облучения: фототок увеличивается в 1,7–2,2 раза по сравнению с немодифицированными образцами (рис.1), что приводит к соответствующему росту отношения сигнал/шум (рис.2). Дополнительно отмечено увеличение обнаружительной способности до  $\sim 10^{12}$  Джонс, расширение линейного динамического диапазона до 100 дБ, а также улучшение временных характеристик (время нарастания/спада — 4,6/6,5 мкс, частота среза — 74,8 кГц). Эти результаты

подтверждают высокую эффективность предложенного подхода для непрямого рентгеновского детектирования при минимальных дозах облучения.

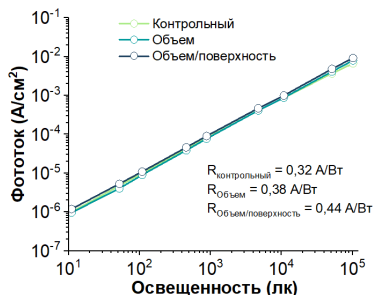


Рис.1. Зависимость фототока перовскитных фотодиодов от освещенности (Зеленый светодиод, 540 нм)

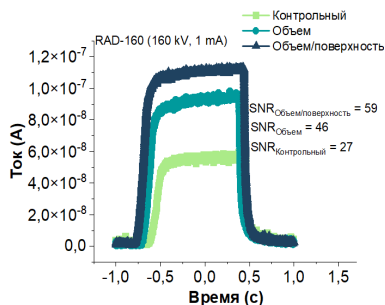


Рис.2. Зависимость фототока перовскитных фотодиодов при освещении светом от сцинтиллятора CsI

Таким образом, интеграция полимерного диэлектрика P(VDF-TrFE) в структуру перовскитных фотодиодов обеспечивает эффективное пассивирование дефектов и оптимизацию интерфейсов, что значительно повышает чувствительность при низких интенсивностях освещения, улучшает соотношение сигнал/шум и повышает быстродействие устройств. Данные фотодиоды перспективны для использования в системах непрямого преобразования рентгеновского излучения, где сцинтиллятор преобразует рентгеновское излучение в видимый свет, регистрируемый высокочувствительным фотодиодом, обеспечивая высокую эффективность при низких дозах облучения.

**Кинетика кристаллизации тонких пленок аморфного  
селенида индия**

*Е.С. Мухаметкаримов, О.Ю. Приходько, Р.Р. Немкаева, Н.Р. Гусейнов,  
Ж.К. Толепов, З. Оман*

*Казахский Национальный университет им. аль-Фараби,  
Алматы, Казахстан*

*e-mail: ye.mukhametkarimov@gmail.com*

В данной работе исследована кристаллизация тонких плёнок аморфного селенида индия (InSe) под воздействием непрерывного лазерного излучения. Пленки были получены методом термического испарения. Установлено, что в зависимости от интенсивности лазерной накачки аморфные пленки InSe способны кристаллизоваться как в фазу InSe, так и в фазу  $\text{In}_2\text{Se}_3$ .

Для определения температуры кристаллизации были проведены измерения зависимости удельного электрического сопротивления от температуры. Анализ выявленной зависимости показал, что переход в кристаллическое состояние происходит при температуре  $\sim 250^\circ\text{C}$ . Предполагается, что наблюдаемый нетипичный сдвиг температуры кристаллизации в стехиометрических пленках InSe обусловлен присутствием примесей углерода и кислорода.

Дополнительно были проведены исследования оптических свойств пленок InSe в аморфном и кристаллическом состояниях. Полученные результаты подтверждают многофункциональные свойства двухкомпонентного халькогенидного полупроводника на основе индия и селена.

*Данная работа выполнена в рамках проекта AP26103225 МНВО РК.*

**Эпитаксиальные слои GaP на сапфире с малыми оптическими потерями для фотонных интегральных схем**

*И.С. Мухин<sup>1,2</sup>, В.В. Федоров<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский Академический Университет РАН  
им. Ж.И. Альферова, Санкт-Петербург, Россия*

*<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: imukhin@yandex.ru*

Одним из перспективных путей развития современной фотоники является создание интегральных фотонных схем (ФИС), где на оптических компонентах могут быть реализованы устройства преобразования и обработки сигналов, а также логические элементы. Перспективными материалами для создания подобных устройств являются гетероструктуры полупроводниковых соединений АЗВ5 – основного материала для создания эффективных светоизлучающих и фотопреобразующих элементов для оптоэлектроники [1]. Высокое значение показателя оптического преломления и электрооптические свойства АЗВ5 соединений делают возможным создание на их основе и других элементов ФИС: волноводов, линий задержки и электрооптических модуляторов [2]. Однако, в большинстве современных технологий для формирования АЗВ5 гетероструктур применяются решеточно-согласованные полупроводниковые подложки (GaAs, InP, Si и др.), обладающие значениями показателя преломления близкими к показателю преломления самой гетероструктуры – в результате, оптическое излучение может беспрепятственно распространяться в подложку, что ведет к высоким оптическим потерям. Так, при создании функциональных элементов ФИС слои гетероструктуры либо выращиваются на поверхности предварительно синтезированного многослойного распределённого Брэгговского отражателя, или переносятся на оптически контрастную подложку-носитель, что существенно усложняет ростовую и пост-ростовую технологии.

Среди множества соединений АЗВ5, фосфид галлия (GaP) выделяется широким диапазоном прозрачности (0,5–11 мкм) и выраженной нели-

нейно-оптической восприимчивостью ( $\chi(2) \approx 70$  пм/В для длины волны 1 мкм) [5, 6].

В данном докладе представлены эпитаксиально-ориентированные слои GaP с высоким оптическим качеством, выращенные непосредственно на прозрачных диэлектрических подложках сапфира  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Установлено, что, несмотря на несоответствие симметрии и параметров решетки, посредством разработанной двухступенчатой техники роста возможно реализовать гетероэпитаксиальный рост слоев GaP-на-сапфире по механизму эпитаксии с доменным согласованием. Так, на поверхности  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001) становится возможен рост эпитаксиально ориентированной пленки GaP (111), где каждая пятая атомная плоскость решетки GaP на границе пленка/подложка совпадает с каждой четвертой плоскостью решетки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с точностью ( $\Delta a/a$ ) 1%.

Кристаллографическая ориентация пленки и её структурное совершенство подтверждены методом рентгеновской дифрактометрии в режиме картирования обратного пространства. Формирование атомно-резкого гетероинтерфейса было подтверждено наблюдениями просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Исследование поверхности эпитаксиальных слоёв методом атомно-силовой микроскопии показало, что предложенная ростовая методика позволяет формировать атомно-гладкие слои GaP с среднеквадратичной шероховатостью поверхности менее 3 нм.

Измерение комплексного показателя преломления слоев GaP-на-сапфире методом спектральной эллипсометрии в видимом и ближнем ИК-диапазоне показали, что оптические константы эпитаксиальных слоев близки к значениям для объемного GaP, а оптические потери низки. Показано, что применение методов электронной литографии и реактивного ионного травления в индуктивно связанной хлорной плазме позволяет формировать на основе GaP-на-сапфире как высокодобротные диэлектрические наноструктуры, поддерживающие оптические резонансы, так и функциональные элементы будущих ФИС.

[1] G. Roelkens et al., «III-V/silicon photonics for on-chip and intra-chip optical interconnects» *Laser Photonics Rev.*, 2010, vol. 4, no. 6, pp. 751–779.

[2] A. Martin, S. Combri , A. de Rossi, G. Beaudoin, I. Sagnes, and F. Raineri, «Nonlinear gallium phosphide nanoscale photonics» *Photonics Res.*, 2018, vol. 6, no. 5, p. B43.



[3] P. Demeester, I. Pollentier, P. De Dobbelaere, C. Brys, and P. Van Daele, «Epitaxial lift-off and its applications» *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, vol. 8, no. 6, pp. 1124–1135.

[4] A. P. Anthur et al., «Continuous Wave Second Harmonic Generation Enabled by Quasi- BoundStates in the Continuum on Gallium Phosphide Metasurfaces» *Nano Lett.*, 2020, vol. 20, no. 12, pp. 8745–8751.

[5] V. Tassev et al., «Progress in orientation-patterned GaP for next-generation nonlinear optical devices» in *Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XII*, 2013, vol. 8604, p. 86040V.

[6] D. F. Parsons and P. D. Coleman, «Far Infrared Optical Constants of Gallium Phosphide,» *Appl. Opt.*, vol. 10, no. 7, p. 1683\_1, Jul. 1971.

**Исследование методом ДСК облученных нейтронами наночастиц  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при низкой температуре**

*Т.Г. Нагиев, Р.Ф. Бабаева, Р.М. Рзаев*

*Азербайджанский Государственный Экономический Университет,  
Баку, Азербайджан*

*e-mail: tural.nagiyev@unec.edu.az*

Керамические материалы с уникальными свойствами привлекательны для применения в различных областях науки и техники. В частности, эти типы материалов играют ключевую роль в ядерной технике из-за чрезвычайно высокой устойчивости к внешним воздействиям, таким как температура, радиация и т.д. Поэтому переход к наноматериалам вместо объемных материалов занимает очень важное место в стремительном развитии этой области. Конечно, в указанном направлении не все керамические материалы могут иметь высокие перспективы применения. В связи с этим, очень важным вопросом является выбор материалов с широкими возможностями применения и подходящими свойствами.

В последние годы интенсивно изучаются воздействия нейтронного потока на материалы на основе кремния. В этой связи мы представляем низкотемпературное теплофизическое исследование наночастиц нитрида кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). В данной работе мы провели ДСК (дифференциальная сканирующая колориметрия) исследование наночастиц  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в диапазоне температур  $100 \div 500$  °С.

Теплофизические параметры некристаллических наночастиц  $\text{Si}_3\text{N}_4$  были сравнительно проанализированы до и после нейтронного облучения как в процессах нагрева, так и охлаждения при низкой температуре. Тепловой поток и энергия Гиббса наночастиц  $\text{Si}_3\text{N}_4$  были определены во время нагрева и охлаждения во всем диапазоне температур.

В качестве материала для экспериментов были выбраны некристаллические  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  наночастицы с удельной поверхностью  $50\text{-}120$  м<sup>2</sup>/г, размером частиц  $15\text{-}30$  нм и плотностью  $0.05$  г/см<sup>3</sup> (истинная плотность  $3.4$  г/см<sup>3</sup>). Образцы облучались в легководном исследовательском реакторе TRIGA Mark II в Институте Йозефа

Стефана (Словения, Любляна) на полной мощности (250 кВт) с плотностью потока  $2 \times 10^1 \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  (канал A1). Теплофизические параметры  $\text{Si}_3\text{N}_4$  изучались на приборе NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix при низкой температуре до и после нейтронного облучения.

На основании анализа спектров ДСК установлено, что пики наблюдаются при температурах 208<sup>0</sup>С и 235<sup>0</sup>С в необлученных и облученных нейтронами наночастицах  $\text{Si}_3\text{N}_4$  соответственно. Повышение температуры с 208<sup>0</sup>С до 235<sup>0</sup>С в результате облучения обусловлено образованием новых и более стабильных радикалов в материале под воздействием потока нейтронов. Одновременно установлено, что до облучения процесс требовал 128 Дж энергии на грамм, а в результате облучения этот показатель снизился примерно на 28 Дж. При этом были определены начальная и конечная температуры процесса до и после облучения, которые составили 181<sup>0</sup>С-215<sup>0</sup>С и 190<sup>0</sup>С-251<sup>0</sup>С соответственно. Это говорит о том, что во время нейтронного облучения происходит сдвиг связей или на более глубоких уровнях образуются ловушки на основе Si и N, что позволяет подходящим радикалам оставаться более стабильными на поверхности материала. Из свободной энергии Гиббса установлено, что система находится в равновесии в диапазоне температур  $T < 180^0\text{C}$ , спонтанна в диапазоне 180<sup>0</sup>С–250<sup>0</sup>С и не спонтанна при нормальных условиях в диапазоне  $T > 250^0\text{C}$ . В процессе охлаждения наноматериал находится в равновесии до температуры около 400<sup>0</sup>С ( $G \sim 0$ ). При  $T > 400^0\text{C}$  химический потенциал системы увеличивается пропорционально температуре. Сдвиг пика ДСК с 208<sup>0</sup>С в необлученном образце до 235<sup>0</sup>С в облученных нейтронами некристаллических наночастицах  $\text{Si}_3\text{N}_4$  отражает структурные и термодинамические изменения, вызванные нейтронным облучением.

Из чего следует, что облучение вносит дефекты и увеличивает энергетические барьеры для тепловых переходов, которое приводит к повышению термической стабильности и более высоким энергетическим требованиям для тепловых событий. Этот сдвиг в термическом поведении подчеркивает потенциал нейтронного облучения как инструмента для адаптации свойств некристаллических наночастиц  $\text{Si}_3\text{N}_4$  для передовых технологических приложений в высокотемпературных средах.

**Экспериментальные и теоретические исследования рамановских спектров кристаллов системы твердых растворов  $\text{TlGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}_2$** 

*А.И. Наджафов<sup>1</sup>, Г.Р.Махмудова<sup>1</sup>, З.А. Джахангирли<sup>1,2</sup>, В.Б. Алиева<sup>1</sup>,  
З.И. Бадалова<sup>1</sup>, Т.Г. Мамедов<sup>1</sup>, Н.А. Абдуллаев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт физики Мин. науки и обр. Азерб., Баку, Азербайджан*

<sup>2</sup>*Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан*

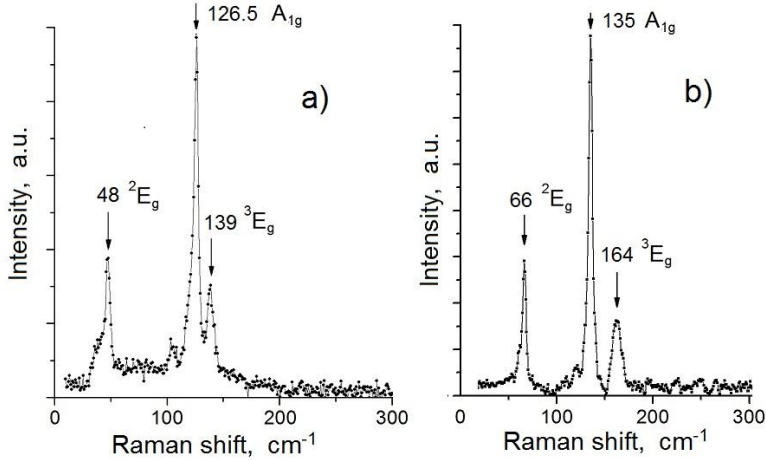
*e-mail: abnadir@mail.ru*

Полупроводниковые соединения  $\text{TlGaTe}_2$  и  $\text{TlInTe}_2$  и их структурные аналоги стали в последнее время объектами интенсивных исследований в связи с тем, что, наряду с перспективами их практического применения в оптоэлектронике и фотовольтаике [1], в них обнаружены ультранизкие значения решеточной теплопроводности ( $\sim 0.5 \text{ W/mK}$ ) [2]. Они принадлежат к группе соединений со структурой типа  $\text{TlSe}$  и характеризуются центросимметричной тетрагональной структурой с пространственной группой симметрии  $D_{4h}^{18}$  ( $I4/mcm$ ). Длинные отрицательно заряженные цепочки  $(\text{M}^{3+}\text{Te}_2^{2-})^-$ , где  $\text{M}=\text{In}, \text{Ga}$ , вытянуты вдоль кристаллографической оси  $c$ . Фрагменты различных цепочек связаны между собой расположенными между ними одновалентными ионами  $\text{Tl}^+$ . Связь внутри цепочек ковалентная, в то время как цепочки связаны друг с другом более слабой ионной связью. Такая анизотропия и обуславливает отнесение соединений со структурой типа  $\text{TlSe}$  к одномерным 1D материалам.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального и теоретического изучения из первых принципов рамановских спектров твердых растворов  $\text{TlGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}_2$ .

Изучение рамановского рассеяния света в твердых растворах  $\text{TlGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}_2$  проводилось при температуре  $T=300\text{K}$  на конфокальном рамановском микроспектрометре «Nanofinder 30» (Tokyo Instr., Japan), длина волны возбуждения  $\lambda=532 \text{ нм}$ . Ab-initio расчеты динамики решётки проводились с помощью теории возмущений функционала плотности DFPT (Density Functional Perturbation Theory) с использованием метода псевдопотенциала на основе плоских волн, реализованного в коде ABINIT.

Из эксперим. исследований рамановских спектров в кристаллах  $\text{TlInTe}_2$ ,  $\text{TlGaTe}_2$  (на рисунке) и в их твёрдых растворах  $\text{TlGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}_2$  выявлены частоты Раман-активных мод, идентифицированы сами моды, выявлен характер перестройки фононных спектров. Показано, что мода  ${}^2\text{E}_g$  проявляет одномодовую перестройку фононного спектра при изменении состава твёрдых растворов, а моды  $\text{A}_{1g}$  и  ${}^3\text{E}_g$  - двухмодовую перестройку фононного спектра.



Рамановские спектры в монокристаллах  $\text{TlInTe}_2$  (a) и  $\text{TlGaTe}_2$  (b)

Из расчётов из первых принципов определены вклады колебаний различных атомов в плотность фононных состояний (PDOS), изучена дисперсия фононных мод, рассчитаны частоты оптических мод для различных составов  $\text{TlGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}_2$ . Показано, что колебания тяжёлых атомов Tl вносят вклад в плотность фононных состояний в основном в области низких частот ( $<80 \text{ cm}^{-1}$ ), а вклад в моду  $\text{A}_{1g}$  ( $120\text{--}130 \text{ cm}^{-1}$ ) в основном вносят колебания атомов Te. Получено хорошее согласие экспериментально полученных и рассчитанных теоретически из первых принципов результатов.

[1] T. Helaimia, S. Maabed, A. Benmakhlouf, et al., *Physica Scripta*, 99, 045931 (2024).

[2] M. Wu, Enamullah, Li Huang, *Phys. Rev. B*, 100, 075207 (2019).

**Атомно-молекулярный дизайн и наноархитектоника  
новых функциональных материалов**

*С.С. Налимова, В.А. Мошников*

*СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: sskarpova@list.ru*

Наряду с продолжающимся развитием нанотехнологий зародился и мощно развивается новый этап постнанотехнологии, а именно, этап наноархитектоники и атомно-молекулярного дизайна. Появление этого этапа связано с тем, что интересным представляется сочетание и сборка иерархических конструкций из элементов нанотехнологии. При этом наноэлементы, обладая различными свойствами, приводят к функционально новым возможностям и синергетическим эффектам.

В докладе основное внимание уделено прежде всего иерархическим пористым системам, таким как металлоорганические каркасы (MOF), ковалентные органические каркасы (COF), цеолитные имидазолатные каркасы (ZIF), трижды периодические поверхности с минимальной энергией (ТППМЭ), а также рассмотрены двумерные слоистые материалы, включая максены, ван-дер-Ваальсовы гетероструктуры и квазикристаллы.

MOF имеют преимущества высокой пористости, и благодаря наличию металлических атомов широко применяются в различных областях катализа. Сборка COF из отдельных блоков позволяет адаптировать их структуру и свойства для каждой конкретной области применения [1]. Большую группу каркасных структур образуют ZIF, отличающиеся типом лигандов и атомами металла, которые находят применение в катализе и в качестве контейнеров для хранения молекул газообразных веществ [2]. Яркие представители группы 2D слоистых материалов, максены, обладают отличной электропроводностью и механической прочностью [3]. Эти свойства делают их перспективными электродными материалами, а также компонентами при создании композитов. На основе нескольких 2D слоев, связанных между собой силами Ван-дер-Ваальса, разработаны различные гетероструктуры. Они открывают новые возможности для создания электронных устройств, в особенно-

сти оптоэлектронных. Помимо ван-дер-ваальсовых гетероструктур, разрабатываются и композиты на их основе [4, 5]. Развитие аддитивных технологий привело к практической реализации структур на основе ТППМЭ [6]. Их отличные механические характеристики позволяют выдерживать экстремальные нагрузки. Открытие и развитие квазикристаллических структур вызвало большой интерес исследователей в области фотоники [7].

[1] С. Налимова, В. Мошников, *Нано- и микросистемная техника*, 27, № 2, 55-67 (2025).

[2] T. Xiao, D. Liu, *Materials Today Energy*, 14, 100357 (2019).

[3] T. Seling, M. Songsart-Power, A. Shringi, J. Paudyal, F. Yan, T. Limbu, *Molecules* 30, 1463 (2025).

[4] S. Nalimova, Z. Shomakhov, O. Zyryanova, V. Kondratev, C. Bui, S.A. Gurin, V. Moshnikov, A. Zhilenkov, *Molecules*, 30, 566 (2025).

[5] З. Шомахов, С. Налимова, О. Зырянова, В.М. Кондратьев, З.Х. Калажожов, К. Буй, В. Мошников, *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*, 16, 1060-1070 (2024).

[6] M. Arsentev, E. Topalov, S. Balabanov, E. Sysoev, I. Shulga, M. Akhmatnabiev, M. Sychov, E. Skorb, M. Nosonovsky, *Biomimetics*, 9, № 5, 285 (2024).

[7] А. Мадисон, П. Мадисон, В. Мошников, *ЖТФ*, 94, № 4, 561-570 (2024).

**Модификация малослойного графена с целью получения  
устойчивой дисперсии**

*А.Ю. Неверовская, А.П. Возняковский, А.В. Калинин*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Научно-исследовательский институт синтетического каучука  
им. С.В. Лебедева», Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: anna-neverovskaya@yandex.ru*

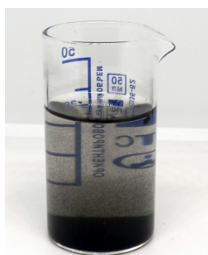
Графен – двумерная молекула, состоящая из атомов углерода, которые образуют упорядоченную гексагональную сетку. Наиболее примечательными материалолюбческими свойствами графена являются его экстремальная прочность в сочетании с упругостью и аномально высокая теплопроводность и электропроводность, а также высокая теоретическая удельная площадь поверхности. Все это обуславливает возможность его применения в качестве электродов для суперконденсаторов. Большинство промышленных методов осаждения электродов связаны, например, с распылением или осаждением кистью из дисперсий. Наиболее экологичным вариантом является водная дисперсия. Метод получения такой дисперсии из восстановленного оксида графена (rGO) описан в работе [1]. Недостатком данного подхода является малая производительность и энергозатратность метода Хаммерса GO и, соответственно, получения их него rGO. Нами разработан способ получения малослойного графена (МГ) – аналога rGO –, который позволяет получать его в количествах, необходимых для реального применения [2]. Метод основан на карбонизации биоматериалов в условиях процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Целью данной работы было получение устойчивой дисперсии из малослойного графена.

В ходе выполнения настоящей работы мы использовали МГ, полученный карбонизацией микрокристаллической целлюлозы. В процессе СВС вследствие особенностей синтеза на поверхности графеновых наночастиц могут присутствовать как гидроксильные, так и карбоксильные функциональные группы. Поэтому было принято решение провести модификацию МГ по реакции с боргидридом натрия, что поз-



волило нам восстановить карбоксильные группы до необходимых нам гидроксильных. Прохождение реакции было качественно подтверждено методом инфракрасной спектроскопии. Количественные характеристики по содержанию ОН-групп в исходном и модифицированном МГ были рассчитаны из данных газо-жидкостной хроматографии. Использовали реакцию гидроксильных групп с дигидропираном, убывь которого в процессе реакции относительно стандарта (толуола) отслеживали по хроматограмме. Показано, что содержание ОН-групп в МГ увеличивается при модификации с 18,5 до 83,0 ммоль/г.



Исходный МГ



Модифицированный МГ

#### Внешний вид водных суспензий исходного и модифицированного МГ из целлюлозы через 10 дней выдержки

Вид суспензий исходного и модифицированного МГ (0,5% массе) — после 3-х минутного озвучивания и выдержки — представлен на рисунке. Видно, что модификация синтезированного нами МГ боргидридом натрия позволяет получить его устойчивую дисперсию.

Предложенная нами методика синтеза МГ, обогащенного гидроксильными группами, позволяет получить его устойчивую водную дисперсию, перспективную для дальнейшего использования в технологии получения суперконденсаторов.

[1] V. Skrypnychuk, N. Boulanger, A. Nordenström, A. Talyzin. *J. Phys. Chem. Lett.*, 11, 3032–3038 (2020).

[2] A.P. Voznyakovskii, A.Yu. Neverovskaya, Ja.A. Otvalko, E.V. Gorelova, A.N. Zabelina. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 9, 125–128 (2018).

**Фазопеременные халькогенидные полупроводники в устройствах интегральной фотоники**

*А.А. Невзоров<sup>1,2</sup>, А.И. Проходцов<sup>1,2</sup>, В.В. Ковалюк<sup>2</sup>, П.И. Лазаренко<sup>1</sup>,  
В.В. Светухин<sup>3</sup>, А.Д. Голиков<sup>1</sup>, С.А. Козюхин<sup>4</sup>, Г.Н. Гольцман<sup>5</sup>*

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Лаборатория фотонных газовых сенсоров, МИСИС, Москва, Россия*

*<sup>3</sup>НПК «Технологический центр», Зеленоград, Россия*

*<sup>4</sup>Институт общей и неорганической химии имени им. Н.С. Курнакова  
РАН, Москва, Россия*

*<sup>5</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа  
экономики», Москва, Россия*

*e-mail: terrapevt@mail.ru*

Фазопеременные материалы (ФПМ) на основе халькогенидных сплавов находят многочисленные применения в микроэлектронике и фотонике [1]. Использование ФПМ открывает перспективы создания полностью оптической энергонезависимой памяти [2], модуляторов фазы и интенсивности оптического излучения [3], а также может позволить создать фотонные нейроморфные системы [4]. Ключевое свойство ФПМ – это их способность долговременно сохранять кристаллическое или аморфное фазовое состояние при комнатной температуре. При этом такие состояния значительно отличаются по электрическим и оптическим свойствам. Большой контраст коэффициентов преломления между аморфной и кристаллической фазами в таких материалах делает их использование перспективным подходом для формирования управляемых элементов интегральной фотоники [5,6].

В данной работе представлены результаты разработки и создания интегральных фотонных устройств на основе нитрида кремния с тонкими пленками ФПМ (20 нм), где фазовое состояние управляется оптическими импульсами, распространяющимися в волноводной структуре. Разработанный протокол управления фазовым состоянием пленок ФПМ позволил добиться записи не менее 4х безошибочно считываемых состояний волноводной структуры, характеризующихся различным про-

пусканьем. При этом для некоторых конфигураций устройств удалось добиться изменения пропускания до 6 дБ между различными состояниями.

Продемонстрирована возможность 10 000 циклов переключения устройства без коррекции протокола записи/стирания. При этом проведенная корректировка параметров управляющих оптических импульсов и уровней пропускания различных состояний позволила достигнуть более 100 000 циклов переключения структуры.

В рамках выполненного исследования топологии фазовой структуры пленок ФПМ на волноводах с помощью электронной микроскопии было обнаружено образование сложной конфигурации участков различных фаз после многократного переключения пленки оптическими импульсами. Проведенные измерения времени переключения структур с пленками ФПМ между различными состояниями показали, что с учетом тепловой релаксации переход в стабильное состояние занимает не более 200 нс при управлении оптическими импульсами с длительностью от 25 до 100 нс.

Проведенные нами исследования показывают, что разработанные и изготовленные структуры могут использоваться не только как мультибитовые ячейки полностью оптической памяти, но и как энергонезависимые элементы оптических вычислительных (в том числе data-driven) систем.

*Работа выполнена в лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» (Соглашение 075032025266/1 от 25.03.2025 г., FSMR-2025-0002).*

- [1] W. Zhang, R. Mazzarello, E Ma, *MRS Bulletin*, 44, 686-690 (2019).
- [2] J Su. et al., *ACS Photonics*, 11, 102-110 (2023).
- [3] A. V. Kiselev et al., *JETP Letters*, 120, 440-444 (2024).
- [4] T Li et al., *Nanomaterials*, 13, 1765 (2023).
- [5] C Rios et al., *Optical materials express*, 8, 2455-2470 (2018).
- [6] C Rios et al., *Nature photonics*, 9, 725-732 (2015).

**Резонансная фотоника метаповерхностей на основе  
гидрогенизированных аморфных полупроводников**

*С.И. Павлов, А.Б. Певцов*

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: Pavlov\_Sergey@mail.ioffe.ru*

Оптические наноструктуры обладают широкими функциональными возможностями, включающими формирование заданного спектрального отклика, контроль направления распространения и поляризации света, увеличение эффективности излучения и многие другие [1, 2]. Такое разнообразие эффектов связано с возможностью возбуждения в элементах с размерами меньше длины волны света резонансов различной природы с характерными для них особенностями, а создание структур в виде массивов упорядоченных элементов позволяет контролируемо сочетать локальные резонансы с коллективными эффектами. Однако, для получения требуемого оптического отклика в первую очередь необходимо понимание резонансных эффектов, существующих в системе.

В докладе будет представлен краткий обзор резонансных свойств и перспективы применения в нанопотонике метаповерхностей различной размерности на основе гидрогенизированного аморфного кремния и родственных ему материалов. Основное внимание будет уделено собственным работам авторов, в которых рассматриваются светоизлучающие метаповерхности на основе гидрогенизированного аморфного сплава кремний-углерод (a-Si:C:H). В таких структурах экспериментально и теоретически изучена природа оптических резонансов, обнаружено и описано образование связанных состояний в континууме (ССК) различной природы – симметрично-запрещенные, поляритонные, а также новый тип ССК в одиночной гибридной моде. Показано их влияние на особенности фотолюминесценции светоизлучающего слоя.

*[1] S.A. Schulz, et al., Appl. Phys. Lett. 124, 260701 (2024).*

*[2] A.I. Kuznetsov, et al., ACS Photonics, 11, 816–865 (2024).*

**Развитие средств Brillouin-волоконной оптики  
для тестирования халькогенидных материалов**

*И.С. Паняев<sup>1</sup>, П.А. Итрин<sup>1</sup>, Д.А. Коробко<sup>1</sup>, В.И. Скрипачев<sup>2</sup>,  
А.А. Фотиади<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>*Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,  
Нижний Новгород, Россия*

<sup>3</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия*

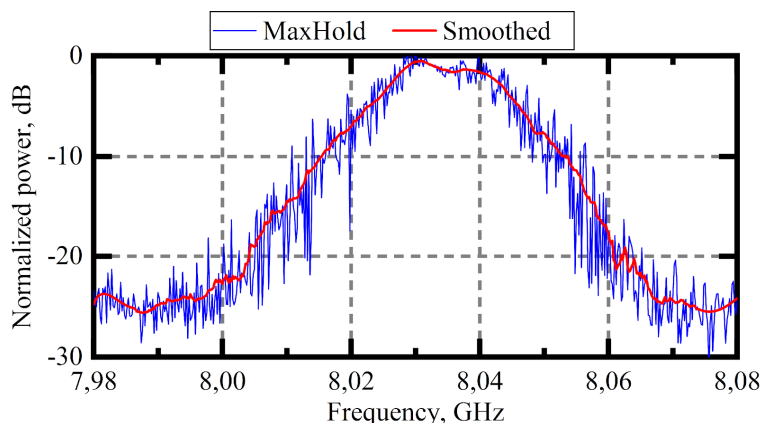
*e-mail: panyayev.ivan@rambler.ru*

Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) в оптических волокнах широко используется в волоконных лазерах и сенсорах. Недавно его применение в микроволновой фотонике открыло новые возможности, включая перестраиваемую узкополосную ВРМБ-фильтрацию, что особенно полезно для подавления оптической несущей частоты в радиочастотных устройствах. В этом контексте привлекают внимание волноводные среды на основе халькогенидных стекол, содержащих серу (S) и селен (Se). Эти среды обладают значительно более высоким коэффициентом ВРМБ-усиления по сравнению со стандартными телекоммуникационными волокнами, что делает их перспективными для создания устройств Brillouin-фотоники в гибридных фотонных интегральных схемах.

В данном докладе представлен и продемонстрирован метод измерения ключевых параметров ВРМБ в интегральных структурах. Этот метод основан на возбуждении начального ВРМБ-сигнала в тестируемом элементе и его последующем усилении в длинном отрезке стандартного оптического волокна. Для этого используются два узкополосных лазера, работающих на разных частотах. Измерительная установка, реализующая этот метод, была протестирована на нескольких отрезках халькогенидного одномодового волокна длиной от 40 см до 1 м, изготовленного в Институте химии высокочистых веществ РАН (г. Нижний Новгород). Были измерены порог мощности накачки для ВРМБ-генерации (до ~ 150 мВт), коэффициент усиления ВРМБ и его

частотная характеристика (с центром на частоте около 8.03 ГГц). Источником накачки для возбуждения начального ВРМБ-сигнала в тестируемом отрезке волокна служил узкополосный лазер на эффекте самозахвата частоты [1-5]

Предложенный метод является универсальным и может быть применен для измерения ВРМБ низкой интенсивности в различных оптических средах и для различных областей спектра.



Сигнал ВРМБ в тестируемом отрезке халькогенидного волокна после усиления в ВРМБ-усилителе

*Работа выполнена при поддержке РФФ (project 23-79-30017).*

- [1] V. Spirin et al, *Laser Physics Letters*, 9, №5, 377 (2012).
- [2] J. Escobedo et al, *Results in Physics*, 6, 59-60 (2016).
- [3] V. Spirin et al, *Optics express*, V.28, №1, 478-484 (2020).
- [4] V. Spirin et al, *Optics & Laser Technology*, 141, 107156 (2021).
- [5] I. Panyayev et al, *Journal of Lightwave Technology*, 42, №8, 2928-2937 (2024).

**Интеграция сегнетоэлектрических пленок  $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$   
с тонкопленочными полупроводниками для создания  
устройств гибкой электроники**

*А.В. Парочкин, И.А. Савичев, И.Г. Марголин, А.А. Чуприк*

*МФТИ, Долгопрудный, Россия*

*e-mail: parochkin.av@mipt.ru*

Разработка нового поколения высокоплотной энергонезависимой памяти требует использования нанометровых сегнетоэлектрических пленок. Наиболее перспективными кандидатами являются поликристаллические легированные пленки оксида гафния, поскольку они идеально совместимы с кремниевой технологией, обладают большой остаточной поляризацией и малым коэрцитивным напряжением [1]. Интеграция оксида гафния с полупроводниковыми материалами необходима для создания сегнетоэлектрического полевого транзистора (FeFET), обладающего высокой способностью к масштабированию, и мемристора, который может служить основой для аппаратной реализации нейронных сетей. Поэтому актуальной задачей является разработка технологических подходов изготовления структур металл-сегнетоэлектрик-полупроводник, в которых бы проявлялись функциональные свойства сегнетоэлектрика и полупроводника – высокая остаточная поляризация и управляемая проводимость соответственно.

Известно две топологии FeFET: 1T (1 transistor, 1 транзистор), когда сегнетоэлектрик выполняет роль подзатворного диэлектрика, и 1T1C (1 transistor – 1 capacitor, 1 транзистор – 1 конденсатор), когда сегнетоэлектрический конденсатор последовательно соединен с затвором транзистора. Достоинствами топологии 1T1C является большее время хранения состояния и ресурс циклов записи-перезаписи, а достоинством 1T – меньшее энергопотребление [2]. В обеих топологиях полупроводниковый слой может быть расположен как под, так и на слое сегнетоэлектрика. В первом случае полупроводник подвергается воздействию кристаллизационного отжига, который необходим для перехода оксида гафния из аморфной в кристаллическую сегнетоэлектрическую фазу, но может пагубно повлиять на свойства полупроводника.

В данной работе были изготовлены мемристорные структуры и функциональные многослойные транзисторные структуры топологий 1T1C и 1T на основе тонкой сегнетоэлектрической пленки оксида гафния-циркония  $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$  (10 нм) и разных органических и оксидных полупроводников: фталоцианина меди ( $\text{CuPc}$ ), оксида алюминия-цинка (AZO) и оксида индия-галлия-цинка (IGZO). Для транзисторов были измерены выходные, переходные и затворные характеристики, исследовано влияние параметров полупроводниковых пленок и стока/истока на полевой эффект. Для мемристорных структур было измерено количество возможных резистивных уровней, их временная стабильность и ресурс переключений. Установлено, что поверхностные состояния на границе раздела  $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ -полупроводник создают деполяризующее поле в сегнетоэлектрическом слое, что негативно влияет на время хранения записываемых состояний. В то же время, динамика зарядки поверхностных состояний имеет характерное время, соответствующее частоте процессов, определяющих динамику биологических синапсов. Было показано, что это свойство может быть использовано для эмуляции работы синапсов, а мемристоры на основе структур  $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ -полупроводник могут быть использованы как элементная база аппаратный нейровычислительных систем.

Представленные экспериментальные результаты могут быть полезны для разработки научно-технологических основ инженерии материалов в области энергонезависимой памяти и нейроморфных блоков на основе тонких пленок оксида гафния.

*Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием МФТИ при поддержке Министерства науки и высшего образования (Соглашение № 075-03-2025-662, проект FSMG-2025-0025).*

[1] T.S. Böske et al., *Appl. Phys. Lett.*, 99 (10), 102903 (2011).

[2] K. Ni, J.A. Smith, B. Grisafe, T. Rakshit, B. Obradovic et al., *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) IEDM18-296-299* (2018).



**Перестраиваемые отражающие оптические элементы на основе тонких пленок фазопеременного материала  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  для устройств энергонезависимого отображения информации**

*В.Б. Пестова<sup>1</sup>, Н.М. Толкач<sup>2</sup>, Д.Л. Горошко<sup>3</sup>, А.В. Ромашкин<sup>1</sup>,  
Г.Н. Пестов<sup>1</sup>, М.П. Смаев<sup>4</sup>, М.А. Сауров<sup>5</sup>, Е.П. Кицюк<sup>5</sup>, П.И. Лазаренко<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Рязань, Россия*

*<sup>3</sup>ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, Россия*

*<sup>4</sup>ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия*

*<sup>5</sup>НПК "Технологический центр", Москва, Россия*

*e-mail: Karakusek2009@yandex.ru*

Тонкие пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) представляют собой перспективный материал для создания перестраиваемых отражающих элементов, используемых в энергонезависимых системах отображения информации. Ключевой интерес к GST обусловлен высокой скоростью обратимых фазовых переходов между аморфным и кристаллическим состояниями (менее 50 нс) и значительным оптическим контрастом (до 30%). Эти фазовые преобразования могут быть инициированы лазерным, электрическим или тепловым воздействием, а их обратимость позволяет формировать энергонезависимые, многократно перестраиваемые оптические устройства визуализации.

В области отображения и визуализации данных эти уникальные свойства GST применяются как в интерференционных многослойных GIA-структурах (GST/ITO/Al/подложка), где управление цветом и отражательной способностью осуществляется за счёт изменения толщины слоя ITO и фазового состояния GST, так и в резонансных системах, включая лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИПС). Последние обеспечивают динамическое управление направлением отражённого излучения и резонансной длиной волны, что определяет цветовые характеристики формируемых элементов.

Возможность формирования в материалах GST более десяти устойчивых промежуточных фазовых состояний с различной степенью кристалличности расширяет спектр управления коэффициентами отражения, преломления и экстинкции. Это критически важно для создания систем пространственной модуляции света, а также для производства полноцветных дисплеев, способных отображать градации серого и другие полутонные цвета.

Данная работа направлена на разработку технологии создания перестраиваемых отражающих элементов на основе тонких пленок GST для энергонезависимого отображения информации. Особое внимание уделяется исследованию процессов кристаллизации и аморфизации GST в структурах GIA под действием непрерывного или импульсного лазерного излучения, а также на определение оптимальных параметров, обеспечивающих формирование высококонтрастных, энергонезависимых и многократно переключаемых оптических изображений, в том числе лазерно-индуцированных периодических структур. Кроме того, рассматривается реализация перестраиваемых отражающих элементов большой площади с использованием тонкопленочных резистивных металлических нагревателей для переключения фазового состояния GST. Такой подход существенно увеличивает масштабируемость устройств и также обеспечивает равномерное изменение оптического оттенка по всей площади разрабатываемого и исследуемого RGB-элемента на основе тонких пленок GST.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №23-79-10309).*

**Получение и исследование тонких аморфных слоев органических красителей для использования в солнечных элементах**

*В.И. Петрова, С.С. Козлов, О.В. Алексеева,  
А.Б. Никольская, О.К. Карягина, О.И. Шевалеевский*

*Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН,  
Москва, Россия*

*e-mail: petrovavi@internet.ru*

Методом резистивного испарения в вакууме получены конденсированные слои органических красителей с аморфной структурой толщиной 50-200 нм. В работе были использованы красители, перспективные для применения в качестве светопоглощающих слоев и сенситизаторов при конструировании органических солнечных элементов (СЭ) и включали такие соединения, как фталоцианин цинка ( $ZnPc$ ), рутениевый краситель *C-106*, а также органические красители ряда нафталимидов. Оптические, структурные и морфологические свойства полученных слоев были исследованы методами *UV-vis* спектроскопии, рентгеноструктурный анализ (РСА), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ).

Полученные материалы были использованы для создания ряда СЭ со структурой  $TiO_2$ (моно)/краситель/ $Au$ , с различными толщинами светопоглощающего слоя. Исследование фотоэлектрических характеристик предложенной модельной системы проводились при освещении имитатором солнечного излучения (*AM1.5G*). Были получены вольт-амперные характеристики, спектральные зависимости квантовой эффективности, значения токов короткого замыкания и напряжений холостого хода

Анализ полученных данных позволил определить ряд ключевых параметров исследованных конденсированных слоев красителей и прогнозировать перспективы их использования в качестве сенситизаторов в фотоэлектрехимических СЭ, *DSCs* (*dye-sensitized solar cells*).

Была предложена теоретическая модель и проведен анализ изменения фотоэлектрических параметров модельного СЭ в зависимости от толщины светопоглощающего слоя. В результате расчетов, для каждого красителя были получены значения длины диффузии носителей заряда, которые во многом определяют эффективность работы органического СЭ.

*Эта работа финансируется Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания №45.9 «Теоретические и экспериментальные исследования композиционных материалов и наноструктур, материалов для фотовольтаики, биоматериалов, биокomпозитов и низкоразмерных систем (2025-2029)».*

**Сборка фотонных интегральных схем: оптимальные стратегии ввода-вывода излучения**

*Р.С. Пономарев, А.С. Паньков*

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*

*e-mail: kuperok2003@mail.ru*

Фотонные интегральные схемы являются оптическим аналогом микроэлектронных схем, обеспечивая высокоскоростную передачу данных за счет спектрального уплотнения и высокочастотного кодирования сигнала. Элементы фотонных интегральных схем формируются, как правило, на поверхности полупроводниковых или диэлектрических кристаллов и нуждаются в стыковке с оптическим волокном для передачи сигнала в линию связи. Данная операция, несмотря на кажущуюся простоту, требует применения ряда приёмов, чтоб обусловлено высокими требованиями к точности позиционирования объектов, где ошибка не должна превышать десятых долей микрометра.

В докладе освещаются вопросы ввода излучения в дифракционные решетки, сформированные на поверхности кристалла (вертикальный ввод излучения), и в оптические волноводы, торцы которых выходят на боковые грани кристалла (торцевой ввод). Показано, что ошибка в вертикальном позиционировании волноводов на один градус приводит к росту оптических потерь на 1 дБ.

Для торцевого ввода излучения рассматриваются вопросы применения линзованных оптических волокон и волокон с сердцевинной малого диаметра с точки зрения минимизации оптических потерь и сохранения поляризации излучения. Показано, что степень сохранения поляризации излучения может достигать 40 дБ при определенных методах формирования микролинз на торце оптического волокна.

*Исследование выполнено за счет средств государственного задания №FSNF-2024-0001.*

**Структура и свойства пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ,  
модифицированных азотом**

*О.Ю. Приходько<sup>1</sup>, А.К. Кожакенова<sup>1</sup>, А.В. Колобов<sup>2</sup>, Н.Р. Гусейнов<sup>1</sup>,  
Ж.К. Толепов<sup>1</sup>, Е.С. Мухаметкаримов<sup>1</sup>, Г.А. Исмаилова<sup>1</sup>, А.С. Капанов<sup>1</sup>,  
С.Л. Пешая<sup>1</sup>, С.Я. Максимова<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>НАО КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

*<sup>2</sup>РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: prikhodko\_o@mail.ru*

Исследовано влияние примеси азота на структуру, температуру кристаллизации ( $T_c$ ), электрические и оптические свойства и эффект переключения тонких аморфных пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (a-NGST). Пленки толщиной  $\sim 400$  нм на кварцевых подложках получались методом ионно-плазменного ВЧ (13,56 МГц) магнетронного распыления поликристаллической мишени  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  в атмосфере смеси газов  $\text{Ar}$  и  $\text{N}_2$  при давлении  $\sim 1$  Па. Концентрация примеси  $\text{N}$  подбиралась таким образом, чтобы при нагреве пленок a-NGST реализовались 1-й и 2-й фазовые переходы (ФП), и структура кристаллических пленок c-NGST соответствовала кристаллической структуре *fcc* и *hcp* пленок c-GST.

Было установлено, что у таких пленок a-NGST наблюдается при скорости нагрева  $2^\circ\text{C}/\text{мин}$  увеличение  $T_c$  с  $153$  до  $165^\circ\text{C}$ . При этом рамановские спектры и спектры рентгеновской дифракции аморфных и кристаллических *fcc* и *hcp* пленок GST и NGST практически идентичны. Примесь  $\text{N}$  приводит к уменьшению проводимости и увеличению энергии активации и оптической ширины запрещенной зоны пленок a-GST при расположении уровня Ферми в середине запрещенной зоны. В сэндвич структурах  $\text{Al/a-NGST/Au}$  также, как и в  $\text{Al/a-GST/Au}$  наблюдается эффект переключения с памятью.

Таким образом, существует область концентрации примеси азота, при которых пленки NGST сохраняют основные особенности структуры и электронных свойств пленок GST, но при этом характеризуются повышенной термостабильностью.

*Исследование проведено по программе гранта КН Министерства науки и высшего образования РК (грант № AP14871061).*

**Исследования динамики переключения состояний интегральных фотонных устройств с перестраиваемыми элементами на основе фазопеременных халькогенидов**

*А.И. Проходцов<sup>1,2</sup>, А.А. Невзоров<sup>2</sup>, В.В. Ковалюк<sup>2</sup>, П.И. Лазаренко<sup>1</sup>  
Е.П. Кицюк<sup>3</sup>, А.Д. Голиков<sup>1</sup>, С.А. Козюхин<sup>4</sup>, Г.Н. Гольцман<sup>5</sup>*

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Лаборатория фотонных газовых сенсоров, МИСИС, Москва, Россия*

*<sup>3</sup>НПК "Технологический центр", Зеленоград, Россия*

*<sup>4</sup>Институт общей и неорганической химии  
им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия*

*<sup>5</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа  
экономики», Москва, Россия*

*e-mail: alexabrest@ya.ru*

Материалы с фазовым переходом (анг. Phase change materials, PCM), активно используются для создания различных фотонных интегральных схем. За последние годы было показано применение PCM в таких приложениях, как полностью оптические импульсные нейросетевые сети с возможностью самообучения [1], оптическая память [2] и многие другие. В качестве одних из наиболее часто используемых материалов фазовой памяти на основе халькогенидных полупроводников являются материалы системы Ge-Sb-Te, в частности соединения квазибинарного разреза GeTe-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. Данные материалы демонстрируют высокую скорость фазового перехода в кристаллическое состояние и низкую температуру стеклования и плавления (менее 900 K) [3]. Однако, несмотря на стабильность их состояний при комнатной температуре и простоту управления этими состояниями, достичь стабильного и обратимого переключения фазового состояния в данных материалах достаточно сложно. Для этого требуется проведение оптимизации энергии, длительности и формы управляющих оптических импульсов.

В данной работе мы исследуем влияние различных оптических управляющих импульсов на тонкую пленку GST147, расположенную на одномодовом волноводе из нитрида кремния.

Время-разрешенные измерения позволяют исследовать динамику процесса переключения РСМ тонких пленок. В ходе проведенных исследований были определены зависимости времени изменения фазового состояния материала от энергии и длительности импульса накачки для процессов аморфизации и кристаллизации тонких пленок РСМ.

Выявлено, что в начале оптической накачки наблюдается падение пропускания одномодового волновода с нанесенной пленкой РСМ. Данное снижение пропускания связано с нагревом РСМ пленки во время воздействия лазерного импульса. После окончания воздействия управляющего импульса наблюдается хорошо различимая в эксперименте остывание системы, сопровождаемая фазовым переходом.

Разработанная нами экспериментальная схема позволяет оценивать времена переключения интегральных устройств с пленками РСМ между различными фазовыми состояниями, характеризующимися различным уровнем пропускания. Проведенные исследования позволяют определять оптимальные, по критерию скорости перестройки и контраста пропускания, параметры оптических импульсов для управления состояниями интегральной системы.

*Данная работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (№ 23-79-00056)*

[1] J. Feldmann., N. Youngblood., C. D. Wright, H. Bhaskaran., W. H. P. Pernice, *Nature*, 569, 7755, 208-214 (2019).

[2] Z. Cheng, C. Ríos, N. Youngblood, C. D. Wright, H. Bhaskaran., W. H. P, H. Bhaskaran, *Adv. Mater.*, 30, 1802435 (2018).

[3] S.A. Kozyukhin, P.I. Lazarenko, A.I. Popov, I.L. Eremenko, *Russ. Chem. Rev.*, 91, RCR5033(2022).



**Влияние термоциклирования на параметры кремниевых  
гетеропереходных солнечных элементов**

*К.К. Прудченко<sup>1</sup>, В.С. Калиновский<sup>1</sup>, Е.И. Теруков<sup>1,2</sup>, Е.В. Контрош<sup>1</sup>,  
И.А. Толкачев<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,  
Санкт-Петербург, Россия*

*<sup>2</sup>ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике»,  
Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: prudchenkokk@mail.ioffe.ru*

Усовершенствование технологии изготовления позволяет тонкоплёночным гетеропереходным кремниевым солнечным элементам (SHJ СЭ) достойно конкурировать с традиционными космическими кремниевыми СЭ [1]. Показано, что SHJ СЭ обладают хорошей радиационной стойкостью [2-3]. В работе проведены исследования влияния термоциклирования на параметры и характеристики SHJ СЭ площадью 1 см<sup>2</sup> без пассивации боковых поверхностей после резки. Облучённые и необлучённые 1 МэВ электронами образцы шести типов структур SHJ СЭ (**A-F**): *n*- $\alpha$ -Si:H/*c-p*(B)/*p*- $\alpha$ -Si:H, (**A**); *n*- $\mu$ c-Si:H/*c-p*(B)/*p*- $\alpha$ -Si:H, (**B**); *n*- $\alpha$ -Si:H/*c-p*(Ga)/*p*- $\alpha$ -Si:H, (**C**); *n*- $\mu$ c-Si:H/*c-p*(Ga)/*p*- $\alpha$ -Si:H, (**D**); *n*- $\alpha$ -Si:H/*c-n*(P)/*p*- $\alpha$ -Si:H, (**E**); *n*- $\mu$ c-Si:H/*c-n*(P)/*p*- $\alpha$ -Si:H, (**F**); были изготовлены согласно технологии [4]. Описание структур и условий радиационного облучения приведены в работе [2]. Термоциклирование проводилось в климатической камере теплового удара «Espec TSE-11-A» в диапазоне температур от -60°C до 100°C. Световые вольт-амперные характеристики (ВАХ) СЭ до и после термоциклирования измерялись на имитаторе солнечного излучения, (AM0, 1367 Вт/м<sup>2</sup>, T=300K).

После термоциклирования SHJ СЭ снижение тока короткого замыкания ( $I_{кз}$ ) и КПД для необлученных образцов структур *A-F* составило в среднем 6%, а для облученных структур *A-D* - в среднем  $I_{кз}$  -8% и КПД - 7% (при  $I_{кз} \approx (35 - 40)$  мА и КПД  $\approx (12 - 13,5)$  % до и после термоциклирования), (рис.1). Для деградировавших структур *E, F* *n*-типа (*c*-Si), облучение которых флюенсом  $F_e = 1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> стало критичным, наоборот, наблюдается подъем  $I_{кз}$  в среднем на 7%, а КПД в среднем на 17% (при

$I_{кз} < 0,5$  мА и КПД < 1% до и после термоциклирования). Возможной причиной роста данных параметров является отжиг радиационных дефектов в образцах при термоциклировании. Таким образом, экспериментально показана определённая устойчивость SHJ СЭ со структурами *p*-типа (*c*-Si) к термоциклированию и возможность их использования в солнечных батареях для низкоорбитальных космических аппаратов. Окончательная оценка стойкости структур на *n*-типе (*c*-Si) к термоциклированию требует более детальных и дополнительных исследований.

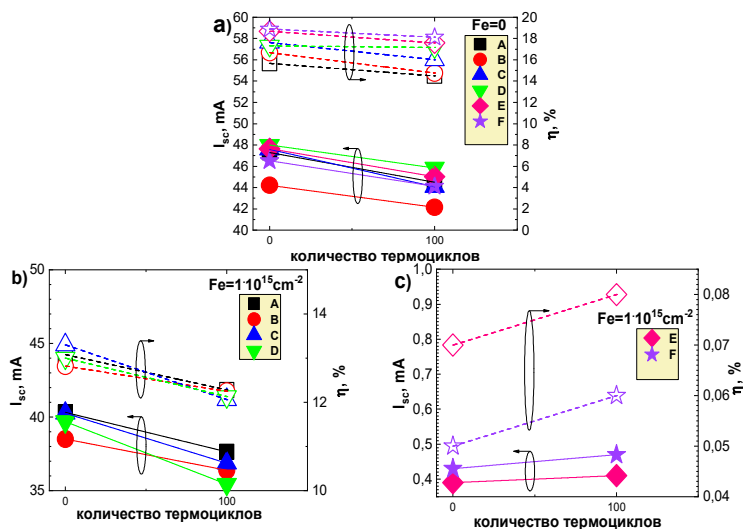


Рис.1. Влияние термоциклирования на ток короткого замыкания и КПД SHJ СЭ структур *A-F* [2]: а) – при  $F_e=0$ , б) – при  $F_e=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  *A-D* (*p*-типа *c*-Si), в) – при  $F_e=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  *E,F* (*n*-типа *c*-Si). Линиями выделены линейные аппроксимации экспериментальных данных

[1] M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki et al., *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2377–2380 (2019).

[2] V.S. Kalinovskii, E.I. Terukov, K.K. Prudchenko et al., *Tech. Phys. Lett.*, 49, 8, 55-57 (2023).

[3] Sh.B. Utamuradova, E.I. Terukov, O.K. Ataboev et. al., *Nucl. Instr. Meth. Phys.*, 560, 165630 (2025).

[4] A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov, *Springer Series in Optical Sciences*, 140, 113-32 (2020).

**Особенности локальной модификации пленок оксида графена  
лазерным излучением с импульсом микросекундной длины**

*К.А. Раянова<sup>1</sup>, С.И. Бабенко<sup>1</sup>, А.С. Брылева<sup>1</sup>, К.В. Канаев<sup>1</sup>,  
О.А. Кудрявцев<sup>1</sup>, Р.Р. Нугаматуллина<sup>1</sup>, А.Д. Судакова<sup>1</sup>, А.В. Щегольков<sup>1</sup>,  
И.И. Бобринецкий<sup>2</sup>, И.А. Комаров<sup>1,3</sup>*

*<sup>1</sup>Московский политехнический университет, Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Московский физико-технический университет, Долгопрудный, Россия*

*<sup>3</sup>ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия*

*e-mail: master\_kom@mail.ru*

Гибкая и органическая электроника становятся все более востребованной областью науки и техники в связи с широкими возможностями по интеграции в новые носимые электронные устройства, широкими возможностями по созданию новых сенсоров, а также радиационно-стойких устройств для освоения космоса. Одним из перспективных классов материалов, применяемых в гибкой и органической электронике, являются производные графена, в частности оксид графена (ОГ) [1] и восстановленный оксид графена (ВОГ) [2].

Для создания электронных устройств на основе производных графена требуется метод, позволяющий управлять электрическими свойствами формируемых плёнок за счет изменения количества функциональных групп на их поверхности [3], что в свою очередь ведет к изменению ширины запрещенной зоны в данных материалах. Существуют различные методы восстановления ОГ, однако наиболее многообещающим для локальной модификации является применение лазеров.

В настоящем исследовании использовался лазер с длиной волны 405 нм. Пленка ОГ на поверхности ПЭТ подложек формировалась методом спин-коатинга (100 мкЛ, 1000 об/мин). В зависимости от значения флюенса (от 15 до 60 мДж/см<sup>2</sup>) лазерного излучения наблюдаются отличия в ИК спектрах (рис.1а) и КР (рис.1б). В частности, следует отметить, что при малых значениях флюенса порядка 25 мДж/см<sup>2</sup> наблюдается присутствие пика ~1730 см<sup>-1</sup> на фурье-ИК спектрах, что говорит о присутствии карбоксильных и карбонильных функциональных групп, что важно для задач сенсорики, т.к. позволяет связывать с ВОГ различные малые органические и биомолекулы. При этом в КР спектре наблю-

дается размытый 2D пик, содержащий различные овертоны, что говорит о малой структурированности пленки.

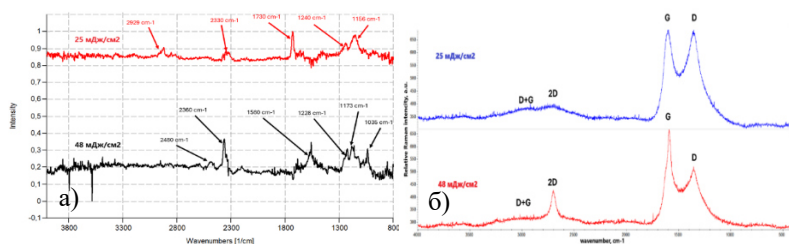


Рис.1. Спектры Фурье-ИК (а) и КР (б) для пленок ОГ, восстановленных при параметрах флюенса 25 мДж/см<sup>2</sup> и 48 мДж/см<sup>2</sup>

При увеличении флюенса наблюдается увеличение структурированности пленки, что следует из увеличения интенсивности 2D пика ( $\sim 2700$  см<sup>-1</sup>), а также понижения сопротивления пленки (рис.2), при этом максимум достигается при флюенсе порядка  $\sim 48$  мДж/см<sup>2</sup>. При флюенсе более 60 мДж/см<sup>2</sup> наблюдается существенная деформация пленки ОГ, что свидетельствует о перегреве пленки. Таким образом показано, что применение относительно недорогого лазера с микросекундной длиной импульса тем не менее позволяет производить управление свойствами пленки оксида графена и обеспечивать как слабое восстановление, что, например, может быть использовано в сенсорной технике или при необходимости дополнительной функционализации пленки восстановленного ОГ различными молекулами, так более сильное восстановление с формированием существенно более проводящих областей ВОГ, что в дальнейшем можно использовать для создания межсоединений и контактных областей в различных устройствах.

[1] Y. Chendake et al Graphene: a promising material for flexible electronic devices In: S.K. Patel, S.A. Taya, S. Das, K. Vasu Babu (eds) Recent advances in graphene nanophotonics advanced structured materials Springer, Cham, 83–118 (2023).

[2] H. Chen, F. Zhuo, J. Zhou, et al Advances in graphenebased flexible and wearable strain sensors Chem. Eng. J. 464 142576 (2023).

[3] P. Das, S. Ibrahim, K. Chakraborty, S. Ghosh, T. Pal Stepwise reduction of graphene oxide and studies on defect-controlled physical properties Scientific Reports 14 294 (2024).

**Влияние лазерного облучения на рельеф и структуру пленок  
GST225**

*Н.В. Рыбина<sup>1</sup>, А.В. Колчин<sup>2</sup>, Н.Б. Рыбин<sup>1</sup>, М.П. Смаев<sup>3</sup>, И.А. Будаговский<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет  
им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия*

*<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии им Н.С. Курнакова РАН,  
Москва, Россия*

*<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

*e-mail: pgnv@mail.ru*

В настоящее время лазерное излучение играет ключевую роль в управлении фазовыми переходами халькогенидных стеклообразных полупроводников, в частности соединений Ge-Sb-Te, перспективных для применения в устройствах хранения данных и фотоники [1]. Воздействие лазерными импульсами в определенных режимах на аморфные пленки Ge-Sb-Te приводит как к объемной, так и поверхностной кристаллизации. При этом доля кристалличности в зависимости от использованных режимов облучения может быть разной, что актуально для создания многоуровневых энергонезависимых элементов в оптических устройствах. Поверхностная кристаллизация фазопеременных материалов сопровождается заметным изменением морфологии поверхности. Поэтому для изучения влияния лазерного облучения на рельеф пленок Ge-Sb-Te целесообразно применять методы анализа информационно-корреляционных характеристик: средней взаимной информации (СВИ) и двумерного флуктуационного анализа с исключенным трендом (Detrended Fluctuation Analysis, 2D DFA) [2]. В данной работе исследовано влияние лазерного облучения на информационно-корреляционные характеристики поверхности и степень кристалличности пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST225).

Пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  облучались непрерывным лазером (длина волны 532 нм [3]) при различных режимах: варьировались тип пучка (Эрмит-Гауссова мода, Лагерр-Гауссова мода) и мощность излучения (от 10 до 100 мВт). Рельеф поверхности пленок исследовался с помощью атомно-силового-микроскопа «Solver Pro», после чего изображения поверхно-

сти анализировали методами СВИ и 2D DFA. Степень кристалличности определялась по расчету оптического контраста. С целью сопоставления результатов, данный параметр параллельно был определен путем численного анализа оптических изображений, полученных с помощью рамановского микроскопа Sol Instruments Confotec NR500.

Для 1 группы образцов (Эрмит-Гауссова мода) наблюдалось повышение степени кристалличности и упорядоченности структуры с ростом мощности лазерного излучения. Для 2 группы образцов (Лагерр-Гауссова мода) графики зависимости кристалличности и СВИ от мощности лазерного излучения имели максимум. Максимальная кристалличность получилась при значении мощности 60 мВт, а максимальная СВИ – при 70 мВт. При больших и меньших мощностях как кристалличность, так и СВИ понижаются. Зависимость максимальной взаимной информации (МВИ) от мощности лазерного излучения имела минимум. При малых и больших мощностях лазерного излучения МВИ высокая, что характеризуется более развитым рельефом поверхности. При значениях мощности 50-60 мВт МВИ понижается, что выражается в более сглаженном рельефе. Таким образом, выявлены корреляции между топографическими и оптическими свойствами пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . Модификация халькогенидных стеклообразных пленок лазерным излучением приводит к согласованному изменению морфологии поверхности и структуры материала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-79-10137 (<https://rscf.ru/en/project/24-79-10137/>) с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ. Оптические изображения были получены с помощью оборудования Центра коллективного пользования физическими методами исследования веществ и материалов ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН.*

[1] S.V. Zabotnov, P.K. Kashkarov, A.V. Kolobov, S.A. Kozyukhin, *Nanobiotechnology Reports* 18(6), 829–841 (2024).

[2] A.V. Alpatov, S.P. Vikhrov, N.V. Vishnyakov S.M. Mursalov, N.B. Rybin, N.V. Rybina, *Semiconductors* 50, 22–28 (2016).

[3] M.P. Smayev, P.A. Smirnov, I.A. Budagovsky, M.E. Fedyanina, V.B. Glukhenkaya, A.V. Romashkin, P.I. Lazarenko, S.A. Kozyukhin, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 633, 122952 (2024).

**Влияние легирования алюминием на оптические свойства  
моноклинной фазы диоксида ванадия**

*А.А. Сафонова<sup>1</sup>, П.С. Провоторов<sup>1</sup>, А.А. Кононов<sup>1</sup>,  
А.В. Ильинский<sup>2</sup>, В.А. Климов<sup>2</sup>, Е.Б. Шадрин<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>РГПУ им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия*

*<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: p.provotorov95@yandex.ru*

Диоксид ванадия ( $\text{VO}_2$ ) привлекает особое внимание исследователей как активный материал для оптоэлектронных устройств [1]. Его уникальность обусловлена сильными корреляционными взаимодействиями d-электронов, на которые в значительной степени могут оказывать влияние примеси и дефекты. В работе исследовались тонкие пленки  $\text{VO}_2$  и пленки, легированные алюминием, которые были получены методом лазерной абляции в оксидной среде на подложке из слюды. Спектральная зависимость коэффициентов пропускания была получена на однолучевом спектрофотометре СФ-2000 в видимом диапазоне длин волн от 300 до 1000 нм при комнатной температуре.

Выполнен комплексный расчёт оптических переходов. Показано, что с увеличением количества примеси алюминия с 0.5 до 3 % величина энергии оптических переходов уменьшается. Уменьшение энергии оптических переходов в моноклинной фазе  $\text{VO}_2$  при легировании алюминием связано с модификацией электронной структуры материала за счет введения дополнительных энергетических уровней в запрещенной зоне, что облегчает межзонные переходы. Согласно особенностям V-O - октаэдра, диктуемыми методом молекулярных орбиталей, ион  $\text{Al}^{3+}$ , замещая ион  $\text{V}^{4+}$  в центре основания кислородного октаэдра, искажает решётку так, что происходит сужение запрещённой зоны  $\text{VO}_2$ : Al вопреки большinstву других вариантов легирования

*Исследование выполнено за счет внутреннего гранта РГПУ им. А.И. Герцена (проект № 43-ВГ).*

*[1] A. Gavini, C.C.Y. Kwan, Phys. Rev. B, 3, 3138–3143 (1972).*

**Формирование поликристаллических пленок двойного галогенидного перовскита и их электрические свойства**

*И.П. Саяров<sup>1</sup>, А. Dalal<sup>2</sup>, А.Р. Тамеев<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина  
Российской академии наук, Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*

*e-mail: sayaravir@phycha.ac.ru*

Металлогалогенидные перовскиты рассматриваются как перспективные материалы для оптоэлектронных устройств благодаря таким достоинствам как: возможность настройки ширины запрещенной зоны, высокий коэффициент поглощения света, высокое значение длины диффузии и подвижности носителей заряда, а также легкость получения их тонких пленок. Основным препятствием для широкого применения перовскитных материалов является их нестабильность в условиях окружающей среды. Однако бессвинцовые двойные галогенидные перовскиты лишены данного недостатка. Одним из перспективных представителей этого класса материалов является  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ , который к тому же является экологически чистой альтернативой, так как свинец в нем замещен менее токсичными одно- и трехвалентными катионами [1].

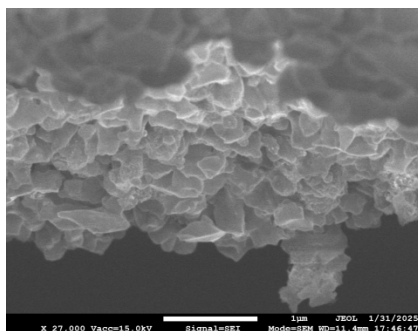
Целью работы являлось формирование тонких поликристаллических пленок двойного галогенидного перовскита и исследование их структурных, оптических и электрических свойств.

Формирования тонких пленок  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  выполняли как центрифугированием подложки с нанесением растворов прекурсоров, так последовательным термическим напылением прекурсоров в вакууме. Определены оптимальные режимы нанесения пленок перовскита. Для модификации свойств материала проведено легирование двойного галогенидного перовскита йодом. В полученном перовските  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_{6-x}\text{I}_x$ , частичное замещение ионов Br уменьшает ширину запрещенной зоны.

Структурные исследования полученных пленок были выполнены методом рентгеновской дифракции. Рентгенограммы подтверждают формирование необходимых структур с высокой степенью кристалличес-



ности и фазовой чистоты. На рисунке представлено СЭМ-изображение поликристаллической пленки двойного галогенидного перовскита  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ . Анализ изображения позволяет определить размеры кристаллических зерен, которые лежат в пределах от 100 нм до 300 нм.



Фотография среза пленки  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ , сделанная с помощью электронного сканирующего микроскопа

Подвижность носителей заряда, определенная на основании измерений переходных инжекционных токов, ограниченного пространственным зарядом (ПИ-ТОПЗ), составляет не менее  $0.3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Данный метод измерения был впервые применен для исследования пленок перовскита  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ .

Полученные результаты расширяют фундаментальные знания о механизме переноса носителей заряда в двойных перовскитах, представляют практическую ценность, обеспечивая основу для разработки тонкопленочных перовскитных электрооптических устройств.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №23-19-00884.*

*[1] Biswas I., Dey A., Dalal A., Saha S., Nunzi J-M., Mondal A. Stable, self-biased  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  thin-film based photodetector by three-step vapor-deposition. J. Alloys Compd. 2024, 976, 17290.*

**Влияние параметров синтеза на свойства алмазных пленок,  
выращенных методом MW PECVD на полупроводниковых  
и диэлектрических подложках**

*В.В. Сень, Ю.В. Ануфриев, Г.Д. Дюдьбин, А.А. Аниканов*

*Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия*

*e-mail: kb1nic@mail.ru*

В последние десятилетия в мире ведется интенсивный поиск новых технологий и материалов для создания электронных полупроводниковых приборов и приборов интегральной фотоники. Одним из самых перспективных материалов для этих применений считается алмаз, который обладает целым рядом уникальных свойств и направлений применения в электронике, оптике и многих других областях и технологиях. Внедрение алмаза в современную электронику и оптику сдерживается рядом ключевых факторов [1].

Отсутствие высокоориентированных поли- и монокристаллических легированных и нелегированных пленок алмаза в виде пластин, пригодных для обработки групповым методом, применяющимся на различных этапах производства микроэлектронных устройств (фотолитография, плазмохимическое травление, напыление металлов и т. д.).

Решение имеющихся проблем требует поиска принципиально новых подходов к процессу получения алмаза соответствующего качества. Для этого необходимо понимание процессов, происходящих как в плазме, так и на поверхности подложки, в частности, процессов сопряжения формирующихся углеродных нанослоев. Несмотря на значительный прогресс в развитии технологии получения CVD алмаза, остается целый ряд вопросов о влиянии различных параметров плазмохимических процессов и особенностей технологических реакторов на зародышеобразование, скорость роста и качество алмазных пленок.

В рамках данной работы проводилась отработка технологических подходов по формированию центров нуклеации алмазных пленок с разной плотностью на поверхности полупроводниковых и диэлектрических подложек. Оценивалось влияние параметров технологического процесса на шероховатость и разброс по толщине получаемых пленок. Изучалось влияние добавления легирующих примесей во время синтеза

на электрофизические свойства алмазных пленок. На рис. 1 приведен пример поликристаллической алмазной пленки, полученной на кремниевой пластине диаметром 100 мм.

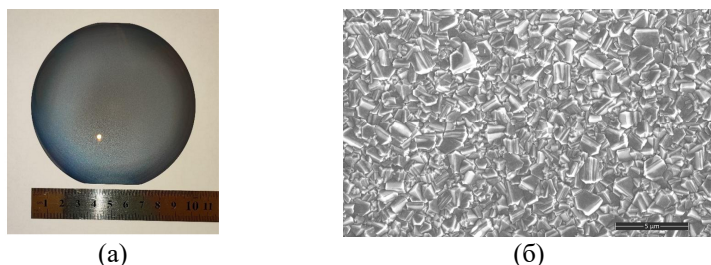


Рис. 1. Полученная поликристаллическая алмазная пленка: фотография пластины диаметром 100 мм с выращенной пленкой (а); СЭМ изображение поверхности алмазной пленки (б)

На Рис. 2 приведены сколы различных алмазных пленок, полученных с различной шероховатостью и размером кристаллитов.

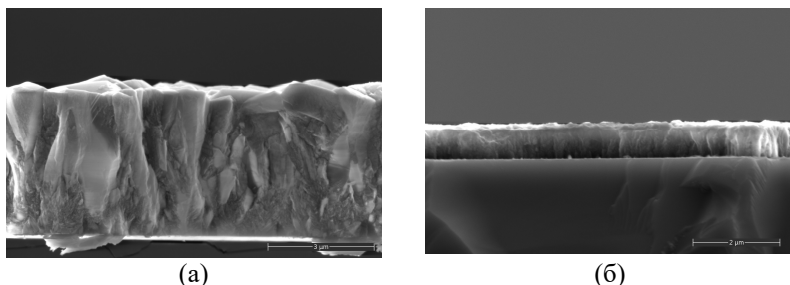


Рис.2. СЭМ изображение скола подложки с алмазной пленкой: поликристаллической (а); нанокристаллической (б)

Предложенная методика позволяет контролировать морфологию и разброс толщины алмазных пленок по пластине. Кроме того, в ходе работы были предложены методы формирования топологического рисунка в алмазной пленке с применением технологий микроэлектроники.

[1] N. Donato et al *Diamond power devices: state of the art, modelling, figures of merit and future perspective* // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 53 093001, 2020.

**Материалы с фазовой памятью в фотонике***И.С. Синева**École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Лозанна, Швейцария**e-mail: ivan.sinev@epfl.ch*

Первоначально разработанные для приложений электронной памяти материалы с фазовой памятью (МФП) долгое время ценились за их способность обратимо переключаться между аморфной и кристаллической фазами с различными электрическими свойствами. В последние годы эта функциональность все чаще используется в области фотоники, где большой контраст оптических свойств между фазами МФП и быстрое переключение между ними открывают новые возможности для реконфигурируемых оптических систем [1]. Это мотивирует не только поиск новых применений хорошо известным МФП, но и исследование новых материалов с акцентом на их оптические свойства.

В этой лекции будет представлен обзор последних достижений в области оптических материалов с фазовой памятью (О-МФП) [2]. Мы обсудим их потенциал для перспективных приложений, таких как полностью оптическая энергонезависимая память, перестраиваемые элементы интегральной оптики, цветные дисплеи и фотонные нейронные сети. Мы также рассмотрим особенности применения ОМФП в разных спектральных диапазонах и будущие направления их разработки и внедрения для нанофотонных систем следующего поколения.

[1] Wuttig, M., Bhaskaran, H. & Taubner, T. *Phase-change materials for non-volatile photonic applications. Nature Photon* **11**, 465–476 (2017).

[2] Huang, Y.S., Lee, C.Y., Takeuchi, I. and Ocampo, C.A.R., *Optical Phase Change Materials. Annual Review of Materials Research*, 55 (2025).

**Мета-оптические системы на основе GeSbTe***А.Д. Синельник**Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия**e-mail: Artem.sinelnik@metalab.ifmo.ru*

Развитие систем для управления свойствами света имеет решающее значение для развития современной прикладной фотоники, однако традиционные системы сталкиваются с проблемами миниатюризации, эффективности и возможности динамически изменять свои свойства. Одним из решений этих проблем может быть использование халькогенидных материалов для создания таких систем. В этой работе представлена гибридная платформа GeSbTe-перовскит, обеспечивающая многофункциональный контроль излучения в рамках одной компактной структуры.

Продemonстрировано четыре различных механизма управления излучением перовскита: обратимое изменение длины волны излучения перовскита, возбуждение фотолюминесценции перовскита с использованием генерации третьей гармоники от GST, формирование волнового фронта посредством фокусировки излучения и генерации вихрей. За счет использования обратимого фазового перехода GST удалось достичь динамического изменения и контроля над излучающими свойствами перовскита.

Синергия GST с перовскитом позволяет преодолевать ограничения статических метаповерхностей, предлагая новый подход к созданию сверхкомпактных, настраиваемых источников излучения для квантовой оптики, голографии и криптографии.

### Быстрое прототипирование фотонных интегральных схем на кремнии

*А.С. Смирнов, К.Н. Гарбузов, С.С. Косолобов, Д.С. Земцов, А.К. Земцова,  
А.И. Вергулес, К.Р. Тазиев, Д.М. Жигунов, И.А. Пишеничнюк, В.П. Драчев*

*Центр Инженерной Физики, АНОО ВО «Сколковский институт науки  
и технологий», Москва, Россия*

*e-mail: v.drachev@skoltech.ru*

Сравнение быстрого прототипирования на основе электронно-лучевой литографии с процессами пилотной линии глубокого УФ убеждает в необходимости развития сети быстрого прототипирования в небольших лабораториях или центрах [1].

Мы поделимся опытом создания на базе Лаборатории Плазмоники Сколтеха быстрого прототипирования фотонных интегральных устройств на основе электронно-лучевой литографии с последующей передачей технологии на фабрики, использующие линию глубокой УФ-литографии. Набор технологий включает разработку и расчет дизайна, изготовление с использованием электронной литографии, плазменного травления, вакуумного нанесения материалов, тестирование экспериментальных макетов в рамках одной лаборатории.

Обсудим разработанные компоненты фотонных интегральных схем (ФИС) и интегральных устройств [2]: планарный широкополосный (40 ГГц) электрооптический модулятор света на полевом эффекте возбуждения угловых плазмонов в гибридном волноводе; компактный анализатор сигналов волоконно-оптических датчиков; кремниевую дифракционную решетку ввода/вывода с рекордными параметрами для прямой решетки, позволяющей проводить изготовление за однократное травление; упорядоченные волноводные решетки; микрокольцевые резонаторы с термооптической перестройкой по длине волны 2 нм/мкс.

*[1] Chrostowski L. et al. Silicon Photonic Circuit Design Using Rapid Prototyping Foundry Process Design Kits//IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2019. - vol. 25. - no. 5. - P. 8201326.*

*[2] Косолобов С.С., Пишеничнюк И.А., Тазиев К.Р., Земцова А.К., Земцов Д.С., Смирнов А.С., Жигунов Д.М., Драчев В.П. Кремниевая интегральная фотоника//УФН. – 2024. – 194. – С. 1223–1239.*

**Исследование эмиссионных параметров прототипа нового  
низковольтного катода**

*С.П. Смирнова, Р.С. Смердов*

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: smrnv.svtlna@gmail.com*

В настоящее время полупроводниковые наноструктурированные материалы из кремния [1] и углерода [2] представляют большой интерес благодаря своим уникальным характеристикам. Так, одним из примечательных свойств наноструктурированных углеродных материалов является способность к автоэлектронной эмиссии, активируемой электрическими полями на несколько порядков ниже требуемых для плоских металлических и полупроводниковых катодов [3]. Это явление называется низковольтной полевой эмиссией, а материалы с низкой эффективной работой выхода электронов находят применение в таких областях, как зондовая диагностика поверхности (при изготовлении источников первичных электронов) [4], а также термоэмиссионное преобразование тепла в электрическую энергию (в качестве перспективных анодов [5]).

Работа посвящена исследованию эмиссионных характеристик прототипа низковольтного автоэмиссионного катода, структурно представляющего собой кремниевую матрицу с углеродным напылением [6]. Прототип катода исследовался с помощью оригинального энергетического спектрометра [7].

В ходе работы были получены вольт-амперные характеристики прототипа, осуществлена линеаризация вольт-амперной характеристики по методу Фаулера-Нордгейма, рассчитано значение эффективной работы выхода материала  $\phi_{\text{eff}} = 0,29$  эВ. Был экспериментально получен спектр энергии испускаемых электронов (рис. 1,а). Предполагается, что эмиссия происходит с одного из т. н. «квазиуровней Ферми», которые существуют в пределах массива потенциальных ям, расположенных внутри поверхности материала. Ширина на полувысоте отдельного пика, расположенного на 90,2 эВ (рис. 1,б) составляет приблизительно 0,17 эВ.

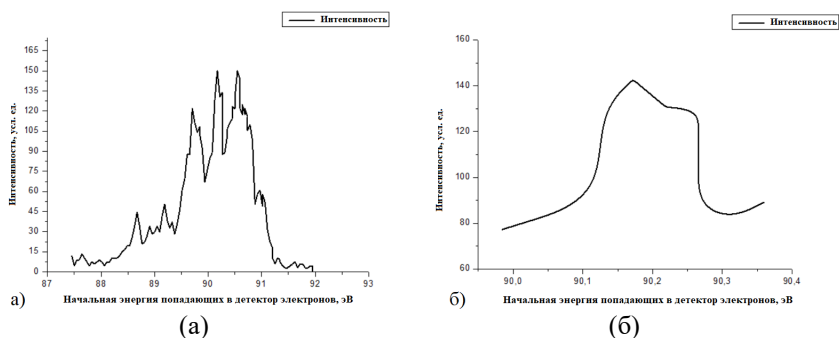


Рис.1. Экспериментальный энергетический спектр прототипа: спектр при тянущем напряжении 2290 В и температуре образца 170°C (а); отдельный пик на 90,2 эВ (б)

Полученные экспериментальные данные соответствуют проведенному нами ранее моделированию пика нулевых потерь (ZLP) [6]. Промежуточные результаты исследования позволяют утверждать, что с точки зрения формы функции распределения электронов по энергии исследуемый материал обладает перспективой применения с целью создания источников электронов для повышения разрешающей способности систем зондовой диагностики.

[1] V. Moshnikov et al., *Optics & Laser Technology*, 181, 111825 (2025).

[2] E. Popov et al., *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 38, 043203 (2020).

[3] Возняковский А. П. и др., *Письма в Журнал технической физики*, 45, 46-49 (2019).

[4] P. Lemeshko, Yu. Spivak, V. Moshnikov, *Nano- I Mikrosistemnaya Tehnika*, 24, 271–278 (2022).

[5] A. Grabovskiy A. Y. et al., *J. Appl. Physic.*, 132, 013302 (2022).

[6] S. Smirnova, R. Smerdov, S. Davydov et al., *Proceedings of the 2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, 360-363 (2024).

[7] Davydov S. N. et al., *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*, 253, 94-106 (2016).



**Закон Джоуля-Ленца для гиперболического уравнения  
теплопроводности в аморфном халькогенидном полупроводнике**

*Н.В Совтус, К.Д. Мынбаев*

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail:spnick93@mail.ru*

Исследование динамики фазовых переходов в халькогенидных полупроводниках (например, Ge-Sb-Te) критически важно для разработки энергоэффективных переключающих устройств и памяти нового поколения. Особый интерес представляет связь между локальным джоулевым нагревом, образованием шнура тока и колебательными процессами, описываемыми гиперболическим уравнением теплопроводности.

При подаче электрического напряжения на халькогенидный стеклообразный полупроводник (ХСП) в последнем происходит эффект переключения – резкое уменьшение сопротивления в определённой области полупроводника. Решение параболического стационарного уравнения теплопроводности показывало, что данный эффект сопровождается неравномерным перераспределением плотности тока, что можно трактовать как образование токового шнура, при этом в более нагретой области полупроводника происходит кристаллический переход из аморфного состояния в кристаллическое. В [1] экспериментально наблюдались колебания тока во времени, протекающего через образец  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ .

В выполненном исследовании авторами решено уравнение теплопроводности гиперболического типа для однородного пространственного распределения температуры (шнур представлен в виде равномерно нагреваемого цилиндра). Размеры шнура тока имеют масштаб порядка 1 мкм, что позволяет прибегнуть к использованию второй производной от температуры по времени из-за малости размеров токового цилиндра по сравнению с моделью бесконечной сплошной среды, в которой нет резких перепадов физических характеристик системы.

Уравнение теплопроводности:  $\tau \frac{d^2 T}{dt^2} + \frac{dT}{dt} = \frac{j(T)F}{\rho c}$ ,

где  $j(T)$  – плотность тока,  $\rho$  – плотность материала,  $c$  – удельная теплоемкость,  $F$  – электрическое поле,  $\tau$  – параметр релаксации.

Уравнение было решено приближенно аналитически и численно в пакете Matlab. Было показано, что при определённых условиях решением является функция колебаний температуры от времени, что показывает наличие колебаний тока в образце согласно закону Джоуля-Ленца. Произведён расчёт тепла, выделяющегося в образце радиусом 1 мкм.

Данная работа может быть полезна при проектировании приборов, стойких к перегреву. Колебания тока могут быть отнесены к паразитическим эффектам, вышеуказанное исследование позволяет пролить свет на то, как избежать данных процессов.

[1] С.А. Фефелов, Л.П. Казакова, Н.А. Богословский, К.Д. Цэндин, *Физика и техника полупроводников*, 52 (12), 1503-1506 (2018).

**Цифровая интерактивная киберфизическая модель установки  
магнетронного распыления**

*Т.Ю. Соколова, Б.Ю. Кулагин, Е.А. Барбаков, Д.Д. Бутманов*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Россия*

*e-mail: igd@miee.ru*

При изучении сложных технологических процессов производства изделий микроэлектроники недостаточно владения теоретическими основами этих процессов, необходим практический опыт использования сложного дорогостоящего оборудования. Важно учесть, что доступ к реальному технологическому и лабораторному оборудованию затруднен и связан с требованиями к чистоте производственных помещений, так называемых «чистых комнат», а также сохранности установок. В образовательной среде применение цифровых интерактивных киберфизических моделей открывает дополнительные возможности для студентов и инженеров, которые могут осваивать тонкости производства, экспериментируя с виртуальными моделями без риска повреждения дорогостоящего оборудования.

Разработанная киберфизическая модель установки магнетронного распыления объединяет визуальную и алгоритмическую составляющие и позволяет в режиме реального времени: познакомиться с устройством и функциональными элементами установки; проследить все этапы производственного процесса в демонстрационном режиме; вводить необходимые данные, зависящие от особенностей технологического процесса; получать результаты в наглядном графическом и числовом формате; получать сообщения и предупреждения об ошибках.

Данное программное обеспечение разработано и внедрено в учебный процесс специалистами Центра виртуального прототипирования Института цифрового дизайна НИУ МИЭТ совместно с Институтом перспективных материалов и технологий НИУ МИЭТ.

**Исследование корреляций состав-структура-оптические свойства  
в наночастицах Cs-Pb-Br**

*А.Г. Сон<sup>1,2</sup>, В.А. Гущина<sup>1</sup>, А.Р. Тамеев<sup>2</sup>, С.А. Козюхин<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН,  
г. Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Институт физической химии и электрохимии  
им. А. Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Россия*

*e-mail: sonsacha@gmail.com*

Современные исследования перовскитных наноматериалов системы Cs-Pb-Br выявили их уникальные оптико-электронные характеристики, определяющие перспективы применения в оптоэлектронике и фотовольтаике [1]. Экспериментальные данные демонстрируют принципиальные различия в люминесцентных свойствах этих соединений. Наночастицы (НЧ) CsPbBr<sub>3</sub> проявляют интенсивное зеленое свечение с прямым разрешенным переходом (505 → 510 нм), тогда как для CsPb<sub>2</sub>Br<sub>5</sub> характерна широкая полоса излучения (~600 нм) и значительный стоксов сдвиг (350 → 600 нм), свидетельствующий о непрямом переходе. НЧ Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub>, напротив, не проявляют люминесценции из-за доминирования безызлучательных процессов.

Комплексное исследование, включающее DFT-расчеты и спектроскопический анализ, подтвердило корреляцию между кристаллической структурой, составом и оптическими свойствами. Полученные результаты создают основу для направленного синтеза функциональных материалов с заданными характеристиками, открывая новые возможности в разработке перовскитных оптоэлектронных устройств. Особый практический интерес представляет возможность тонкой настройки люминесцентных свойств путем контролируемого изменения химического состава и структурных параметров наночастиц.

*Работа выполнена с помощью оборудования Центра коллективного пользования физическими методами исследования веществ и материалов ИОНХ им. Н.С.Курнакова РАН и при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-19-00884).*

*[1] W. Lai, Ch. Wu, X. Han, Chem. Eng. J., V. 451, P. 1, 138383 (2023).*

**Молекулярный дизайн и синтез органических красителей со структурой D-π-A и A-π-D-π-A для их применения в сенсibilизированных красителем солнечных элементах**

*А.С. Степарук<sup>1</sup>, Р.А. Иргашев<sup>1</sup>, Н.А. Казин<sup>1</sup>, Г.Л. Русинов<sup>1</sup>,  
Е.В. Текишина<sup>2</sup>, С.А. Козюхин<sup>2</sup>, В.В. Емец<sup>3</sup>, Н.М. Толкач<sup>4</sup>, П.И. Лазаренко<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>*Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия*

<sup>2</sup>*Институт общей и неорганической химии Н.С. Курнакова,  
Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина,  
Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Россия*

*e-mail: alexander.steparuk@gmail.com*

За последние три десятилетия технология сенсibilизированных красителем солнечных элементов привлекла большое внимание в связи с широкими перспективами ее применения для создания высокопроизводительных фотоэлектрических устройств [1].

В данной работе, представлен синтез красителей со структурой D-π-A и A-π-D-π-A, содержащих тиено[3,2-*b*]индол или индоло[3,2-*b*]карбазол в качестве электронодонорной части, олиготиофеновые звенья в качестве π-сопряженного мостика и цианоакриловую кислоту в качестве акцепторно-якорной группы соответственно.

Для полученных соединений были изучены их оптические, электрохимические и фотовольтаические свойства. Кроме того, для красителей, показавших лучшую эффективность преобразования солнечного света, были проведены дополнительные исследования, в том числе зависимость фотовольтаических свойств от температуры.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (тема № гос. рег. 124020500039-0).*

[1] *M. Kokkonen, P. Talebi, J. Zhou [et al.], Journal of Materials Chemistry A, 9, 10527-10545 (2021).*

**Галогенидные перовскиты для детектирования рентгеновского излучения***А.Р. Тамеев**Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН,  
Москва, Россия**e-mail: tameev@elchem.ac.ru*

Исследования галогенидных перовскитов показывают перспективность их применения в устройствах детектирования и обнаружения электромагнитного излучения, химических соединений, влажности, температуры. В докладе рассмотрены достижения в области современных приложений галогенидных перовскитов в детектировании рентгеновского излучения [1-4]. Высокий коэффициент поглощения рентгеновского излучения в перовскитах обусловлен наличием в них тяжелых атомов (Cs, Pb, Bi, Br, I). Основные достоинства перовскитных детекторов определяют такие параметры, как высокая чувствительность, низкий порог чувствительности, высокая подвижность и время жизни носителей заряда, которые превосходят аналогичные параметры коммерческих устройств на основе аморфного селена,  $\text{HgI}_2$ ,  $\text{CdTe}$ . В докладе обсуждаются электронные процессы в галогенидных перовскитах при рентгеновском облучении, пути оптимизации параметров (снижение темнового тока и увеличение сдвига носителей заряда) и повышения стабильности детекторных устройств.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-19-00884).*

[1] T. Yang, F. Li, R. Zheng, *ACS Appl. Electron. Mater.*, 1, 1348–1366 (2019).

[2] H. Bu, C. He, Y. Xu, L. Xing, X. Liu, S. Ren, S. Yi, L. Chen, H. Wu, G. Zhang, J. Zhao, J. Shi, *Adv. Electron. Mater.*, 8, 2101204 (2022).

[3] Y. Wu, J. Feng, Z. Yang, Y. Liu, S. Liu, *Adv. Sci.*, 10, 2205536 (2023).

[4] И.О. Симоненко, В.А. Кинев, Р.Г. Назмитдинов, Я.Б. Мартынов, А. Г. Сон, С. А. Козюхин, А. Р. Тамеев, *Росс. нанотехнол.*, 20, №2 (2025). (в печати)

**Технологическое оборудование для микрообработки материалов  
и интегральной фотоники**

*Д.А. Тарванен*

*ООО «Нордлэйз», Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: d.tarvanen@lenlasers.ru*

В докладе рассматриваются ключевые аспекты микрообработки материалов с использованием лазеров с ультракороткой длительностью импульса (в зависимости от режимов, длительности импульсов, длины волны излучения и др). Особое внимание уделено принципам построения лазерных комплексов и доступным технологическим решениям на мировом рынке, представленным партнерами компании.

Также в докладе обобщен практический опыт и разработки компании «Нордлэйз» в области обработки материалов сверхкороткими лазерными импульсами, включая: скрайбирование полупроводников, прецизионная обработка материалов (плавленного кварца, ниобата лития, синтетических алмазов и тд), модификация стёкол, селективное лазерное травление, лазерная очистка прозрачных материалов, имитация дестабилизирующих воздействий.

**Стеклообразные неорганические полупроводники с повышенной пластичностью***Ю.С. Тверьянович**Санкт-Петербургского государственного университета,  
Санкт-Петербург, Россия**e-mail: y.tveryanovich@spbu.ru*

Механические свойства являются одной из важнейших эксплуатационных характеристик стекол вообще и халькогенидных стекол (ХС) в частности. К механическим свойствам относится пластичность ( $\delta$ ), характеризующая способность материала к релаксации механических напряжений. Однако для стекол её численные значения в литературе не приводятся. В докладе рассматривается возможность применения для расчета  $\delta$  стекол уравнения Мильмана, использующего в качестве исходных данных экспериментальные значения микротвердости и скорости ультразвука. Этот метод удобен для стеклообразных материалов, так как для многих из них указанные свойства изучены и приведены в публикациях.

ХС образованы ковалентными связями, которые, в силу своих особенностей, обуславливают полупроводниковые свойства и низкую  $\delta$ . Для улучшения эксплуатационных характеристик ХС желательно увеличить их  $\delta$  при сохранении полупроводниковых свойств. Причем увеличение  $\delta$  не должно быть связано с падением температуры стеклования ( $T_g$ ). Поэтому речь идет не об уменьшении количества межатомных связей, приходящегося на один атом сетки стекла, а о замене направленных короткодействующих ковалентных связей на ненаправленные связи с более мягким потенциалом межатомного взаимодействия. Возможным вариантом решения этой задачи является формирование в сетке стекла помимо направленных ковалентных связей, ненаправленных металлофильных связей. К металлам, склонным к формированию металлофильных связей и, одновременно, способным входить в состав ХС в значительном количестве относятся серебро и медь. Многочисленные результаты исследования структуры ХС свидетельствуют о том, что при высокой концентрации халькогенидов сереб-



ра его атомы трехкратно взаимно координированы и расстояние между ними меньше удвоенного радиуса Ван-дер-Ваальса [1,2]. Это указывает, наряду с их малым эффективным зарядом, на формирование металлофильных связей. Квантовохимические расчеты, проведенные как для кристаллических халькогенидов серебра, так и для гипотетических молекулярных кластеров, моделирующих аморфную структуру, подтвердили формирование металлофильных взаимодействий Ag-Ag [3]. Экспериментальное изучение зависимости  $\delta$  ХС от содержания  $\text{Ag}_2\text{Se}$  показало её кратное возрастание вплоть до значения 0,7 [4]. Приводятся данные о возрастании  $T_g$  ХС при замене одновалентного Tl или двухвалентной Hg на Ag. Замена же As и Sb на Ag не меняет  $T_g$ . Это объясняется тем, что каждый атом Ag (при достаточной их концентрации в сетке стекла) помимо ковалентной связи с халькогеном формирует металлофильные связи [5]. Наблюдается рост способности к релаксации механических напряжений при увеличении содержания Ag в ХС. Для стекла с 40 мол.%  $\text{Ag}_2\text{Se}$ , при фиксированной деформации, до  $\frac{3}{4}$  приложенного исходно механического напряжения релаксирует со временем. За первые 20 минут напряжение уменьшается в два раза. Основываясь на анализе диаграмм  $\delta$ - $T_g$ , высказано предположение о возможности существования пластичных стекол при  $T < T_g$  [6]. Прямые измерения при 300 К стеклообразной пленки  $\text{Ag}_2\text{Se}$  по методу нагрузка-разгрузка показали, что  $\delta=0,9$ . Согласно [7] для стеклообразного  $\text{Ag}_2\text{Se}$   $T_g=510$  K.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект 24-23-00140.*

[1] E. Bychkov, D.L. Price, C.J. Benmore, A.C. Hannon, *Solid State Ionics*, 154–155, 349–359 (2002).

[2] A. Zeidler, P.S. Salmon, D.A.J. Whittaker, et al., *R. Soc. Open Sci.* 5:171401, (2018).

[3] R.A. Evarestov, A.I. Panin, Y.S. Tverjanovich, *Journal of Computational Chemistry*, 42, 4, 242–247 (2021).

[4] Y. S. Tveryanovich, T. R. Fazletdinov, A. S. Tverjanovich, et al., *Chem. Mater.*, 34, 6, 2743–2751, (2022).

[5] V.V. Tomaev, Yu.S. Tveryanovich, S.S. Lun'kov et al, *Russ. J. Electrochemistry*, 60, 1254–1261, (2024).

[6] Yu.S. Tver'yanovich, *Glass Phys. & Chem.*, 50, 327–329 (2024).

[7] M. Mitkova, Yu. Wang, P. Boolchand. *Phys. Rev. Letters.* 83, 3848–3851, (1999).

**Стабильность солнечных элементов, сенсibilизированных красителями на основе тиено[3,2-*b*]индола, и их модификация**

*Е.В. Текшина<sup>1</sup>, А.С. Степарук<sup>2</sup>, Д.А. Крупанова<sup>1</sup>, Д.В. Шулейко<sup>3</sup>  
В.В. Емец<sup>4</sup>, С.А. Козюхин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова, ИОНХ  
РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт Органического синтеза им. И. Я. Постовского, ИОС УрО  
РАН, Екатеринбург, Россия*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
МГУ, Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина,  
ИФХЭ РАН, Москва, Россия*

*e-mail: ekaterina3141@mail.ru*

Сенсibilизированные красителем солнечные элементы (СКСЭ) представляют отдельный класс устройств, вызывающих особый интерес благодаря низкой стоимости исходных компонентов, способности работать при низкой или искусственной освещенности [1]. Возможность получать полупрозрачные и гибкие элементы позволяет СКСЭ быть применимыми в качестве интерьерно-интегрированных модулей [2] и портативной носимой электроники [3].

В рамках работы были созданы устройства фотопреобразователей с новыми безметалльными красителями на основе тиено[3,2-*b*]индола, исследовалось влияние состава красителя на эффективность устройств. Была исследована климатическая стабильность СКСЭ в диапазоне температур -60 до +55 °С при освещении и в темноте.

Показано, что модификация СКСЭ наночастицами кремния размерами десятки и сотни нм увеличивает эффективность фотопреобразования устройств на 5 и на 13 % относительно первоначального значения, соответственно.

[1] *M. Yahya, A. Bouziani, C. Ocak, Z. Seferoğlu, M. Sillanpää, Dyes and Pigments, V192 109227 (2021).*

[2] J. Barichello, P. Mariani, L. Vesce, D. Spadaro, I. Citro, F. Matteocci, A. Bartolotta, A. Di Carlo, G. Calogero, *J. Mater. Chem. C*, 12, 2317-2349, (2024).

[3] Ji Yeon Hyun, Bo Rang Park, Nam Hyeon Kim, Jin Woo Moon, *Solar Energy*, 244, 279-288, (2022).

**Фазопеременные материалы для создания термоэлектрических генераторов**

*Д.Ю. Терехов, Л.А. Эль-Хадж, И.А. Волощук, Ю.В. Русакевич*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Россия*

*e-mail: gsm.ads@yandex.ru*

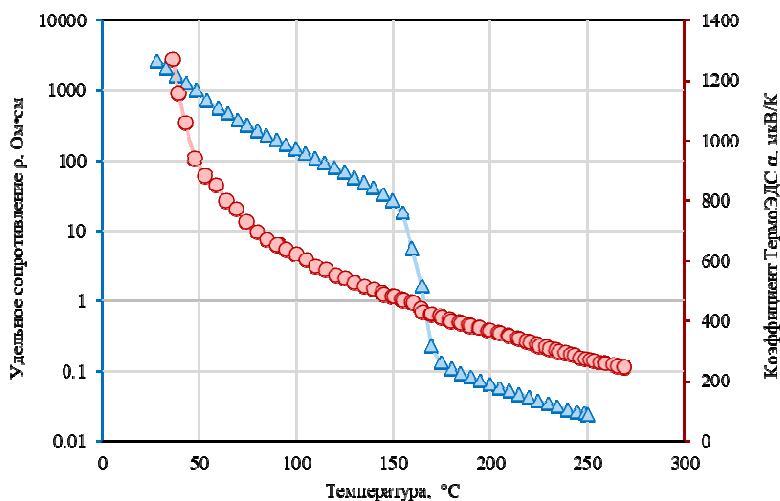
Тонкоплёночные термоэлектрические генераторы имеют перспективы применения в носимой электронике для прямого преобразования низкопотенциальной тепловой энергии человеческого тела в электрическую. Однако низкая эффективность тонких плёнок классических низкотемпературных термоэлектрических материалов, в первую очередь высокое удельное сопротивление и низкий коэффициент термоЭДС, сдерживает их широкое внедрение. Одним из методов решения данных проблем является поиск новых, более эффективных материалов и целенаправленная оптимизация их свойств. Так, халькогенидные стеклообразные полупроводники системы Ge-Sb-Te, в частности материалы р-типа проводимости, лежащие на линии квазибинарного разреза GeTe–Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, обладают рядом уникальных свойств и нашли широкое коммерческое применение. Данные материалы также имеют перспективы применения в качестве низкотемпературных термоэлектрических материалов благодаря возможности широкой регулировки термоэлектрических и электрофизических свойств при изменении фазового состояния.

В связи с этим целью данной работы является отработка технологии формирования тонкоплёночных термоэлектрических ветвей р-типа вакуумными методами осаждения материалов системы GeTe–Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> и исследование температурных зависимостей электрофизических и термоэлектрических свойств получаемых ветвей.

Экспериментальные образцы изготавливались на полированных ситалловых подложках марки СТ50. На подложке формировались электроды W с подслоем TiN толщиной 100 нм. Поверх электродов методом магнетронного распыления были сформированы плёнки Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> толщиной 750 нм. Состав и структура плёнок исследовались методами Оже-спектроскопии, EDX и РФА. Исследования температурной зависимости термоЭДС и электропроводности проводились в изотермическом

режиме в диапазоне температур от комнатной до 250 °С с шагом нагрева 5 °С и временем выдержки 5 мин.

Результаты показали (на рисунке), что в диапазоне от комнатной температуры до 145 °С наблюдается плавное уменьшение коэффициента термоЭДС  $\alpha$  с 1000 мкВ/К до 590 мкВ/К. В диапазоне 145–147 °С наблюдается быстрое падение  $\alpha$  с 590 мкВ/К до 526 мкВ/К и сопротивления плёнки  $R$  со  $10^5$  Ом до  $10^4$  Ом. В диапазоне температур от 147 °С до 160 °С наблюдается незначительное изменение  $\alpha$  и быстрое падение  $R$  со  $10^4$  Ом до  $10^3$  Ом. При дальнейшем росте температуры до 250 °С наблюдается незначительное изменение  $R$  и плавное уменьшение  $\alpha$  с 526 мкВ/К до 260 мкВ/К.



Температурная зависимость коэффициента термоЭДС и удельного сопротивления тонкой пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

Проведенные расчеты фактора мощности на основе полученных результатов показали, что при температуре отжига 260 °С наблюдается ярко выраженный пик, с максимальным значением фактора мощности  $1.3 \cdot 10^{-4}$  мВт/м·К<sup>2</sup>. Таким образом, данный материал является перспективным для применения в тонкоплёночных ТЭГ.

*Исследование выполнено в лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» (Соглашение 075032025266/1 от 25.03.2025 г., FSMR-2025-0002).*

**Разработка промышленной технологии дешевых и эффективных солнечных батарей для космических аппаратов ближнего Космоса**

*Е.И. Теруков<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>НТЦ «Тонкопленочных технологий в энергетике»,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: E.Terukov@hevelsolar.com*

Обеспечение надежного доступа к высокоскоростному широкополосному интернету из любой точки страны можно осуществить за счет перехода к глобальной низкоорбитальной спутниковой связи (НСС). Космические аппараты НСС обеспечиваются электрической энергией солнечных батарей (СБ). Разработка космических солнечных элементов (СЭ) на кремнии была прекращена в 1990-х годах, и все внимание переключилось на СЭ  $\text{AзВ}_5$ . Хотя такие элементы более эффективны и устойчивы к суровым космическим условиям, они крайне дороги. Поэтому при массовом производстве спутников кремниевые СЭ, особенно для НСС, снова становятся привлекательными благодаря их материально-технической доступности.

Важным преимуществом нашего решения является то, что мы работаем на кремниевых СЭ с гетеропереходом (heterojunction technology solar cells) — НЈТ СЭ. Эта технология была разработана и внедрена в России на ООО «Хевел», который производит солнечные элементы в промышленном масштабе. В лучших образцах НЈТ СЭ достигнут КПД более 26% ( $\text{AM1.5}$ ,  $1000\text{W/m}^2$ ) [1]. За счет использования низких температур роста пассивирующих слоев аморфного кремния НЈТ СЭ достигают более высоких значений напряжения холостого хода (до 750 mV) и меньших значений температурных коэффициентов ( $<0.3\%/^{\circ}\text{C}$ ), что является большим преимуществом перед другими технологиями кремниевых СЭ. Вторым по важности результатом является конструкция солнечной батареи. Мы отказались от классического варианта сборки СЭ для космической батареи, в котором для защиты лицевой и тыльной сторон СЭ от агрессивного воздействия факторов космического пространства применяют защитные покрытия. Фактиче-

ски, безальтернативным защитным покрытием лицевой (фотовосприимчивой) стороны СЭ служит оптическое радиационно-стойкое стекло, например, К-208 толщиной  $100 \div 150$  мкм, легированное церием. При формировании СБ, как правило, соединение СЭ в цепочки обеспечивается с помощью отдельных коммутационных шин из серебряной фольги, которые крепятся к лицевым и тыльным контактным площадкам двух и более СЭ методом точечной сварки. Крепление всей этой конструкции на каркас СБ является трудоемкой, ручной работой. Мы предлагаем заменить радиационно-стойкое стекло и космический герметик, используемый для герметизации СЭ, на запатентованный нами стеклокомпозит [2].

В нашем случае сборка солнечных элементов (минимодуль) осуществляется путем формирования стрингов СЭ заданного размера, сборки из стрингов минимодуля, который за счет ламинирования между двумя листами стеклокомпозита превращается в сборочный элемент СБ. Такой подход позволил нам перейти к возможности организации автоматизированной сборки панелей на основе не единичных СЭ, а минимодулей. Подчеркнем, что наш подход обеспечивает определенную гибкость СЭ в составе СБ, что до сих пор было крайне ограничено ввиду отсутствия гибких защитных покрытий (как прозрачных лицевых, так и тыльных).

В заключение подчеркнем, что высокоэффективные и недорогостоящие кремниевые СЭ способны конкурировать за применение в ближнем Космосе для использования в военном и коммерческом секторах. Все спутники подвержены радиационному повреждению СЭ, но, учитывая орбиту и срок их эксплуатации, гетероструктурные СЭ на кремнии и их герметизация в стеклокомпозит способны обеспечить серийное производство СБ для орбитальных спутниковых группировок.

[1] A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov, *Springer Series in Optical Sciences*, 140, 113-132 (2020) (монография).

[2] И.Ю. Дмитриев, А.В. Кочергин, М. Ю. Михайлов и др., Пат. 2813103 Российская Федерация, МПК H01L 31/048 H01L 31/18, заявл. 01.08.2023, опубл. 06.02.2024, Бюл. № 4, 2 с.

**Влияния температуры на эксплуатационные характеристики НТТ  
элементов в диапазоне 173 – 373 К**

*Е.И. Теруков<sup>1</sup>, Ш.Б. Утамурадова<sup>2</sup>, И.Е. Панайотти<sup>1</sup>,  
О.К. Атабоев<sup>2</sup>, О.П. Михайлов<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

*<sup>2</sup>НИИ физики полупроводников и микроэлектроники,  
Ташкент, Узбекистан*

*<sup>3</sup>Академический университет им. Ж.И. Алфорова,  
Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: eug.terukov@mail.ioffe.ru*

Создание надежных солнечных батарей на основе тонкопленочных гетероструктурных солнечных элементов, пригодных для работы в ближнем космосе, является актуальной задачей современной фотовольтаики. Целью данной работы является изучение температурных зависимостей выходных характеристик НТТ элементов в диапазоне 173 – 373 К, в условиях АМ0 (1367 Вт/м<sup>2</sup>).

В ходе исследования были протестированы НТТ элементы, созданные на основе кристаллических кремниевых подложек n-типа (рис. 1). В экспериментах были использованы образцы, полученные путем резки СЭ стандартной площади 243.36 см<sup>2</sup> на отдельные фрагменты. Вследствие этого из-за интенсивных рекомбинационных процессов на незащищенных торцевых поверхностях эффективное время жизни дырок  $\tau$  в подложках снизилось до 375 нс.

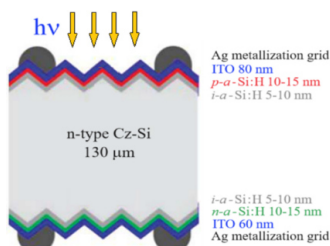


Рис.1. Схематический вид гетероструктуры НТТ элемента



Ток короткого замыкания практически линейно растет при увеличении температуры (рис. 2,*a*), что, вероятно объясняется смещением показателя поглощения света в коротковолновую область. Зависимость напряжения холостого хода от температуры имеет более сложный вид (рис. 2,*b*). Сравнительно медленное уменьшение  $U_{oc}(T)$  при низких температурах сменяется довольно резким его падением для  $T > 240$  К.

Интерпретации экспериментальной кривой  $U_{oc}(T)$  была проведена с помощью ранее разработанной модели токовых процессов в НТТ элементах [1, 2]. Данный метод позволяет рассчитывать ВАХ при произвольных уровнях инжекции носителей заряда и соотношениях между их длиной диффузии и толщиной подложки. При вычислении теоретической зависимости был учтен рост скоростей объемной и поверхностной рекомбинаций при нагревании опытных образцов НТТ элементов.

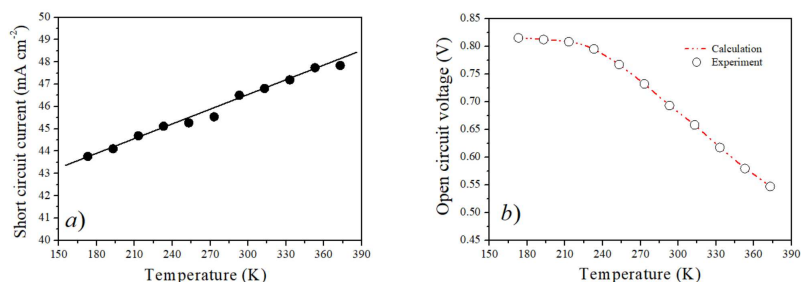


Рис. 2. Температурная зависимость тока короткого замыкания (*a*) и напряжения холостого хода (*b*) при AM0

[1] Sh. Utamuradova, E. Terukov, O. Ataboev, I. Panaiotti, R. Kabulov, A. Troshin, *Nuclear Inst. And Methods in Physics Research*, B, 560, 165630 (2025).

[2] A. Kochergin, I. Panaiotti, E. Terukov, O. Ataboev, *Applied Solar Energy*, 58, 330-333 (2022).

**Современное зондово-оптическое промышленное и научное  
оборудование для исследований аморфных  
и микрокристаллических полупроводниковых материалов**

*Н.М. Толкач, А.Н. Казанков, Д.А. Козодаев, Е.В. Кузнецов, М.А. Трусов*

*ООО «Активная Фотоника» (входит в группу компаний НТ-МДТ),  
Зеленоград, Москва, Россия*

*e-mail: n.tolkach@ntmdt-russia.com*

Для проведения современных испытаний на микроэлектронном производстве, экспериментальных исследований твердых, аморфных или микрокристаллических полупроводниковых материалов в научной лаборатории требуется оборудование с наноразмерным пространственным разрешением. Зачастую при измерениях также необходимо чтобы комплексно совмещалась зондовая, атомно-силовая, оптическая, лазерная и спектральная техника. Наша компания – ООО «Активная Фотоника» (входит в группу компаний НТ-МДТ) занимается производством такого оборудования и является одной из ведущих фирм в области оригинальных, высококачественных и высокотехнологичных научных разработок.

Наше оборудование базируется на модульной технологии «Интегра», что позволит университету или производству начать свою исследовательскую деятельность с базовой системы сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) или спектрометрической системы комбинационного рассеяния света (КРС). Впоследствии возможно дополнить СЗМ или КРС системы и создать большой многопользовательский исследовательский центр или объединить данное оборудование со смежными технологиями.

В ходе разработки модульных решений компания также создала профилометры, ультрамикротомы для нанотомографии и спектрометрические устройства, которые сочетают в себе возможности визуализации и химического анализа. Наши зондовые микроскопы оптимизированы для работы как в условиях контролируемой атмосферы, так и в условиях низкого вакуума, имеют приспособления и также оптимизиро-

ваны для работы в жидкостях, во внешнем вертикальном и горизонтальном магнитном поле.

В настоящее время мы разработали высокопрофессиональную зондово-спектральную измерительную систему нового поколения. Эта система спроектирована с учетом наиболее гибкой архитектуры и предоставляет множество возможностей для проведения самых сложных научных экспериментов. В системе реализован свободный оптический доступ к образцу с любых направлений – сверху, сбоку и снизу, а также возможность воздействовать на исследуемый объект излучением с заданной поляризацией, что особенно важно для КРС спектроскопии. Спектральная часть нашей измерительной системы разработана для удобной интеграции с атомно-силовым микроскопом. Это значительно упрощает работу в режиме зондового усиления спектрального сигнала (TERS). Сейчас функциональность системы расширяется в область реализации мульти-фотонных процессов, что позволяет регистрировать их с высоким временным разрешением, с построением гиперспектральных карт нелинейных зондово-оптических взаимодействий, с флуоресцентной визуализацией (FLIM).

Наша команда стремится к расширению и импортозамещению производства спектрального и зондового оборудования. Поэтому мы уже разработали и самостоятельно серийно производим твердотельные термостабилизированные лазеры в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах с мощностью от десятков до сотен мВт. Наши лазеры отличаются высокой стабильностью мощности, узкой шириной линии излучения, гауссовым профилем луча и высокой степенью подавления боковых мод лазера.

Мы предлагаем варианты лазеров с открытым лучом на выходе и с излучением, вводимым в оптическое волокно. Конструктивная особенность наших лазерных источников основана на интеграции специально подобранных лазерных диодов с отражающими объемными брэгговскими решетками. Целью такой интеграции является выделение и стабилизация одной лазерной моды в спектре излучения. Основной областью применения лазеров является КРС и фотолюминесцентная спектроскопия стационарных состояний. Мы активно используем наши лазеры в сочетании с зондово-оптическими и микроспектральными методами исследования. Эти лазеры можно использовать не только с нашим оборудованием, но и с устройствами сторонних производителей.

**Оптимизация спектральных зависимостей коэффициентов  
отражения и пропускания от степени кристалличности для  
многослойных структур на основе материалов системы Ge-Sb-Te**

*Н.М. Толкач<sup>1</sup>, Н.В. Вишняков<sup>2</sup>, Д.А. Козодаев<sup>1</sup>,  
В.Г. Литвинов<sup>2</sup>, А.О. Якубов<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>ООО «Активная Фотоника» (входит в группу компаний НТ-МДТ),  
Зеленоград, Москва, Россия*

*<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «РГРТУ», Рязань, Россия*

*<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия*

*e-mail: n.tolkach@ntmdt-russia.com*

В настоящее время вычисления и связь переходят на оптические интерфейсы [1]. Для расширения вычислительных мощностей мировых сетевых магистралей, центров обработки данных и систем с искусственным интеллектом все чаще используются активные оптические компоненты.

Материалы с фазовым переходом (PCM) на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников системы Ge-Sb-Te имеют огромный потенциал для разработки активных и пассивных оптических компонентов [2]. Эти материалы обладают обратимым, быстрым и низкоэнергетичным фазовым переходом из аморфного в кристаллическое состояние, которые имеют существенно различающиеся оптические свойства. Материалы системы Ge-Sb-Te уже являются основой для различных устройств, таких как энергонезависимая фазовая память (3D XPoint), перезаписываемые оптические диски (DVD-RW, Blu-ray). Кроме того, эти материалы могут быть использованы при создании оптических коммутаторов, активных волноводов, перестраиваемых светодетекторов, делителей и оптических покрытий, интерференционных зеркал, брегговских объемных решеток, полупроводниковых лазеров с перестраиваемой длиной волны, систем оптического ввода, оптических квантовых усилителей, эффективных полупроводниковых фотоприемников (включая ПЗС-матрицы), солнечных элементов, дифракционных оптических решеток.

В тоже время существуют некоторые проблемы при использовании этих материалов в качестве оптических компонентов. Это - воспроизво-

димось оптических параметров; метастабильность фазового состояния; оптические потери мощности. Для решения этих проблем и улучшения параметров пропускания и отражения предложено использовать многослойные чередующиеся структуры, содержащие активный слой (активные слои) на основе материалов системы Ge-Sb-Te с возможностью тонкой подстройки их оптических характеристик за счет варьирования степени кристалличности [3].

Степень кристалличности материала системы Ge-Sb-Te оценивалась с помощью приближения эффективной среды типа Брюггемана. Такое приближение представляет среду в виде аморфной матрицы с растущими сферическими кристаллитами. В соответствии с приближением, доля кристаллов в матрице (степень кристалличности):

$$C = (n^2 - n_a^2)(2n^2 + n_c^2) / (3n(n_c^2 - n_a^2)),$$

где  $n$ ,  $n_a$  и  $n_c$  - комплексный показатель преломления среды в текущем, аморфном и кристаллическом состояниях, соответственно.

В результате оптимизации спектральных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания от степени кристалличности слоев Ge-Sb-Te в многослойных структурах на их основе, для материалов  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ,  $\text{Ge}_1\text{Sb}_4\text{Te}_7$ ,  $(\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{97}\text{Bi}_3$  установлены оптимальные параметры толщины и количества слоев.

Также установлено, что многослойные структуры:

а)  $\text{SiO}_2 // 2 (111 \text{ нм Si} / 277 \text{ нм SiO}_2) / 111 \text{ нм Si} / 208.5 \text{ нм SiO}_2 / 3 \text{ нм Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5 / 300 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} / 2 (277 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si}) // \text{SiO}_2$ ;

б)  $\text{SiO}_2 // 111 \text{ нм Si} / 277 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} / 215 \text{ нм SiO}_2 / 2 \text{ нм (Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{97}\text{Bi}_3 / 300 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} / 277 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} // \text{SiO}_2$ ;

в)  $\text{SiO}_2 // 111 \text{ нм Si} / 277 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} / 100 \text{ нм SiO}_2 / 15 \text{ нм (Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5)_{97}\text{Bi}_3 / 225 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} / 277 \text{ нм SiO}_2 / 111 \text{ нм Si} // \text{SiO}_2$  эффективны для выполнения задач модуляции и переключения излучения на длине волны  $1550 \pm 1 \text{ нм}$  (а) и диапазона длин волн  $1550 \pm 5 \text{ нм}$  (б), для модуляции излучения с возможностью ее настройки на разные длины волн в диапазоне от  $1550 \pm 150 \text{ нм}$  (в).

[1] J. Knickerbocker, J.B. Heroux et al., *arXiv*, 2412.06570 (2024).

[2] W. Bogaerts, D. Perez et al., *Nature*, 586(7828), p. 207-216 (2020).

[3] N.M. Tolkach, N.V. Vishnyakov, V.G. Litvinov, A.O. Yakubov, E.S. Trofimov, A.A. Sherchenkov, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 15(3.3), p. 219-222 (2022).

# Фотопреобразователи на основе этиопорфирина дифторида кремния

В.В. Травкин<sup>1</sup>, М.Р. Якубов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова, Казань, Россия

e-mail: trav@ipmras.ru

Материалы на основе природных и синтетических металлопорфиринов за счёт фото- и термической устойчивости, интенсивного поглощения в видимом диапазоне и полупроводниковых свойств [1,2] представляют интерес как активные компоненты оптоэлектронных устройств [1,2]. Нами впервые получены прототипы высокоэффективных вакуумно-осажденных тонкопленочных фотопреобразователей с гетеропереходом, содержащим только непланарные порфириноиды: донор (Д) этиопорфиринат-I дифторида кремния  $\text{SiF}_2\text{-EtioP-I}$  и популярный нефуллереновый акцептор (А) гексахлоросубфталоцианин хлорида бора  $\text{Cl}_6\text{SubPc}$  (рис. 1).

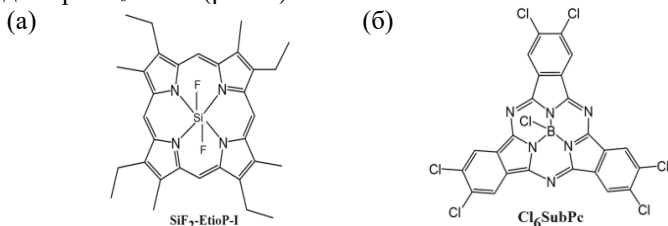


Рис.1. Молекулы Д и А порфириноидов

В докладе обсуждается зависимость морфологии, оптических и электрических свойств плёнок  $\text{SiF}_2\text{-EtioP-I}$ , осаждённых на различные подложки при температуре  $T$  от 253 до 373 К.

При  $T < 273$  К структура плёнки  $\text{SiF}_2\text{-EtioP-I}$  рентгеноаморфная, поверхность рыхлая и сформирована беспорядочно расположенными мелкими гранулами. При  $T > 300$  К плёнка становится текстурированной, и состоит из зёрен большего размера. Спектр поглощения плёнок

содержит аномально широкую В-полосу (рис. 2,а, сплошная кривая). Подобный эффект ранее наблюдался у его аналога – непланарного нефтяного порфирина VO-EtioP-III и объяснялся сильной молекулярной агрегацией [3]. С уменьшением  $T$  происходит батохромный сдвиг максимума В-полосы на 15-40 нм в зависимости от материала подложки. Смещение Q-полосы менее выражено. Удельные темновая и фотопроводимость плёнок SiF<sub>2</sub>-EtioP-I в планарной геометрии нелинейно зависят от  $T$ , с максимумом  $3.2 \times 10^{-9}$  и  $2.1 \times 10^{-6}$  См/см, соответственно при 298 К.

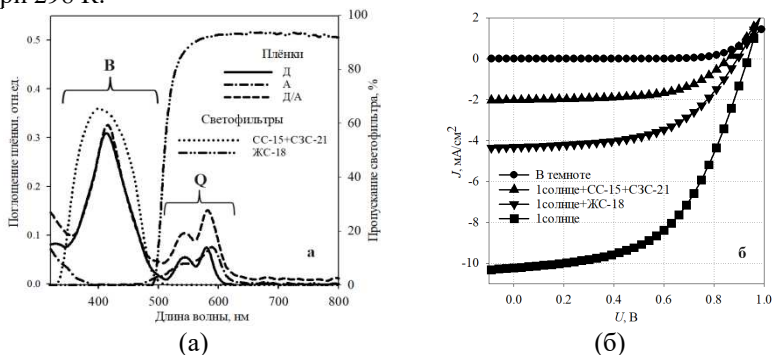


Рис. 2. Оптические спектры плёнок Д, А, Д/А и светофильтров (а); IV-квадрант ВАХ фотопреобразователя в линейных осях (б)

Были измерены вольтамперные характеристики (ВАХ) фотопреобразователей с гетеропереходом «SiF<sub>2</sub>-EtioP-I/Cl<sub>6</sub>SubPc» при освещении симулированным солнечным излучением ( $100 \text{ мВт/см}^2$ ), в том числе через светофильтры: синий (CC-15+C3C-21,  $7 \text{ мВт/см}^2$ ) и оранжевый (ЖС-18,  $76 \text{ мВт/см}^2$ ) - см. рис. 2. Достигнуто к.п.д. 5%, а при выделении спектрального участка В-полосы – более 10%.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 25-73-20101).

[1] V.V. Travkin, Yu.I. Sachkov, A.I. Koptyaev, *Chemical Physics*, 573, 112014 (2023).

[2] E.D. Rychikhina, V.V. Travkin, A.I. Koptyaev, *Journal of Porphyrines and Phthalocyanines*, in press (2025).

[3] A.I. Koptyaev, E.D. Rychikhina, Y.A. Zhabanov, *Supramolecular Materials*, 3, 100075 (2024).

**Разработка и применение электростатического крепежного устройства для технологического микроэлектронного оборудования**

*В.С. Трактиричиков<sup>1,2</sup>, М.Е. Ширяев<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>АО «НПП «ЭСТО», Зеленоград, Россия*

*<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Россия*

*<sup>3</sup>ООО "ЭСТИКА", Зеленоград, Россия*

*e-mail: v.s.traktirschikov@nppesto.ru*

В статье представлен обзор мирового рынка электростатических крепежных устройств, рассмотрены причины необходимости освоения разработки и производства электростатических крепежных устройств в РФ. Приведены достигнутые в производстве ЭКУ результаты.

В отличие от традиционных механических зажимов, электростатические крепежные устройства используют принцип электростатического притяжения для фиксации подложки без физического контакта с ее обрабатываемой стороной. Эта технология имеет решающее значение для обеспечения высококачественного результата обработки подложек и предотвращения повреждения чувствительных материалов в высокотехнологичных производственных процессах [1].

Глобальный рынок электростатических патронов демонстрирует устойчивый рост, согласно различным маркетинговым исследованиям, размер рынка электростатических крепежных устройств составляет несколько сотен миллионов долларов. Авторы этих сходятся во мнении, что за следующие 10 лет рынок ЭКУ будет расти с темпами около 5-8 % в год [1, 2].

Ключевые игроки рынка сосредоточены на инновациях в области продуктов и стратегическом сотрудничестве для получения конкурентного преимущества. Кроме того, растущие инвестиции в научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую деятельность еще больше подпитывают рост рынка. На рынке представлен широкий выбор электростатических крепежных устройств. Обилие вариантов исполнения и назначения ЭКУ позволяют классифицировать устройство по широкому ряду признаков: по конструкции, конфигурации электро-



дов, функциональному назначению, системе питания, ремонтпригодности и другим признакам [1, 2].

Основными тенденциями развития являются применение инновационных материалов, внедрение интеллектуальных функций и адаптация к новым технологиям [1, 2].

Компании АО "НПП "ЭСТО" и ООО "ЭСТИКА" занимаются разработкой серии подложкодержателей с ЭКУ для различных технологических процессов, таких как плазмохимическое травление, ионная имплантация.

На сегодняшний день уже разработан и применяется подложкодержатель с монополярным ЭКУ кулоновского типа для установки плазмохимического травления. С целью автоматизации применения ЭКУ в технологической установке, были определены зависимость минимального напряжения электростатического крепежного устройства от давления гелия под подложкой, а также зависимость расхода гелия под подложкой от напряжения электростатического крепежного устройства.

Знание зависимости минимально допустимого напряжения на электроде ЭКУ от давления гелия под подложкой позволяет подавать на электрод ЭКУ напряжение, формирующее усилие удержания, достаточное для обеспечения прижима, но недостаточное для повреждения фиксируемой подложки. Знание зависимости расхода газа от приложенного к электроду напряжения в нормальном режиме работы ЭКУ позволяет оценивать качество прижима в автоматическом режиме работы установки.

[1] *Electrostatic Chucks Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis* / [Электронный ресурс] // *Business Research Insights: [сайт]*. — URL: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/electrostatic-chucks-market-111394> (дата обращения: 02.02.2025).

[2] *Global Electrostatic Chucks Market Size* / [Электронный ресурс] // *Verified Market Reports: [сайт]*. — URL: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/electrostatic-chucks-market/> (дата обращения: 02.02.2025).

**Формирование кристаллической фазы в халькогенидных  
полупроводниках нового поколения**

*Е. Троян, А. Смирнов, А. Степанов, Н. Жовнерик*

*Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь*

*e-mail: troevfe@gmail.com*

Халькогенидные стекла (ХС) переключаются из состояния с высоким сопротивлением («OFF-state») в состояние с низким сопротивлением («ON-state») при напряжении  $U_{th}$ . При этом возможно: (а) пороговое переключение; (б) переключение с энергонезависимой памятью или РСМ. Материалы, используемые в РСМ, как правило, представляют собой стекла на основе теллура, к наиболее перспективным из которых можно отнести соединения типа  $Ge_2Sb_2Te_5$ . Однако несовершенство и высокая стоимость технологии РСМ системы Ge-Sb-Te затрудняет переход к их широкомасштабному производству.

Одним из возможных путей решения указанной проблемы может быть введение модифицирующего элемента, изоморфного с одним из основных компонентов халькогенидного полупроводника. С этой точки зрения перспективной модифицирующей примесью является алюминий Al, изоморфный со Sb [1]. В связи с этим, мы провели исследования возможности управления свойствами РСМ материалов путем введения различной концентрации модифицирующей примеси Al в пленки Te [2].

Первоначально была изготовлена многослойная тонкопленочная структура: Al-Te(1)-TeO<sub>2</sub>-Te(2)-Me (где, Me: Ni). Окисел теллура получали напуском воздуха в вакуумную камеру после осаждения первого слоя теллура Te(1). Известно [2], что материал нижнего электрода (Al), диффундируя в пленки Te может модифицировать его электрофизические свойства. Сразу после изготовления ВАХ такой структуры была линейна. Через 1,5-2 часа ВАХ превращалась в диодную (прямая ветвь – минус на Al электроде) и еще через час при напряжении  $U_{th} = 3,5-4,0$  В структура начинала переключаться в низкоомное состояние. То есть такой тонкопленочный элемент имел характеристики порогового переключения: напряжение переключения из высокоомного («OFF-state») в низкоомное состояние («ON-state») составляло  $U_{th} = 3,5...4,0$  В, удерживающее напряжение  $U_{hold} = 1,1...1,2$  В.

Для объяснения полученных результатов нами была разработана модель эффектов переключения и памяти [2]. Эта модель базируется на предположении, что в момент переключения в «ON-state» в активной области тонкопленочных элементов формируется кристаллическая зона из высокопроводящих метастабильных дихалькогенидных кластеров  $\text{AlTe}_2$ , в которых сохраняется остаточная внутренняя поляризация  $P_{in}$ :

$$P_{in} = -k \times U_{hold},$$

где,  $k$  – коэффициент пропорциональности, связанный с диэлектрической проницаемостью активного материала,  $U_{hold}$  – напряжение удержания элемента в низкоомном состоянии. В связи с этим возникла необходимость создавать дополнительные слои активного материала, в которых возможен эффект «индуцированной» поляризации с  $P_{ind} \geq P_{in}$ . Предполагалось, что этом случае будет наблюдаться эффект памяти. Для этих целей мы использовали сегнетоэлектрические пленки  $\text{SnTe}$  и  $\text{GeTe}$ , изготовили структуру  $\text{Al-Te-SnTe-TeO}_2\text{-SnTe-Me}$  где, Me – это Ni, Cr, Mo) и получили элемент энергонезависимой памяти.

Также, для проверки предлагаемой модели были проведена ЯМР - спектроскопия специально подготовленных для этого образцов элементов памяти, находящихся в «OFF- state» и «ON-state» состояниях.  $^{27}\text{Al}$  ЯМР спектры с частотой вращения 14 кГц под магическим углом (MAS) записывались с помощью широкоугольных спектрометров Bruker AVANCE III мощностью 16,4 Т.

Из полученных результатов мы установили, что атомы Al претерпевают обратимые тетраэдро-октаэдрические перегруппировки во время фазового перехода из «OFF-state» в «ON-state» состояние. Известно, что октаэдрическая координация атомов переходных металлов является характерной чертой полиморфных структур с металлическим типом проводимости, наблюдающихся в дихалькогенидах:  $\text{MoTe}_2$ ,  $\text{WTe}_2$ ,  $\text{PtTe}_2$ ,  $\text{VTe}_2$  и др. [3]. Мы полагаем, что наблюдаемые спектры подтверждают существование в «ON-state» таких дихалькогенидных кластеров, как  $\text{AlTe}_2$ .

[1] Pumlianmunga, K. Ramesh, "Electrical switching in Sb doped AlTe glasses", *J. Phys. Chem. Solids*, 107, 68–74 (2017).

[2] Б.С. Колосницын, Е.Ф. Троян, "Эффекты памяти и переключения в тонкопленочных неупорядоченных халькогенидных полупроводниках", *Докл. БГУИР*, 2(104), 25–30 (2017).

[3] S. Siddique, et al., "Emerging two-dimensional tellurides", *Mater. Today*, 51, 200–220 (2021).

**Влияние отжига и естественного старения на электрические свойства фазоперемешанных материалов системы GeTe – Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>**

*Е.П. Трусов, А.В. Ермачихин, Ю.В. Воробьев, В.Г. Литвинов*

*Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В.Ф. Уткина, Рязань, Россия*

*e-mail: eptrusov@yandex.ru,*

Аморфные соединения системы GeTe–Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, используемые в фазовой памяти, демонстрируют высокую чувствительность электрических свойств к структурным изменениям. В работе исследованы закономерности изменения температурных зависимостей удельного сопротивления ( $\rho$ ), энергии активации проводимости ( $E_A$ ), положения уровня Ферми относительно потолка валентной зоны ( $E_F$ ) для составов вдоль квазибинарного разреза (GeTe)<sub>1-x</sub>(Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)<sub>x</sub> при термообработке 80–140°C в течение 2 часов и длительном старении (440 дней при комнатной температуре в отсутствии освещения). Для составов с высоким содержанием Ge наблюдается рост  $\rho$ ,  $E_A$ ,  $E_F$ , вызванный структурной релаксацией. В свою очередь составы с высоким содержанием Sb показали снижение  $\rho$ ,  $E_A$ ,  $E_F$  – это связано с частичной кристаллизацией. Температурная зависимость  $E_F$  является не монотонной функцией в рассматриваемом диапазоне температур. Изменения  $E_A$ , вызванные отжигом, следуют за изменением  $E_F$ .

Сравнивая кинетику процессов отжига, вызывающих быстрые структурные изменения, с длительным старением, приводящим к медленной релаксации, отмечается сходие по масштабу изменения для температур 80°C, 100°C и естественного старения в течение 440 дней.

GeSb<sub>2</sub>Te<sub>4</sub> можно считать составом, демонстрирующим баланс между структурной релаксацией и кристаллизацией, который показывает минимальные изменения удельного сопротивления и энергии активации проводимости, что делает его интересным для устройств с длительным сроком хранения информации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-79-10137, с использованием оборудования РЦЗМкп РГРТУ.*

## Оптоэлектронные СВЧ-генераторы

А.Б. Устинов

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

e-mail: [ustinov-rus@mail.ru](mailto:ustinov-rus@mail.ru)

Радиофотоника – это сравнительно новое междисциплинарное научно-техническое направление, сочетающее в себе элементы оптоэлектроники и сверхвысокочастотной (СВЧ) микроэлектроники. К наиболее востребованным устройствам радиофотоники относятся оптоэлектронные СВЧ-генераторы (ОЭГ). Несмотря на то, что такие генераторы были предложены достаточно давно [1], потенциал для их дальнейшего усовершенствования еще далеко не исчерпан.

Оптоэлектронные генераторы относятся к классу активных кольцевых автоколебательных систем с запаздыванием. В большинстве случаев они строятся по кольцевой схеме, состоящей из радиочастотного и оптического трактов. В простейшем случае оптический тракт генератора состоит из лазерного модуля, электрооптического модулятора излучения, оптоволоконного кабеля (или миниатюрного оптического резонатора) и фотодетектора. Основными элементами радиочастотного тракта являются СВЧ-усилитель и СВЧ-фильтр.

Можно выделить четыре режима работы ОЭГ (в зависимости от коэффициента усиления в петле обратной связи): одночастотная генерация, генерация сетки частот, генерация динамического хаоса и шумовая генерация. В случае одночастотной генерации ОЭГ демонстрируют рекордно низкие фазовые шумы. В случае многочастотной генерации ОЭГ можно использовать для формирования различных волновых форм, например, солитонов Мёбиуса [2]. При хаотической и шумовой генерации преимуществом ОЭГ является широкая мгновенная полоса генерируемых сигналов, исчисляемая десятками гигагерц.

[1] X. S. Yao, L. Maleki, *Electron. Lett.* 30, 1525-1526 (1994).

[2] A. V. Kondrashov, A. B. Ustinov, *J. Appl. Phys.* 132, 173907 (2022).

**Рамановская спектроскопия дефектов в n-Si с примесями хрома и эрбия**

*Ш.Б. Утамурадова, К.М. Файзуллаев, Ж.Ш. Зарифбаев*

*Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент, Узбекистан*

*e-mail: sh-utamuradova@yandex.ru*

В настоящее время исследование наноструктур на основе кремния является весьма актуальным направлением как в фундаментальном, так и в прикладном аспектах. В связи с этим более детальное исследование поведения одного из переходных элементов – хрома в кремнии, его взаимодействия с редкоземельной примесью – эрбием в кремнии с использованием наиболее информативных методов, обладающих высокой чувствительностью и большой разрешающей способностью, таких как Рамановская спектроскопия, безусловно, актуально. Изучения структуры и динамики твердых тел широко использовалась спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) (Raman spectroscopy), Рамановская спектроскопия является одним из наиболее мощных аналитических методов при проведении анализа химического и фазового состояния различных объектов и их структуры [1].

Целью данной работы является исследование дефектов, возникающих при внедрении атомов хрома и эрбия в монокристаллический кремний, с использованием метода комбинационного рассеяния света.

Монокристаллы n-Si ( $\rho = 2,5\text{--}10 \text{ }\Omega\cdot\text{см}$ ) последовательно легировали Cr и Er твердофазной диффузией ( $T = 1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$ , 1, 15 ч).

На КРС-спектре, присутствует характерный для кремния интенсивный пик при  $522\text{ см}^{-1}$  с полной шириной на полувысоте (FWHM)  $14\text{ см}^{-1}$ . Как известно кремний имеет кубическую структуру типа алмаза. Кроме того, в результате дальнедействующей трансляционной симметрии кристаллического Si на спектрах комбинационного рассеяния света могут появляться дополнительные пики в диапазоне  $100\text{--}1100\text{ см}^{-1}$ , которые намного менее интенсивнее пика первого порядка LTO [2].

На полученном спектре образца n-Si также присутствует колебание при  $301\text{ см}^{-1}$ . Сделано предположение, что данный пик обусловлен обертоном ТА (2ТА(X)) в критической точке X в результате возникновения суперпозиции поперечных и продольных акустических мод [3].

Быстро охлаждённый n-Si<Cr+Er> демонстрирует  $\Delta\omega = -2,9\text{ см}^{-1}$  (растяжение  $\approx +4,1\text{ ГПа}$ ) и  $\text{FWHM} = 13,7\text{ см}^{-1}$ . При медленном охлаждении наблюдаются слабое сжатие ( $\Delta\omega = +0,8\text{ см}^{-1}$ ,  $\sigma \approx -1,1\text{ ГПа}$ ) и минимальная ширина пика ( $8,0\text{ см}^{-1}$ ). Сужение рефлекса Si (400) и появление слабых пиков  $\text{ErSi}_{2-x}$  подтверждают образование упорядоченной интерметаллидной фазы. При быстром охлаждении фиксируются нанокластеры Cr-обогащенных областей ( $d \approx 5\text{ нм}$ ), медленное охлаждение приводит к их коагуляции в ориентированные наночастицы  $\text{ErSi}_{2-x}$  и выравниванию распределения примесей. Полученные данные согласуются с литературой, Cr индуцирует растягивающие напряжения и глубокие уровни, тогда как Er способствует релаксации решетки [4]. Новым является факт, что медленное охлаждение активирует «пассивационную» роль Er: образуются комплексы Cr–Si–Er, снижающие концентрацию одиночных Cr-дефектов и переводящие напряженное состояние в лёгкое сжатие. Это подтверждает предположение о потенциальной синергии Cr + Er, но конкретизирует механизм через контроль скорости охлаждения.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что спектры комбинационного рассеяния образцов монокристаллического кремния, легированного атомами хрома, могут быть использованы в качестве инструмента для проведения оценки их структурного совершенства и содержания собственных и примесных дефектов, а также присутствия в кристаллах неконтролируемых примесей и кислорода.

[1] Y. Duan, J.F. Kong, W.Z. Shen, *J. Raman Spectrosc.*, 43(6), 756-760 (2012).

[2] K. Uchinokura, T. Sekine, E. Matsuura, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 35(2), 171-180 (1974).

[3] S. Zhang, N. Mao, N. Zhang, J. Wu, L. Tong, J. Zhang, *ACS Nano*, 11, 10366 (2017).

[4] Sh. Utamuradova et.al., *Applied Physics*, 6, 90-96 (2019).

**Исследование стабильности оптических свойств тонких пленок  
 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$**

*М.Е. Федянина<sup>1,2,3</sup>, В.Б. Пестова<sup>1,2</sup>, И.В. Сагунова<sup>1</sup>, А.А. Шерченков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия*

<sup>2</sup>*НПК «Технологический центр», Зеленоград, Россия*

<sup>3</sup>*РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: mahamaha1996@gmail.com*

Халькогенидные тонкие пленки, в частности пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , под действием лазерного импульса, электрического тока или температурного воздействия способны изменять фазовое состояние. Это приводит к возникновению контраста оптических, электрических и структурных свойств между аморфным и кристаллическим состояниями. На основе данного эффекта ведутся активные разработки по созданию оптических и электрических запоминающих устройств, различных устройств нанофоники и оптоэлектроники. Однако имеются проблемы, связанные со стабильностью свойств аморфных тонких пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , поскольку аморфный материал находится в неравновесном или метастабильном состоянии.

Длительная выдержка при температуре ниже фазового перехода может приводить к изменению важных характеристик, оказывающих влияние на работу устройств [1]. Изменение свойств аморфного состояния может усиливаться при действии внешних факторов. С практической точки зрения важно оценить влияние отжига аморфных тонких пленок при температурах ниже температуры кристаллизации. В связи с этим целью работы являлось исследование стабильности оптических свойств аморфных пленок при нагреве ниже температуры кристаллизации.

Тонкие пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  были сформированы методом магнетронного распыления поликристаллической мишени на установке МАГНА-01. Давление аргона во время напыления составляло  $5,6 \cdot 10^{-1}$  Па, мощность, подаваемая на мишень, равнялась 25 Вт. Исследования стабильности оптических свойств тонких пленок GST225 проводились для образцов с различной толщиной. Толщины тонких пленок были измерены на атомно-силовом микроскопе Solver P47-Pro и варьировались от 55 до 384 нм.

Измерения эллипсометрических параметров проводились методом спектральной эллипсометрии с помощью эллипсометра Эллипс-1881А в



диапазоне от 350 до 1050 нм при угле падения света  $70^\circ$ . Для моделирования спектральных зависимостей показателя преломления ( $n$ ) и коэффициента экстинкции ( $k$ ) были использованы четырехслойная модель образца [2] и математическая модель Форохи-Блумера. Структурные изменения в тонких пленках идентифицировали с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Спектры КРС измеряли с помощью спектрометра Centaur U HR ( $\lambda = 532$  нм, краевой фильтр – от  $50 \text{ см}^{-1}$ , разрешение спектра – не менее  $1 \text{ см}^{-1}$ ). Время накопления спектра составляло 6 минут, мощность лазерного излучения – 11 мВт.

Процесс температурного отжига от комнатной температуры до  $100^\circ\text{C}$  сопровождается тем, что оптические свойства во всем диапазоне длин волн изменяются, в частности на длине волны 650 нм значения  $n$  уменьшаются, а  $k$  – растут. При этом интенсивность спектра КРС во всем диапазоне растет за счет увеличения фоновой составляющей. При выходе на температуру выдержки оптические свойства начинают увеличиваться для обоих оптических параметров до выхода на насыщение. Время выхода на насыщение ( $t_{\text{нас.}}$ ) было определено для всех исследуемых образцов. Установлено, что  $t_{\text{нас.}}$  имеет экспоненциальную зависимость от толщины тонкой пленки. В процессе выдержки при  $100^\circ\text{C}$  происходит изменение спектров КРС, что объясняется изменением вклада отдельных пиков соответствующих колебаний в материале. Дальнейшее охлаждение образцов до комнатной температуры приводит к обратимому изменению свойств. Установлено, что разница между значениями  $n$  и  $k$  при комнатной температуре до и после выдержки при  $100^\circ\text{C}$  растет с увеличением толщины пленки. Таким образом, в работе продемонстрировано влияние термообработки ниже температуры кристаллизации на свойства аморфных пленок GST225, которые приводят к необратимым изменениям, что необходимо учитывать при разработке технологии оптических устройств.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №23-79-10309 (исследование структуры и толщин тонких пленок) и проект №25-49-00103 (исследование оптических свойств). Тонкие пленки GST225 были сформированы в лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» (Соглашение 075032025266/1 от 25.03.2025 г., FSMR-2025-0002).*

[1] M. Rutten, M. Kaes, A. Albert, M. Wuttig, M. Salina, *Scientific Reports*, 5, 17362 (2015).

[2] M.E. Fedyanina, P.I. Lazarenko, Yu.V. Vorobyov, S.A. Kozyukhin, A.A. Dedkova, A.O. Yakubov, V.S. Levitskii, I.V. Sagunova, A.A. Sherchenkov, *Semiconductors*, 54, 13, 1775-1783 (2020).

**Прохождение импульса тока через структуру TiN/Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>/Au**

*С.А. Фефелов<sup>1</sup>, Л.П. Казакова<sup>1,2</sup>, Н.А. Богословский<sup>1</sup>, А.Б. Былев<sup>2</sup>*

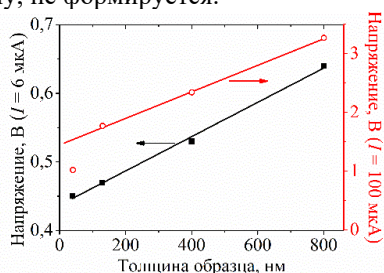
*<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*

*<sup>2</sup>Государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: s.fefelov@list.ru*

Халькогенидные полупроводники относятся к перспективным материалам с уникальными свойствами и широким спектром применения. В частности, халькогенидные полупроводники применяются в элементах энергонезависимой фазовой памяти. Переход к субмикронным и нанометровым размерам активной области в таких элементах требует особого учета контактных сопротивлений, поскольку они могут влиять на работу устройств памяти. В нашей работе представлены результаты исследования протекания тока через структуры TiN/Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>/Au в этом направлении пленок Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> (GST). Пленки Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> (GST) толщиной от 40 нм до 800 нм напылялись на кремниевую подложку, покрытую проводящим слоем TiN, который использовался в качестве нижнего электрода. Ток пропусклся в поперечном направлении, второй контакт – золотой прижимной электрод с площадью контакта примерно 10<sup>-4</sup> см<sup>2</sup>. На этот электрод подавался «плюс». Исследовались свеженапыленные пленки, полученные магнетронным распылением поликристаллической мишени. Предварительно было установлено, что состав пленок близок к составу GST с однородным распределением элементов, и пленка находится в аморфном состоянии. На исследуемые образцы подавалась серия треугольных импульсов тока возрастающей амплитуды. Максимальное значение силы тока в импульсах менялось от 6 мкА до 8 мА. Длительность импульса составляла примерно 2 мс. После подачи на образец импульса с максимальным значением тока 8 мА, сопротивление образцов практически переставало зависеть от толщины пленки GST. Это, по-видимому, означает, что пленка в области токового канала перешла в кристаллическое состояние с сопротивлением много меньшим сопротивления электродов. При этом нелинейная при малых токах зависимость силы тока от напряжения на

образце переходила в линейную при больших токах. Область нелинейности занимала примерно 0,50 В. Оценка сопротивления электродов по линейной части давала примерно 200 Ом. Как следует из анализа экспериментальных данных с учетом структуры энергетического спектра TiN, начальная нелинейность вольтамперной характеристики, по-видимому, обусловлена контактом TiN/c-GST. При подаче первых импульсов тока с малыми амплитудными значениями, когда пленка находится еще в аморфном состоянии, образцы обнаруживают значительное сопротивление ( $\approx 100$  кОм), зависящее от толщины пленки, которое не может быть объяснено сопротивлением электродов, указанным выше, и известными из литературы данными по удельному сопротивлению a-GST. На рисунке приведена зависимость напряжения на образце от толщины аморфной пленки при фиксированном токе через образец 6 мкА и 100 мкА. По линейной зависимости можно оценить величину электрического поля в объеме пленки и удельное сопротивление пленки. При токе 6 мкА напряженность электрического поля равна  $2,5 \cdot 10^3$  В/см, а удельное сопротивление  $4 \cdot 10^4$  Ом·см, что хорошо согласуется с [1], тогда как средняя напряженность поля в пленке порядка  $10^5$  В/см. Таким образом, поле в аморфной пленке имеет сильно неоднородное распределение и значительно усиливается в приконтактной области. Этот результат указывает на формирование блокирующих барьеров на контакте a-GST/Au. На контакте c-GST/Au заметный барьер, по-видимому, не формируется.



Зависимость напряжения на образце от толщины пленки

Полученные данные по протеканию тока в приконтактной области могут представлять интерес для оптимизации конструктивных параметров элементов фазовой памяти.

[1] А.А. Шерченков, С.А. Козюхин, П.И. Лазаренко, А.В. Бабич, Н.А. Богословский, И.В. Сагунова, Е.Н. Редичев, ФТП, 51(2), 154-(2017).

**Волоконные лазеры с низким уровнем шума и их потенциальные применения**

*А.А. Фотиади<sup>1,2</sup>, Д.А. Коробко<sup>1</sup>, И.С. Паняев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия*

<sup>2</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: Fotiadi@mail.ru*

Сужение ширины линии и стабилизация генерации стандартного полупроводникового лазера представляют значительный исследовательский интерес, обусловленный высоким спросом на компактные, экономичные узкополосные лазерные источники с высокой когерентностью, необходимые для широкого круга приложений. Среди них — спектроскопия высокого разрешения, когерентная оптическая связь, распределённый оптический мониторинг, когерентное детектирование оптических сигналов и микроволновая фотоника. Ширина линии генерации стандартных полупроводниковых РОС-лазеров обычно составляет несколько мегагерц. За последние годы нами был предложен ряд решений для создания узкополосных лазеров с лоренцевской шириной линии генерации до 100 Гц. Эти лазеры реализованы в полностью сварных волоконных конфигурациях, отличающихся цельностью и простотой конструкции, объединяющей лазерный диод и несколько стандартных телекоммуникационных компонентов. Возможность одновременной генерации на нескольких строго фазированных частотах делает такие решения особенно перспективными для применений в системах генерации радиочастотных полей. Целью лекции является описание физических механизмов и технических решений, лежащих в основе разработанных конфигураций узкополосных лазеров, а также рассмотрение особенностей их применения в системах микроволновой фотоники, распределённых волоконных датчиков вибраций, температуры и давления, а также в высокоточных спектрометрах.

*Работа выполнена при поддержке РФ (проект № 23-79-30017).*

*[1] А. А. Фотиади, Д. А. Коробко, И. О. Золотовский, Автометрия 59, 74–86 (2023).*

**Моделирование tandemных фотопреобразователей  
перовскит/кремний в программе SCAPS-1D**

*А.А. Царева, Д.Ж.П. Сапори, И.Ю. Дмитриев*

*НТЦ «Тонкопленочных технологий в энергетике», Санкт-Петербург,  
Россия*

*e-mail: A.Tsareva@hevelsolar.com*

Увеличение мирового спроса на энергию и повышение экологических требований к ископаемым видам топлива привело к высокому интересу ученых к возобновляемым источникам энергии, таким как солнечная энергия. Однако для покрытия растущего на нее спроса необходимо разработать высокоэффективные солнечные панели. В настоящее время в промышленности используются фотоэлектрические устройства на основе кремниевых пластин, однако эффективность таких устройств приблизилась к пределу Шокли-Квиссера, что делает невозможным ее дальнейшее увеличение [1,2]. Для дальнейшего увеличения эффективности солнечных элементов внимание ученых привлекли tandemные устройства перовскит/кремний.

Tandemные устройства обычно имеют одну из двух архитектур – механически объединенные подъячейки (4Т) или монолитную 2Т структуру [3,4]. В данной работе было проведено моделирование 2Т и 4Т tandemов на основе промышленной кремниевой ячейки НТ и перовскитной ячейки структуры ИТО/BCP/C60/перовскит/РТАА с различными параметрами перовскитного слоя. Для моделирования использовали программу SCAPS-1D.

Рассчитанные характеристики однопереходных ячеек хорошо согласуются с экспериментально измеренными. Эффективность перовскитных однопереходных ячеек уменьшается с увеличением ширины запрещенной зоны от 1,59 до 1,71 эВ, что согласуется с литературными данными [5,6]. Характеристики кремниевой ячейки были получены при использовании перовскитной ячейки в качестве светового фильтра. При этом эффективность кремниевой ячейки уменьшается с увеличением ширины запрещенной зоны перовскита.

Так как для 2Т тандема  $J_{sc}$  ограничена самым низким током по подъячейкам необходимо согласование токов между кремниевой и перовскитной ячейками для уменьшения электрических потерь. Для этого были рассчитаны характеристики подъячеек при различной толщине перовскитного слоя. С увеличением толщины перовскитного слоя ток, напряжение и эффективность перовскитной ячейки увеличиваются, а кремниевой – уменьшаются. Для перовскита с шириной запрещенной зоны 1,71 эВ оптимальная толщина составила 340 нм.

Расчет 2Т тандема проводили для оптимальных толщин перовскитов с различной шириной запрещенной зоны. Эффективность тандемного устройства несколько увеличивается до 21,73-21,81 % по сравнению с однопереходной кремниевой ячейкой 21,32 %.

Эффективность 4Т тандема рассчитывалась как сумма эффективностей верхней и нижней подъячеек. Для всех перовскитов эффективность 4Т тандема увеличивается с увеличением толщины слоя перовскита до 500 нм, а затем уменьшается. Наибольшая эффективность 29,15 % получена для перовскита с шириной запрещенной зоны 1,71 эВ и толщиной 500 нм.

Таким образом, 2Т тандем предложенной структуры имеет эффективность 21,81 % для перовскита с шириной запрещенной зоны 1,62 эВ и толщиной 240 нм, что несколько выше эффективноски однопереходной кремниевой ячейки 21,32 %. В случае 4Т тандема наибольшая эффективность 29,15% получена для перовскита с шириной запрещенной зоны 1,71 эВ и толщиной 500 нм. Однако стоит отметить, что в расчетах не учитывались электрические и оптические потери на границе подъячеек.

[1] Q. Zhao, T. Liao, N.S. Awwad et al., *Energy*, 303, 132002 (2024).

[2] E. Akoto, V. Isahi, B.V. Odari et al., *Results in Optics*, 12(3), 100470 (2023).

[3] S. Sarker, M.T. Islam, A. Rauf et al., *Solar Energy*, 225, 471-485 (2021).

[4] M.T. Islam, M.R. Jani, S. Rahman et al., *SN Applied Sciences*, 3, 4 (2021).

[5] S. Mashhoun, Y. Hou, H. Chen et al., *Advanced Energy Materials*, 1802085 (2018).

[6] J.P. Mailoa, C.D. Bailie, E.C. Johlin et al., *Applied Physics Letters*, 106 (12), 121105 (2015).

**Изучение спектральных зависимостей фоточувствительности  
в эпитаксиальных структурах Au-окисел-n-GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> /n+-GaAs  
для экологических приложений**

*А.В. Черемисин<sup>1</sup>, Д. Мелебаев<sup>2</sup>, М. Шамухаммедова<sup>2</sup>, Е.И. Теруков<sup>3</sup>,  
М.В. Дюльдин<sup>1</sup>, Н.В. Крупенина<sup>4</sup>, И.Н. Трапезникова<sup>3</sup>, В.Ю. Рудь<sup>3,4</sup>*

*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия*

*<sup>2</sup>Туркменский государственный университет им. Махтумкули,  
Ашхабад, Туркменистан*

*<sup>3</sup>Физико-технический институт А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург,  
Россия*

*<sup>4</sup>Государственный университет морского и речного флота  
им. Адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: ecobaltica@gmail.com*

В работе проведены исследования фоточувствительности (ФЧ) Au-окисел-n-GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> наноструктур в области энергии фотонов  $h\nu=1,5-6,2$  эВ. Определена ширина запрещенной зоны полученного оксида Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $E_{\text{гох}}$ ), легированного железом (Fe), и выяснено влияние оксида железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) на спектр фототока барьеров Шоттки. Для исследования были созданы структуры двух типов на основе наноструктур Au-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Fe)-n-GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub>/n+-GaAs [(100)-структура и (111)-структура] [1]. В работе также была оптимизирована технология изготовления подобных наноструктур металл-диэлектрик-полупроводник на основе n-GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub>.

После химического травления смесью Br<sub>2</sub>(4%)+C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (96%) с последующей промывкой в этаноле, поверхность n-GaAs<sub>0.6</sub>P<sub>0.4</sub> обрабатывалась этаноловым раствором бромид железа (FeBr<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O). Обнаружено в видимой (2-3 эВ) и ультрафиолетовой (УФ) (5,6-6,2 эВ) областях спектра новые закономерности. Это максимум в длинноволновой части спектра при энергии 2,35 эВ. Авторы связывают наличие максимума с образованием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с шириной запрещенной зоны оксида  $E_{\text{гох}}=2,3$  эВ на границе раздела. В УФ части спектра в области энергий 5,0-6,2 эВ наблюдается рост ФЧ с возрастанием  $h\nu$ . При освещении с

$h\nu > 5$  эВ, в диэлектрике (окисле) возникает фототок [2]. Зависимость фототока  $I_{\text{фот}}$  интервале энергий 5,0-6,2 эВ имеет экспоненциальный вид. Благодаря этому была определена  $E_{\text{гох}}$  оксида  $\text{Ga}_2\text{O}_3(\text{Fe})$ , образованного на поверхности  $\text{GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ . В полученных нами результатах значение  $E_{\text{гох}}$  для  $\text{Ga}_2\text{O}_3(\text{Fe})$  оказалось равным  $E_{\text{гох}} \sim (5,10 \pm 0,05)$  эВ при комнатной температуре. Установлено, что образование на поверхности  $\text{GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$  nanoоксидного слоя железа создает в наноструктуре  $\text{Au-Ga}_2\text{O}_3(\text{Fe})\text{-n-GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$  определенные новые свойства, интересные как для науки, так и для создания новых приложений для экологии.

[1] А.В. Черемисин, Д Мелебаев, М Шамухаммедова, С.Е. Никитин, В.Ю. Рудь, И.Н. Трапезникова В книге (сборнике): Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики. Сборник трудов российской конференции, 85-86 (2022).

[2] V. Rud, D. Melebaev, V. Krasnoshchekov, I. Ilyin, E.Terukov, M. Diuldin, A. Andreev, M. Shamuhammedowa, V. Davydov, J. Energies, 16, 5, 2319 (2023).



**Решение для магнетронного напыления тонких плёнок оксида кремния и углерода***В.И. Черкунов**АО «НПП «ЭСТО», Москва, Россия**Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия**e-mail: chvi.esto@ya.ru*

Процессы магнетронного напыления тонких пленок одни из самых распространенных и ключевых в производстве полупроводниковой и гибридной микроэлектроники. Технологии магнетронного напыления активно применяются уже с 1980 годов. Уже более 40 лет назад были известны многие конструктивные решения магнетронных распылительных устройств и систем [1]. Тем не менее, новые требования к тонким пленкам, их равномерности, составу и прочим свойствам, а также применение подложек больших размеров делают необходимым разработки новых магнетронных напылительных систем.

Плёнки из аморфного углерода являются многообещающими кандидатами на роль материалов для жёстких масок нового поколения [2]. Предлагается решение по магнетронному напылению тонких пленок углерода для формирования жесткой маски на пластинах диаметром до 300 мм на базе отечественной установки магнетронного напыления M-Ray. Проведены эксперименты по формированию углеродных пленок.

Другими тонкими пленками, применяемыми, как в качестве маскирующего слоя, так и в качестве защитного коррозионностойкого или диэлектрического слоя, является оксид кремния. На базе установки M-Ray предлагается решение для формирования таких пленок методом ВЧ распыления кварцевой мишени. Применение магнетронных распылительных устройств со сканированием может позволить обрабатывать пластины диаметром до 300 мм [3].

[1] Б. С. Данилин, В. К. Сырчин, *Радио и связь*, 19419, 72 с. (1982).

[2] S. Kim, M.-W. Jeong, K. Kim, U. Kim, M. Kima, S.-Y., Y.-C. Joo, *The Royal Society of Chemistry*, 13, 2131-2139 (2023).

[3] В. И. Черкунов, *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*, 18(1), 14-21 (2025).

**Интегральная фотоника на основе ниобата лития –  
это сверхширокополосная модуляция и ультравысокие скорости  
управления оптическими сигналами**

*А.В. Шамрай*

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

*e-mail: fch.conference@gmail.com*

Интегральная фотоника на основе ниобата лития – это сверхширокополосная модуляция и ультравысокие скорости управления оптическими сигналами. Ниобат лития, благодаря уникальным свойствам и хорошо отработанной технологии формирования оптических волноводов, предлагает широкие возможности по созданию интегрально-оптических устройств для управления оптическим излучением, причем физические механизмы управления, основанные на нелинейности второго порядка, обеспечивают рекордные скорости управления и сверхширокополосную модуляцию оптических сигналов. Другими отличительными особенностями интегральной фотоники на основе ниобата лития по сравнению с конкурирующими материальными платформами являются: способность работать с высокой оптической мощностью (до нескольких сотен милливатт), а также минимальные вносимые оптические шумы. Это определяет лидерство данной материальной платформы интегральной фотоники при работе с аналоговыми сигналами (радиофотоника и оптические датчики), а также в области квантовых информационных технологий, где важно не разрушить заданное квантовое состояние света.

В докладе дан обзор современного состояния и достигнутого значительного прогресса в области сверхвысокочастотной интегральной фотоники на основе ниобата лития, связанного с использованием гибридных подложек тонкопленочного ниобата лития на изоляторе. Обсуждаются и сопоставляются с мировым уровнем результаты, полученные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Рассматриваются новые возможности фотонных интегральных схем для передовых применений, таких как квантовые информационные системы и системы на основе терагерцового излучения. Дается анализ перспектив развития и существующие вызовы.

**МУРР-исследования порошков фосфата лития-железа  
с применением методики искусственных нейронных сетей**

*М.Д. Шарков, М.Е. Бойко, А.М. Бойко, А.В. Бобыль, В.И. Николаев*

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб, Россия*

*[mischar@mail.ru](mailto:mischar@mail.ru)*

Серия из 5 образцов фосфата лития-железа  $\text{LiFePO}_4$ , полученных химическими методами, была исследована с помощью методики малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУРР). Кривые МУРР были зарегистрированы на рентгеновском дифрактометре BRUKER DISCOVER D8 (СПбГУ) при  $\text{Cu K}_{\alpha 1}$  излучении ( $1.5406 \text{ \AA}$ ) в просвечивающем режиме. В целях учета аппаратных ошибок вместе с кривыми МУРР в тех же условиях (на  $\text{Cu K}_{\alpha 1}$  излучении) была получена кривая рассеяния в отсутствие образца (т.е., сигнал от прямого пучка).

Устранение влияния аппаратной функции проводилось следующими способами. Во-первых, была осуществлена регуляризация по Тихонову [1] обратной свертки из кривых МУРР от образца и функции рассеяния прямого пучка. Полученные кривые, как оказалось, содержат большое количество сингулярностей.

Во-вторых, были задействованы методы анализа с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) [2]. Методы восстановления кривой МУРР, основанные на ИНС, состояли в поиске модельной кривой рассеяния, минимизирующей ошибку между экспериментальной кривой рассеяния и функцией, полученной при свертке сигнала от первичного пучка с искомой модельной кривой. В первом случае использованы градиентный спуск и среднеквадратичная ошибка. Во втором случае расчет проводился на основе оптимизатора Адамара (Hadamard) и модуля относительной ошибки. В третьем варианте реализованы расчеты с координатным спуском, модулем относительной ошибки и усреднением по 50 вариантам процедуры калькуляции. Восстановленная кривая МУРР лишь в этом случае принимает сглаженный вид и допускает анализ по моделям Гинье и Порода [3].

Для всех исследуемых образцов анализ кривых МУРР, восстановленных посредством регуляризированной обратной свертки, показал

значения диаметра однородностей (удвоенного радиуса Гинье) в диапазоне 85-90 нм.

При этом кривая МУРР, восстановленная методом ИНС с модулем относительной ошибки, координатным спуском и усреднением по 50 вариантам расчета (восстановленная кривая без сингулярностей), привела после обработки к следующим результатам. Удвоенный гирационный радиус оказался около 55 нм – меньше, чем в случае регуляризированной обратной свертки. Кроме того, в обоих направлениях относительно пика прямого пучка показатель Порода оказался около 3 (по модулю). Известно теоретическое исследование [4], в котором показатель Порода 3 (по модулю) связан с т.н. логарифмическими фракталами – структурами с размерной иерархией (аналогично деревьям со стволом, ветвями и сучьями).

Важно, что концепция размерной иерархии позволила устранить противоречие между данными МУРР, приводящими к средним размерам менее 100 нм, и полученными ранее фотографиями просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), показывающими преобладание в образце частиц с габаритами более 100 нм. Картины ПЭМ отражают проекции агломератов зерен, которые могут накладываться друг на друга. В свою очередь, данные МУРР происходят от областей, однородных по электронной плотности, и на них влияет усредненный в разных направлениях размер (гирационный радиус) агломератов.

Продemonстрировано, что применение методик на основе ИНС позволяет восстанавливать форму кривой МУРР, не содержащую сингулярностей. По итогам применения методики ИНС уточнены основные характеристики кривой МУРР (породовского показателя затухания, гирационного радиуса частиц Гинье) от одного из образцов  $\text{LiFePO}_4$ . Разработанный подход является универсальным и может быть применен при исследовании различных твердотельных материалов.

Авторы благодарят В.Н. Неведомского (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) и И.А. Касаткина (СПбГУ) за плодотворное сотрудничество.

[1] А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. *Методы решения некорректных задач*. Наука, М., (1979).

[2] S.S. Haykin. *Neural Networks and Learning Machines*. Pearson Education, NYC, (2009).

[3] М.Е. Бойко, М.Д. Шарков, А.М. Бойко, С.Г. Конников, А.В. Бобыль, Н.С. Будкина. *ЖТФ* 85 (11), 1-29 (2015).

[4] Е.Г. Яшина, С.В. Григорьев. *ЖЭТФ* 156 (3), 541-545 (2019).

**Среднетемпературные термоэлектрические материалы на основе PbTe. Стратегия повышения эффективности***А.А. Шерченков, Ю.И. Штерн, М.Ю. Штерн, М.С. Розачев**Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Россия**e-mail: aa\_sherchenkov@rambler.ru*

Термоэлектричество в последние годы является одним из наиболее активно развивающихся направлений в науке и технике. Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) активно разрабатываются в последние годы, как альтернативный и перспективный способ преобразования тепловой энергии в электрическую. ТЭГ экологичны, для их работы могут использовать самые разнообразные источники тепла, в частности, бесполезно теряемое бросовое тепло, что обеспечивает повышение энергоэффективности процесса получения электроэнергии. Температура источников бросового тепла, таких как промышленные предприятия, двигатели внутреннего сгорания и др., как правило находится в диапазоне 500-800 К. В этом температурном диапазоне применимы среднетемпературные термоэлектрические материалы (с рабочим диапазоном 450-900 К).

В последнее десятилетие предложен ряд новых перспективных термоэлектрических материалов (ТЭМ) и способов их изготовления, позволяющих заметно увеличить термоэлектрическую добротность. Однако самые высокие характеристики во всем среднетемпературном диапазоне имеют ТЭМ на основе PbTe p- и n-типа. Таким образом, актуальным является дальнейшее повышение термоэлектрической добротности. В связи с этим, в данной работе проанализирована стратегия повышения эффективности ТЭМ на основе PbTe.

Можно выделить 4 направления увеличения термоэлектрической добротности ТЭМ: 1) оптимизация концентрации носителей заряда; 2) увеличение фактора мощности; 3) уменьшение теплопроводности; 4) комплексный подход.

Для достижения высокой термоэлектрической добротности, ТЭМ должны иметь высокую электропроводность и термоЭДС, а также низ-

кую теплопроводность. Однако эти параметры очень сильно взаимосвязаны между собой через концентрацию носителей заряда. В результате, оптимизация концентрации носителей заряда является очень важным и эффективным способом повышения ZT, но требует нахождения компромиссного решения.

Полученные в последнее десятилетие экспериментальные результаты свидетельствуют о реальной возможности заметного увеличения термоэлектрической добротности за счет увеличения фактора мощности ТЭМ. Увеличение термоЭДС и фактора мощности в целом возможно в результате: 1) увеличения энергетической зависимости концентрации носителей (конвергенция валентной зоны, увеличение плотности состояний вблизи уровня Ферми, сглаживание зон); 2) увеличения энергетической зависимости подвижности носителей (использование энергетического фильтра, Андерсоновская локализация носителей).

Уменьшение теплопроводности является одним из наиболее эффективных способов увеличения ZT. Для этой цели перспективно создание объемных наноструктурированных ТЭМ, в которых рассеиваются фононы во всем диапазоне длин волн фононов. При этом, наряду с рассеиванием коротковолновых и длинноволновых фононов, наиболее эффективно рассеиваются фононы со средней длиной волны, переносящие до 50% тепловой энергии. Перспективным методом получения объемных наноструктурированных ТЭМ является искровое плазменное спекание нанодисперсного порошка, в результате которого достигаются максимальные значения ZT при плотности образцов 98-99% от теоретически возможной.

Однако, наибольшие значения ZT были получены при комплексном подходе и действии нескольких факторов, одновременно увеличивающих фактор мощности и уменьшающих теплопроводность, и, в результате, приводящих к заметному росту безразмерной термоэлектрической добротности. Для ТЭМ на основе PbTe достигнуты рекордные значения  $ZT=2,05$  при температуре 800 K и  $ZT=2,57$  при  $T=850$  K для  $PbBi_{0.002}Te-15\%Ag_2Te$  n-типа и  $Na_{0.03}Eu_{0.03}Sn_{0.02}Pb_{0.92}Te$  p-типа соответственно.

Полученные значения ZT для ТЭМ на основе PbTe p-типа выше, чем для n-типа, что связано с особенностями зонной структуры и сложностью ее изменения в PbTe n-типа.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 24-19-00158).*

**О возможности использования оксида графена в электрохромных пленках оксида вольфрама**

*А.В. Щегольков<sup>1,2</sup>, В.О. Малинкина<sup>1</sup>, А.В. Комаров<sup>1</sup>, Д.Е. Авдонин<sup>1</sup>,  
А.В. Щегольков<sup>2</sup>*

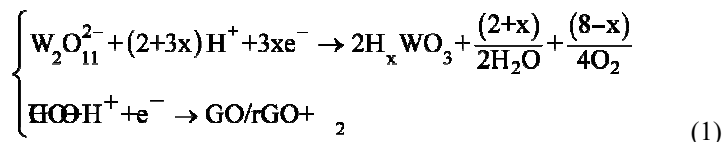
*<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»,  
Москва, Россия*

*<sup>2</sup>ФГБОУ ВО ТГТУ, Тамбов, Россия*

*e-mail: alexxx5000@mail.ru*

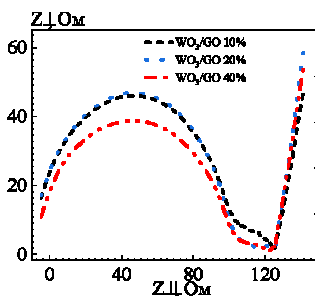
За последние несколько десятилетий ряд оксидов вольфрама был широко исследован благодаря их высокой эффективности окрашивания и хорошей циклической стабильности [1]. Однако применение электрохромных пленок  $WO_3$ , полученных электрохимическим (катодным) осаждением, всё ещё ограничено вследствие ионной деструкции, химической коррозии, фотодеградации и т. д. Поэтому применение наноструктурированного материала в качестве функционального слоя в электрохромных пленках  $WO_3$ , к которому относится оксид графена (GO-graphene oxide), представляет собой перспективное решение, направленное на повышение электрохромных и электрохимических свойств [2].

Пленки  $WO_3/GO$  электрохимически индуцировались на подложках из PET (полиэтилентерефталат) с прозрачным электродом ИТО ( $In_2O_3:xSnO_2$ ) пульсирующими потенциалами по следующей схеме:  $-0,5$  В течение 15 с;  $-1,5$  В в течение 0,5 с. Для получения тонкого равномерного слоя  $WO_3/GO$ , подложки тщательно очищались. Последовательно в ацетоне, 30% изопропиловом спирте в течение 15 мин и дистиллированной воде 15 мин соответственно. Перед нанесением в раствор осаждения на основе пероксивольфрамовой кислоты (ПВК) [3], добавляли 0,1 мг/мл GO от 10 до 40 об.%. GO содержит кислородсодержащие группы, которые могут восстанавливаться на катоде. Электрохимические реакции осаждения композитной пленки  $WO_3/GO$  можно представить в упрощенном виде:



где rGO (reduced graphene oxide) – восстановленная фаза GO, частично проводящая;  $x$  – концентрация носителей заряда (ионов и электронов).

На рисунке представлены годографы импеданса, выполненных по эквивалентной схеме Рэндлса для композитных пленок  $\text{WO}_3/\text{GO}$ .



Годографы импеданса пленок  $\text{WO}_3/\text{GO}$

Таким образом, введение GO в состав пленки  $\text{WO}_3$  позволяет увеличить площадь поверхности электрода, создать буфер между активными центрами и ионным слоем (электролит), что, в свою очередь, позволяет повысить диффузию ионов в структуру  $\text{WO}_3$ , уменьшить фотодеградацию в результате образования защитного слоя GO/rGO.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FZRR-2024-0003).*

[1] A.V. Shchegolkov, S.-H. Jang, A.V. Shchegolkov, Y.V. Rodionov, A.O. Sukhova *Nanomaterials*, 11, 2376 (2021).

[2] Nisa M., Nadeem N., Yaseen M., Iqbal J., Zahid M., Abbas Q., Mustafa G., Shahid I. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 13, 2, 167-196 (2021).

[3] Щегольков А.В., Щегольков А.В. *Российский химический журнал*, 69, 1, 20-25 (2025).



**Формирование топологического рисунка методами позитивной и негативной фотолитографии на портативной установке экспонирования**

*Л.А. Эль-Хадж<sup>1</sup>, Д.Ю. Терехов<sup>1</sup>, И.А. Волощук<sup>1</sup>, И.Я. Краснянский<sup>2</sup>,  
А.О. Якубов<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Россия*

*<sup>2</sup>НПК «Технологический центр», Зеленоград, Россия*

*e-mail: allay.02@yandex.ru*

Современное производство микроэлектронных устройств невозможно без применения литографии, которая является крайне сложным технологическим процессом. На этапе разработки многослойных структур в лабораторных условиях, в том числе для исследования свойств перспективных материалов, зачастую требуется большое количество фотошаблонов (ФШ), их частая корректировка и замена вследствие ограниченного срока эксплуатации. При этом изготовление традиционных контактных и проекционных ФШ может занимать до нескольких месяцев. Таким образом, актуальной задачей для разработки устройств является оптимизация литографической технологии, обеспечивающая снижение материальных и временных затрат производственного цикла.

В связи с этим целью данной работы была отработка технологии формирования топологического рисунка функциональных слоев на различных подложках с использованием портативной установки экспонирования с цифровыми фотошаблонами на основе жидкокристаллической матрицы.

В ходе проведения работ был разработан технологический маршрут формирования многослойных тонкопленочных структур методами позитивной и негативной фотолитографии с использованием резистивных масок пленочного и жидкого типа соответственно. Отработку экспонирования проводили на разработанной настольной литографической установке с жидкокристаллическим дисплеем, на который выводится изображение фотошаблона. Использование цифровых ФШ обеспечивает высокую гибкость и скорость формирования топологического рисунка и

его коррекции по сравнению с традиционными контактными ФШ. Применение цифровых ФШ полностью исключает необходимость изготовления физических фотошаблонов, что значительно увеличивает гибкость и эффективность процесса разработки многослойных структур.

В результате отработки технологии формирования топологического рисунка были подобраны режимы экспонирования и проявления негативного (AQUA MER 37 ME720) и позитивного (ФП-3515) ФР: мощность излучения УФ-источника (33 Вт) с длиной волны 405 нм, время экспонирования (до 3 минут) и проявления (до 1 минуты) для подложек из ситалла, стекла и кремния с термическим окислом. Для улучшения чистоты поверхности подложек после проявки ФР были отработаны технологические режимы обработки подложек с ФР в кислородной плазме, что также привело к увеличению адгезионной прочности формируемой структуры. Нанесение пленок проводили методом магнетронного распыления мишени при постоянном токе.

На основе разработанной технологии были изготовлены экспериментальные образцы для различных приложений, в том числе структуры для исследования фундаментальных свойств фазопеременных и термоэлектрических материалов, тонкопленочный термоэлектрический генератор на основе некристаллических полупроводников и другие.

*Работа выполнена в НИУ МИЭТ в рамках программы государственной поддержки университетов «Приоритет-2030».*

**Особенности технологии формирования тонких пленок  
халькогенидных фазопеременных материалов**

*А.О. Якубов<sup>1</sup>, П.И. Лазаренко<sup>1</sup>, Д.Ю. Терехов<sup>1</sup>, М.Е. Федянина<sup>1</sup>,  
Д.А. Гнеушев<sup>1</sup>, И.В. Сагунова<sup>1</sup>, К.В. Шопков<sup>1</sup>, С.А. Козюхин<sup>2</sup>,  
А.А. Шерченков<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,  
Москва, Россия*

*e-mail: alexsey007@mail.ru*

Халькогенидные фазопеременные материалы (PCM) активно используются в различных областях микро- и оптоэлектроники. Связано это с их уникальной способностью совершать быстрые и обратимые фазовые переходы между аморфным и кристаллическим состояниями, которые обладают существенно различающимися электрофизическими и оптическими характеристиками. Данная способность в сочетании с возможностью их применения в КМОП-технологии делают PCM перспективными для применения в различных приложениях, в том числе для создания устройств памяти, элементах волоконной оптики, реконфигурируемых фотонных устройствах для различных спектральных диапазонов (от ультрафиолетового до терагерцового).

Однако свойства и характеристики тонких пленок PCM, такие как ширина запрещенной зоны, показатель преломления, удельное сопротивление и др. во многом зависят от применяемых методов и режимов их формирования [1, 2]. В качестве методов нанесения наибольшее распространение получили магнетронное распыление, вакуумно-термическое испарение, атомно-слоевое осаждение, импульсное лазерное осаждение, химическое осаждение из паровой фазы и др. Фактически, используя один и тот же метод осаждения можно получать пленки с различными характеристиками за счет варьирования технологических параметров и условий формирования.

Для формирования аморфных тонких пленок PCM, в зависимости от состава, мы использовали методы вакуумно-термического испарения

или магнетронного распыления. Для первого метода формирование проводилось с применением синтезированного объемного материала, для второго – поликристаллические мишени. Проверка качества формируемых слоев осуществлялась в результате комплексного исследования состава, структуры, морфологии поверхности и толщины, электрофизических, оптических и механических свойств.

В результате работы были установлены особенности халькогенидных фазопеременных материалов методами вакуумно-термического испарения и магнетронного распыления, а также определение зависимости характеристик получаемых пленок от параметров используемых режимов формирования. Для повышения качества формируемых слоев и расширения спектра осаждаемых материалов была проведена модификация магнетронной системы за счет ее дооснащения вторым магнетроном с высокочастотным источником.

*Работа выполнена в лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» (Соглашение 075032025266/1 от 25.03.2025 г., FSMR-2025-0002).*

*[1] H. Dieker, M. Wuttig, Thin Solid Films, 478(1-2), 248-251 (2005).*

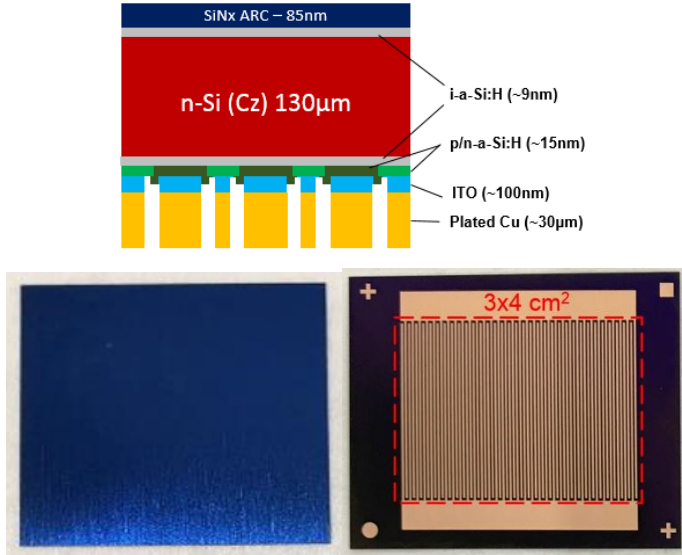
*[2] I.D. Simandan, F. Sava, A.T. Buruiana, A.C. Galca, N. Becherescu, I. Burducea, C. Mihai, A. Velea, Materials, 14(13), 3663 (2021).*

**Interdigitated back contact silicon heterojunction solar cells:  
towards industrially feasible manufacturing methods***S.N. Abolmasov<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, St. Petersburg, Russia**<sup>2</sup>Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia**e-mail: s.abolmasov@hevelsolar.com*

Recently, interdigitated back contact silicon heterojunction (IBC-SHJ) solar cells have demonstrated the record power conversion efficiency ( $\eta = 26\text{--}27\%$  [1, 2]) among single-junction silicon cells. They also have high potential of cost reduction by employing thinner wafers and since only one transparent conductive layer (usually it is costly indium tin oxide) is used at the rear side. However, in order to reach such high efficiency values precise patterning techniques (such as photolithography, which is complex and expensive) are required. Less expensive alternatives such as shadow masks, laser scribing, inkjet and screen printing and their combinations have also been investigated in the last few years resulting, however, in much less conversion efficiencies of such cells [3-6]. A remarkable exception are IBC-SHJ cells featuring an interband tunnel junction (approaching an efficiency of 25% [7]), which, however, require the use of in situ shadow PECVD masks and sophisticated metallization techniques, the use of which in mass production is rather questionable. During the last year, however, LONGi achieved great progress in employing advanced picosecond lasers for manufacturing record-efficiency IBC-SHJ solar cells [2].

On the contrary, in this study we focus on the development of new manufacturing method for IBC-SHJ solar cells based on the use of solely inkjet printing and copper plating (industrially proven metallization method for standard IBC cells (SunPower [8])). The main goal of the study was to evaluate whether high-quality surface passivation could be achieved in the finished device after three inkjet printing/wet etching process steps using a hot melt ink and amorphous silicon nitride masks for wet etching. Surprisingly, the first results demonstrate an open circuit voltage above 700 mV and an efficiency of 17% for 12 cm<sup>2</sup> IBC-SHJ cells on flat CZ (n-type, <100>, 3 Ohm cm, 130  $\mu\text{m}$  thick) wafers even with not fully optimized parameters of

thin films and cell design, demonstrating rather high potential of inkjet printing as patterning technique. The use of textured front surface and further optimization of protective silicon nitride layers have increased the conversion efficiency up to 20%. The cells, however, suffer from relatively high series resistance, resulting in a moderate fill factor (FF)  $\leq 72\%$ ; approaches to improve FF and to reduce the number of inkjet printing steps are outlined.



Schematic of the IBC-SHJ solar cell structure and photographic images of front and rear side of a fully processed cell, showing the 12 cm<sup>2</sup> designated area

- [1] K. Yoshikawa, et al., *Nature Energy*, 2, 17032 (2017).
- [2] G. Wang, et al., *Nature Communications*, 15, 8931 (2024).
- [3] P. Wagner, et al., *IAP Conference Proceedings*, 1999, 060001 (2018).
- [4] S. Ring, et al., *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6, 894 (2016).
- [5] H. Takagishi, et al., *Jap. J. Appl. Phys.*, 56, 040308 (2017).
- [6] D. Thibaut, et al. *Energy Procedia*, 8, 294 (2011).
- [7] D. Lachenal, et al., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 200, 110036 (2019).
- [8] D.D. Smith, et al. *Proc. 43<sup>rd</sup> IEEE PVCS*, 3351 (2016).

# Photoinduced effects in the Ga-Sb-S chalcogenide glassy system

*R.I. Alekberov<sup>1,2</sup>, S.I. Mekhtiyeva<sup>1</sup>, I.R. Ismayilov<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>The Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,  
Institute of Physics, Baku, Azerbaijan*

*<sup>2</sup>Baku State University, Baku, Azerbaijan*

*e-mail: mr.ismayil0000@gmail.com*

Recent studies have shown that exposure of chalcogenide glasses by the laser and other types of irradiation causes photoinduced effects, which is constantly expanding the scope of their application [1].

The main objective of the presented work is to analyze the optical transmission spectra of thin films of glassy chalcogenide  $\text{Ga}_6\text{Sb}_{18}\text{S}_{76}$  exposed to ultraviolet irradiation ( $\lambda=350\text{-}380\text{ nm}$ ) for different periods of time.

Fig.1 shows the optical transmission spectra of thin layers of glassy films of chalcogenide  $\text{Ga}_6\text{Sb}_{18}\text{S}_{76}$  exposed to ultraviolet radiation for different periods of time.

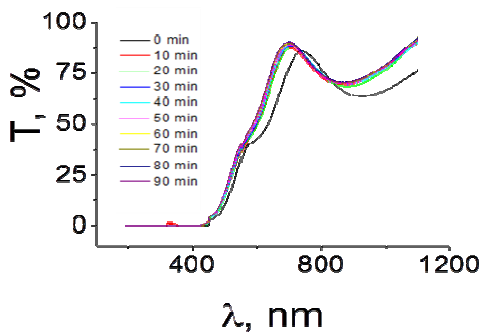


Fig.1. Optical transmission spectra of  $\text{Ga}_6\text{Sb}_{18}\text{S}_{76}$  chalcogenide glassy thin film at different exposure time

As can be seen from Fig.1, the optical transmission spectra undergo significant changes depending on the exposure time to irradiation. Fig. 2

illustrates the effects of exposure time on the value of the optical transmittance of radiation in the visible and infrared regions of the spectrum.

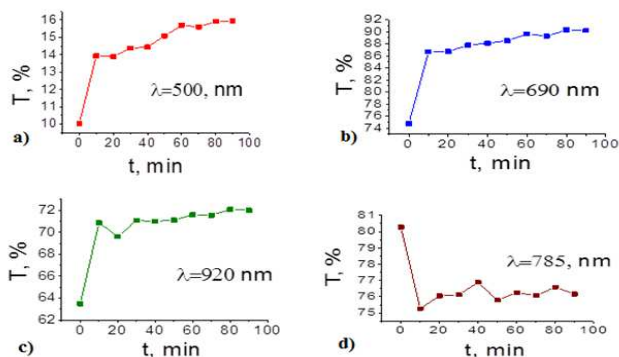


Fig.2. Dependence of optical transmittance on radiation exposure time

These results show that the value of  $T$  increases and decreases in certain spectral regions depending on the exposure time to ultraviolet radiation. This result proves that the effects of photoenlightenment and photodarkening occur in thin layers of the studied material. Studies [2] show that there are a lot of mechanisms for the occurrence of photoinduced effects in amorphous chalcogenides. It has been established that after optical irradiation, the material can undergo optical, electrical, structural, chemical, etc. changes depending on the duration of exposure, which is reflected in the observation of recoverable and non-recoverable effects. Considering that the glassy systems of Ga-Sb-S chalcogenides studied in this work have relatively high glass transition temperatures [3], it can be concluded that photocrystallization does not occur as a result of heating the sample after exposure.

[1] L Liu, X Zheng, X Xiao, Y Xu, X Cui, J Cui, C Guo, J Yang, H Guo, *Optical Materials Express*, 9, 3582-3593 (2019).

[2] D. Usanov, A. Nezhdanov, M. Kudryashov, I. Krivenkov, A. Markelov, V. Trushin, L. Mochalov, D. Gogova, A. Mashin, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 513, 120-124 (2019).

[3] Y Zhang, Q Jiao, B Ma, X Zhang, X Liu, S Dai, *Journal of the American Ceramic Society*, 102, 7065-7070 (2019).



**Application of models bond strength–coordination number fluctuation  
and scaled viscosity models to glass transition processes  
in the Sb-Se system**

*R.I. Alekberov, S.I Mekhtiyeva, R.F. Sadikhli*

*The Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,  
Institute of Physics, Baku, Azerbaijan*

*e-mail: ramida\_sadikhli@mail.ru*

In recent years, the thermal properties of chalcogenide glasses have been intensively studied depending on the heating rate ( $q$ ) and cooling in order to elucidate the mechanisms for obtaining glasses with stable physical properties. A complete study of the dynamics of the transition to the glassy state and the mechanisms of structure relaxation are the main tasks facing researchers [1, 2]. It is known that, the notion «fragility» index ( $m$ ), introduced on the basis of the concept «fragility» or «kinetic fragility» [2], which characterizes the change in viscosity macroscopically and quantitatively. However, despite this, the physical reasons for the change in the fragility index in terms of changes in the structure of the substance, the rate of heating of the substance ( $q$ ) and macroscopic movements of atoms have not yet found an unambiguous explanation. Studies [3] show that the temperature dependence of viscosity in «strong» glasses ( $\text{SiO}_2$ ) obeys the Arrhenius formula, mainly explained by a macroscopic mechanism (for example: breaking of Si-O bonds or inter-chain shifts). In contrast, in «fragile» glasses (Se, Te, etc.), the temperature dependence of the viscosity does not obey the Arrhenius formula, which is related to inter-chain and intra-chain mixed action mechanisms. The author [3] proves that the value of the fragility index ( $m$ ) in «fragile» glasses cannot be determined only by topological connectivity, i.e. only by the average coordination number ( $Z$ ) characterizing the short range order (SRO) of local structure (for example: the average coordination number for Se is  $Z=2$ ). The occurrence of photoinduced local structural changes in amorphous selenium (Se) with a relatively high fragile index ( $m_{\text{Se}} \sim 50$  [4]) confirms the above results [5]. It has been determined that the «fragility» index ( $m > 20$ ) is higher in glassy tetrahedral systems, where the angle-

distribution density of edge-sharing units satisfying the condition of bond angle  $\theta \leq 120^\circ$  is superior [6].

The main purpose of work is to apply the bond strength–coordination number fluctuation (BSCNF), «scaled viscosity» models and thermodynamic approach to the results of differential scanning calorimetry experiments and to determine the mechanisms of influence of the heating rate ( $q$ ) of the substance on the glass transition processes.

In the present study, fragility, glass-forming ability, thermal stability properties and glass- transition processes of  $\text{Se}_{80}\text{Sb}_{20}$  chalcogenide glass composition were studied by differential scanning calorimetry method (DSC). Experiments on differential scanning calorimetry were carried out on a synchronous thermal analyzer STA3000 in the temperature range from  $20^\circ\text{C}$  to  $300^\circ\text{C}$  and heating rate of the substance varied in range  $q=2.5\div 45$  K/min. Aluminum (Al) cuvettes were filled with substance in the amount of  $m=52$  mg for conducting DSC experiments.

Depending on the heating rate of the sample, the «fragility» index ( $m$ ) of the substance was calculated according to C.T. Moynihan's formula and bond strength–coordination number fluctuation (BSCNF), «scaled viscosity» models and thermodynamic approach were applied to those results. As a result of the application of the mentioned models and the thermodynamic approach to the results, it is concluded that the weak decrease of the fragility index ( $m$ ) as a result of the increase in the heating rate ( $q=2.5\text{--}17.5$  K/min) is related to the increase in the average bond energy ( $E_0Z_0$ ) of the structural units determined by medium range order (MRO) of local structure and decrease in the configurational entropy ( $\Delta S_c$ ). The application of BSCNF model to the results shows that the fluctuation of the average bond energy ( $|\Delta E||\Delta Z|$ ) of structural units due to the increase of the heating rate in the above-mentioned interval is not subject to significant changes.

- [1] P.G. Debenedetti, F.H. Stillinger, *Nature*, 410, 259 (2001).
- [2] C. A. Angell, *Science*, 267, 1924 (1995).
- [3] K. Tanaka, *Phys. Stat. Sol. B*, 257, 2000206 (2020).
- [4] K. Tanaka, K. Shimakawa, *Amorphous Chalcogenide Semiconductors and Related Materials*, Springer Nature (2021).
- [5] Y. Sakaguchi, K. Tamura. *Phys. Chem.*, 235 189 (2021).
- [6] M. Wilson, P.S. Salmon *Phys. Rev. Lett.*, 103157801 (2009).

Оптические параметры магнитного полупроводника  $\text{TlFeS}_2$ 

Z.I. Badalova<sup>1</sup>, Z.A. Jahangirli<sup>1,2</sup>, Yu.A. Abdullayev<sup>1</sup>,  
S.S. Ragimov<sup>2,1</sup>, N.A. Abdullayev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics, Ministry of Science and Education, Baku, Azerbaijan

<sup>2</sup> Baku State University, Baku, Azerbaijan

e-mail: zibchik@mail.ru

Для магнитных полупроводников характерна сильная взаимосвязь магнитных, электрических и оптических свойств, и магнитное взаимодействие осуществляется с участием электронов проводимости. Соединение  $\text{TlFeS}_2$  является перспективным для использования в новой области электроники – спинтронике.

Ранее из эллипсометрических измерений, выполненных в диапазоне энергий 0,7-6,5 эВ, нами были получены для кристалла  $\text{TlFeS}_2$  спектральные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической функции  $\varepsilon$ , коэффициентов экстинкции  $k$  и поглощения  $\alpha$ , показателя преломления  $n$  [1]. Воспользовавшись зависимостью коэффициента поглощения от энергии фотонов, можно из соотношения  $\alpha(h\nu) = \alpha_0 \exp(h\nu/E_u)$  (рис. 1,а) получить значение энергии Урбаха ( $E_u$ ), которая обусловлена структурными нарушениями и возможными несовершенствами: 0,38 эВ.

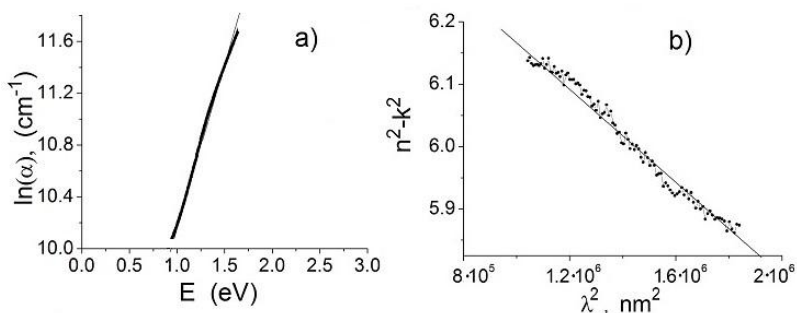


Рис. 1. Спектральные зависимости для определения энергии Урбаха ( $E_u$ ) (а) и плазменной частоты  $\omega_p$  (б) кристалла  $\text{TlFeS}_2$  (а, б)

При больших длинах волн ( $n^2 \gg k^2$ ) действительная часть диэлектрической функции  $\varepsilon_l = n^2 - k^2$  описывается как:  $\varepsilon_l = \varepsilon_\infty - \omega_p^2 / \omega^2 = \varepsilon_\infty - (\omega_p^2 / 4\pi^2 c^2) \lambda^2$ . Воспользовавшись этими соотношениями из рис. 1, б для кристалла  $\text{TiFeS}_2$  получим плазменную частоту  $\omega_p$ , равную  $1,1 \cdot 10^{15}$  рад/с.

Поскольку плазменная частота  $\omega_p = e^2 \cdot N / \varepsilon_0 \cdot m_e^*$ ,  $e$  – элементарный заряд,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная ( $8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м),  $N$  – плотность носителей заряда,  $m_e^*$  – эффективная масса носителей заряда, можно оценить отношение  $N/m_e^*$ , равное  $4,24 \cdot 10^{56} \text{ м}^{-3} \text{ кг}^{-1}$ .

[1] Z.A. Jahangirli, R.G. Veliyev, Z.I. Badalova, R.G. Seyidov, E.H. Alizade, T.G. Mammadov, and N.A. Abdullayev, *Phys. Wave Phenom.* 3. 84-91 (2023).

## The charge separation of PIDT-BT/Single walled carbon nanotube quantum Heterojunctions

Baode Zhang<sup>1</sup>, A.N. Aleshin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Liaoning Petrochemical University, Fushun, People's Republic of China*

<sup>2</sup>*Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia*

*e-mail: zhangbaode@lnpu.edu.cn*

Quantum confinement can increase Coulomb interactions that drive the multiple exciton generation per absorbed photon process in quasideimensional single wall carbon nanotubes (SWCNT) [1]. Our previous experimental study shows that the DC conductivity of the poly(indacenodithiophene-co-benzothiadiazole) (PIDT-BT)/SWCNT (1:0.3) film was higher by two orders of magnitude compared with the neat PIDT-BT polymer film. The dramatic increase is proposed to ascribe to multiple exciton generation (MEG) of the semi-conducting SWCNT and the subsequent charge separation at the interfaces of a heterogeneous  $\pi$  complexes with the conjugated polymer wrapping around SWCNT [2]. To prove this conjecture, semi-conducting (12,8) SWCNT were chosen for investigating the interfacial energy, wrapping geometry, energy band alignment and charge separation at PIDT-BT/SWCNT interface by the density functional theory (DFT) and the density of states (DOS) calculations. DFT results show that the helical conformation of conjugated polymer wrapping around SWCNTs is constructed, and a type-II photovoltaic heterojunction is formed and significant charge transfer is taken place from donor to acceptor species due to the strong  $\pi$ - $\pi$  interaction between SWCNTs and the conjugated polymers [3]. DOS shows that the HOMO of the PIDT-BT/ (12,8) SWCNT composites is composed by the PIDT-BT components, while the LUMO is localized onto the (12,8) SWCNT with band gap about 0.3eV, which is quite lower than 1.74 eV band gap of the PIDT-BT itself. The HOMO and LUMO located separately on two species, which is beneficial for charge separation across the interface. The semi-conducting (12,8) SWNT in the complex show two overlapping adjacent LUMO and LUMO near the Fermi level, which is attributed to the coupling of two LUMOs within the heterogeneous  $\pi$  complexes. The narrow band gap between HOMO of conjugated polymer and LOMO of

SWCNT, and the coupling of LUMO and LUMO near the Fermi level promote electrons across the band gap and enhance the probability of the generating two excitons by a single photon under the quantum confinement of SWCNTs, and lead to the resonant coupling between the optically active one-exciton state and two exciton states within the heterogeneous  $\pi$  complexes. The DFT and DOS simulations confirmed our conjectures that the heterogeneous  $\pi$  complexes of the conjugated polymer wrapping around semiconducting SWCNT favor the generation of two excitons and efficient charge separation at the interfaces of conjugated polymer and SWCNT, which contribute the dramatic increase of conductivity after introducing SWCNTs to the conjugated polymer. The theoretical analysis is of significance of designing advanced devices of high photon-electron conversion efficiency.

[1] S. Wang, M. Khafizov, X. Tu, M. Zheng, T. Krauss, *Nano Lett.* 10(7), 2381–2386 (2010).

[2] N. Aleshin, B. Zhang, P. Aleshin, *SN Applied Sciences*, 1(9) (2019).

[3] S. Fratini, M. Nikolka, A. Salleo, *Nat. Mater.* 19, 491–502 (2020).

**Optimized 3-step thermal evaporation of  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  thin films  
for optoelectronic applications**

*A. Dalal<sup>1</sup>, I. Sayarov<sup>2</sup>, A. Chouprik<sup>1</sup>, A. Tameev<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

*<sup>2</sup>Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: dalal.a@mipt.ru*

Lead-free double perovskites like  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  are promising alternatives to toxic lead-based perovskites, yet challenges persist in fabricating defect-free films for optoelectronics. This study demonstrates thermal evaporation as a scalable, vacuum-based technique to produce high-quality & stable  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  thin films (TF) with controlled stoichiometry and morphology.

The  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  double perovskite thin-film (DPTF) was synthesized using a three-step evaporation process inside the thermal evaporator. The experimental methodology involves the sequential evaporation of three precursors, namely Silver Bromide (AgBr), Bismuth Bromide ( $\text{BiBr}_3$ ), and Caesium Bromide (CsBr), from a tungsten source boat, maintaining an ideal stoichiometric ratio of 1:1.5:2. By optimizing evaporation rates (0.2–0.5 Å/s) and post-annealing (at 200 °C for 12 hours), we achieved TF with enhanced crystallinity and optoelectronic properties.

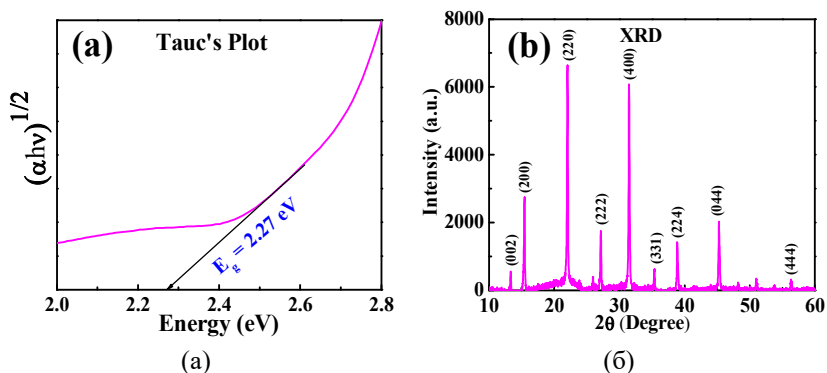


Fig. 1. Tauc's plot of  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6\text{TF}$  for bandgap calculation (a); XRD pattern of  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6\text{TF}$  (b)

Optical characterization (UV-Vis) showed strong visible-range absorption and an indirect bandgap of 2.27 eV [1] calculated from Tauc's plot as shown in Figure 1,a. X-ray diffraction (XRD) confirmed a cubic perovskite phase, with sharp peaks after 200 °C annealing as depicted in Figure 1,b. These peaks are in good agreement with the standard JCPDS (01–084–8699), suggesting a cubic structure ( $a = 11.26 \text{ \AA}$ ), which is consistent with previously reported data [2]. Scanning electron microscopy (SEM) revealed smooth, uniform morphology at lower evaporation rates, while higher rates induced grain aggregation.

Prototype photodetectors incorporating these films achieved a good responsivity and fast switching. These results underscore thermal evaporation's viability for industrial-scale production of  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ -based devices. Further interface engineering and device architecture optimization could enhance performance, advancing eco-friendly optoelectronics.

[1] I. Biswas, A. Dey, A. Dalal, S. Saha, J.-M. Nunzi and A. Mondal, «Stable, self-biased  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  thin film based photodetector by three-step vapor-deposition», *Journal of Alloys and Compounds*, 976, 172903, 2024. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.172903.

[2] G. Abiram, F.H. Gourji, S. Pitchaiya, P. Ravirajan, T. Murugathas, D. Velauthapillai, «Air processed  $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$  lead-free double perovskite high mobility thin-film field-effect transistors», *Scientific Report*, 12, 2455, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-06319-z.



**Development of technologies for fabrication of SERS-active nanostructures for biosensorics**

*S.V. Dubkov, A.M. Tarasov, G.A. Medenkov, D.V. Novikov, D.G. Gromov,  
S.A. Gavrilov*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*e-mail: i@sdbukov.ru*

Recently, the surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) of light has found its application in many fields where it is necessary to detect and identify substances of ultra-small concentrations down to a single molecule. SERS is based on the enhancement of Raman scattering of light in the vicinity of plasmonic metal nanoparticles, which begin to resonate when radiation with a certain wavelength hits them. Plasmonic metals such as gold, silver, and platinum are most used to create SERS substrates.

Among plasmonic metals, silver stands out, which is quite cheap and has the highest gain. However, one of the main disadvantages of such structures is their short-lived durability when stored in air. Over time, as a result of air interaction with nanoparticles, Ag sulfidization occurs, which leads to a decrease in signal amplification. The solution to this problem can be systems where the formation of plasmonic nanoparticles on the surface will be realized as a result of energy impact. An example of such systems are thin films of mutually insoluble components such as Ag-Mo-N-O. After the formation of a thin film of Ag is inside the Mo film and as a result of thermal action an array of plasmonic Ag nanoparticles is formed.

SERS structures can be formed either on the surface of a dielectric substrate (planar substrates) or on a complex curved surface. Planar substrates are used for the study of liquid samples. They have the highest amplification but cannot be used for the study of living cells and organisms. To solve this problem, glass pipettes with a nanoscale tip used in scanning ion conducting microscopy (SICM) are used. As a result of formation of SERS layer on the pipette surface, they can be used simultaneously for cell visualization by SICM and composition analysis by Raman method.

This work demonstrates the methodology of formation of SERS active structures based on Ag-Mo-N-O by ion-plasma deposition. The structures

were formed on the surface of a planar substrate and a SICM pipette. The results of the dependences of film thickness, Ag content in the film, the influence of annealing temperature on the morphology of the array of plasmonic nanoparticles and on the gain coefficients are presented.

*This research was funded by the Russian Science Foundation (Project No. 24-19-00610), <https://rscf.ru/project/24-19-00610/>.*

**Modeling of the electron structure for  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$   
based on density functional theory**

*S.N. Garibova<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup>*Institute of Physics, Baku, Azerbaijan*

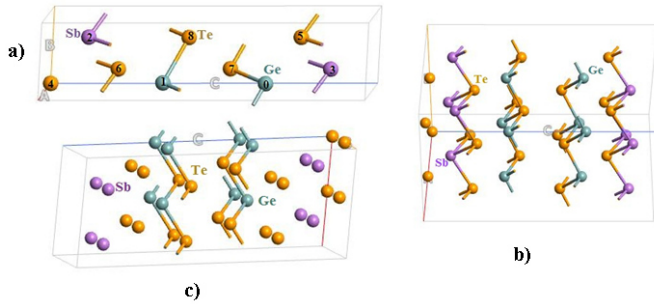
<sup>2</sup>*Khazar University, Baku, Azerbaijan*

*e-mail: sqaribova1@gmail.com*

The first-principles method was employed to study the electronic properties of the chalcogenide semiconductor  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST). Within the framework of density functional theory (DFT), calculations were carried out using the spin-polarized generalized gradient approximation (SGGA) implemented in the Atomistix ToolKit program [1]. A Double Zeta Polarized (DZP) basis set was utilized, and the Perdew–Burke–Ernzerhof (PBE) functional was adopted for the exchange-correlation potential [2, 3]. Brillouin zone integration was performed using the Monkhorst–Pack scheme with a  $2 \times 2 \times 2$  k-point grid, effectively replacing the integration with a summation over special points. Structural optimization of the atomic configuration was conducted using Atomistix ToolKit, resulting in a stable configuration for Ge–Sb–Te. The transport properties, energy spectra, electron density, atomic forces, and spin-dependent physical properties of GST were subsequently calculated.

In the present study, the crystal structure optimization was carried out until the maximum interatomic force dropped below  $0.01 \text{ eV/\AA}$  and the maximum value of the stress tensor fell below  $0.01 \text{ eV/\AA}^3$ , indicating that the equilibrium structural parameters had been achieved. Brillouin zone integration was replaced by a summation over special points using a  $2 \times 2 \times 2$  k-point grid according to the Monkhorst–Pack scheme [4]. The maximum kinetic energy cutoff for the plane-wave expansion of the wave functions did not exceed 150 Ry.

Using the lattice parameters of the hexagonal structure ( $a = b = 4.2 \text{ \AA}$ ,  $c = 17.15 \text{ \AA}$ ,  $c/a = 4.08333$ ,  $b/a = 1$ ) for  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  annealed at 700 K, a primitive cell was constructed in the Atomistix ToolKit software. The structure of the unit cell was analyzed both before and after atomic optimization.



Primitive cell of the hexagonal structure of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (a);  
unit cell before (b) and after atomic optimization (c)

- [1] S. Caravati, M. Bernasconi, T.D. Kühne, M. Krack, M. Parrinello, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21(25), 255501 (2009).
- [2] J.P. Perdew, Y. Wang, *Phys. Rev. B* 45(23), 13244–13249 (1992).
- [3] J.P. Perdew, K. Burke, Y. Wang, *Phys. Rev. B* 54, 16533–16539 (1996).
- [4] H.J. Monkhorst, J.D. Pack, *Physical Review B*, 13(12) 5188–5192 (1976).

**Charge-carrier dynamics in CsPbBr<sub>3</sub> perovskites***D.S. Gets**School of Physics and Engineering, ITMO University, St. Petersburg, Russia**e-mail: dmitry.gets@metalab.ifmo.ru*

Halide perovskites demonstrate a huge number of perspective properties for use in optoelectronics like high defect tolerance, high optical absorption, high quantum efficiencies, long Shockley-Read-Hall recombination times etc. These properties allowed fabrication of a vast variety of high-quality perovskite materials via simple methods like spincoating. High quality perovskite materials found its applications in different optoelectronic devices that work at certain excitation conditions. For example, typically photodiodes need the generated charge-carrier excess to be small ( $<10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ), light-emitting diodes and solar cells need moderate charge carrier densities ( $\approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), and lasers work at extreme conditions ( $>10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ). The selection of halide perovskites with suitable properties is not straightforward especially for laser applications and usually it is based on photoluminescence quantum yield (PLQY) values. But for better understanding of the material applicability for certain optoelectronic application we have to know recombination processes lying behind the charge carrier dynamics.

The investigation of charge carrier dynamics is the one of the most complicated and labor-intensive approaches. Typical approaches such as time-resolved photoluminescence (TRPL) or transient absorption spectroscopy are difficult in realization requiring complex equipment and results in unnecessary long times for the reconstruction of total recombination rates and even longer times for the optimization of charge-carrier dynamics for certain applications thus making it reasonable the search for the simple and more visual approaches of charge-carrier dynamics qualitative estimation.

The purposed methodology is based on the best features of the PLQY and TRPL techniques allowing fast assessment and optimization of CsPbBr<sub>3</sub> perovskites.

**Up-scaling and prototyping of perovskite solar panels**

*P.A. Gostishchev, T.S. Le, L.O. Luchnikov, E.A. Ilicheva, D.A. Gren,  
D.S. Saranin*

*MISIS University, Moscow, Russia*

*e-mail: saranin.ds@mis.ru*

Технология тонкопленочных солнечных ячеек на основе галогенидных перовскитов вступаем в стадию опытной апробации в промышленности [1]. За последние 5 лет в Азии, Европе, Австралии и США открыты более 10 опытных предприятий по однопереходным ячейкам, а также тандем с кремниевыми устройствами. Наибольший прогресс достигнут с применением solution-processing методами печати экструзией. Университет МИСИС представляет технологическую последовательность получения модулей типоразмера  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ , изготовленной в slot die цикле с кристаллизацией при пониженном давлении [2]. В нашем комплексном исследовании представлены результаты исследований смачиваемости зарядо-транспортных и поглощающих слоев, однородность морфологии buried интерфейсов [3,4]. Показано влияние качества гетеропереходов на термические коэффициенты и стабильности перовскитных солнечных модулей. В стандартных условиях КПД масштабированных модулей достиг 16.1% при термическом коэффициенте 0.3. На основе полученного задела представлена перовскитная солнечная панель (на рисунке) из 16 модулей с коммутацией In-Sn-Ag проволокой, стабилизация выходных характеристик имеет экстремумы и монотонный спад.

На образцах спутников проанализированы переходные процессы и исследованы изменения по поведению заряженных ловушек емкостными методами. Полученные результаты раскрывают важную специфику стабилизации перовскитных солнечных батарей при масштабировании.



Экспериментальная перовскитная панель

*The authors gratefully acknowledge the financial support from the Priority 2030 Program in NUST MISIS with project №K2-2022-011.*

- [1] S.-P. Feng et al., Journal of Physics: Materials, 6, 3, 032501 (2023).*
- [2] T.S. Le et al., Solar RRL, 8, 22, 2400437 (2024).*
- [3] P.K. Sukhorukova et al., J Power Sources, 604, 234436 (2024).*
- [4] A.A. Vasilev et al., Optical Materials: X, 16, 100218 (2022).*

**Amorphous chalcogenides: from passive optical elements  
to neuromorphic applications***A.V. Kolobov**Institute of Physics, Herzen State Pedagogical University of Russia,  
St. Petersburg, Russia**e-mail: akolobov@herzen.spb.ru*

The discovery in the 1950s by B.T. Kolomiets and N.A. Goryunova of semiconducting properties of chalcogenide glasses opened an era of amorphous semiconductors. One of the most intriguing features of amorphous chalcogenides, often also referred to as chalcogenide vitreous semiconductors is their ability to reversibly change their structure and, consequently, their properties such as optical absorption, volume, solubility in various solvents etc. Illumination with linearly polarized light in addition induces optical anisotropy [1]. This phenomenon, aka reversible photostructural changes, resulted in various applications of chalcogenide glasses. Examples of such applications include writing waveguides into thin films, creating Bragg gratings, tuning of light emitted by quantum cascade lasers, post-tuning of photonic crystal cavities etc. [2,3].

About 10 years later S.R. Ovshinsky reported the ability of amorphous chalcogenides to switch their conductivity between the high-resistance state and the low-resistance state [4]. This switching can be reversible, in which case the effect is referred to as Ovshinsky threshold switching, or permanent – a memory effect. These effects have been recently implemented in the so-called 3D XPoint memory, introduced into the market jointly by Intel and Micron.

In recent years, investigations in this field are focused on such areas as selector-only memory and multilevel recording. The former is considered superior to memory based on traditional phase-change materials such as Ge-Sb-Te, while the latter forms a foundation for the development of neuromorphic electronic and photonic networks.

In this talk I shall review various processes in amorphous chalcogenides associated with structural transformations and their latest investigations with an accent on their potential uses in neuromorphic devices.



*This work has been supported by a joint grant by the Russian Science Foundation and National Natural Science Foundation of China (China), grant number 25-49-00103.*

- [1] A.V. Kolobov, J. Tominaga, Springer, 288 (2012).*
- [2] B.J. Eggleton, B. Luther-Davies, K. Richardson, Nature Photonics, 5, 141-148 (2011).*
- [3] H. Lin et al., Nature Photonics, 11, 798–805 (2017).*
- [4] S.R. Ovshinsky, Phys. Rev. Lett., 21, 1450 (1968).*

**Selective etching of laser-crystallized thin films of phase-change materials**

*Ya.S. Lebedeva<sup>1</sup>, P.I. Lazarenko<sup>1</sup>, I.A. Budagovsky<sup>2</sup>, M.P. Smayev<sup>2</sup>,  
A.A. Sherchenkov<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

*e-mail: generalova97@gmail.com*

The application of chalcogenide phase-change materials in various photonic and nanoelectronic devices is currently actively investigated [1,2]. Chalcogenide phase-change materials have unique properties, including the ability to change their physical, electrical and optical properties under low energy influences, which make them one of the promising materials with a wide range of applications.

The goal of this work was to develop the technology of topological patterning of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  thin films by liquid etching. The samples studied were thin films of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  with a thickness of 130 nm deposited on glass and silicon substrates by magnetron sputtering. The crystalline regions were formed using continuous-wave laser irradiation at a wavelength of 532 nm with a power in the range of 40 to 200 mW. Liquid etching was performed in tetramethylammonium hydroxide solutions with concentrations of 25% and 0.125%. The etching rate of both the amorphous and crystalline phases was determined, and pattern formation was carried out due to the etching selectivity of crystalline and amorphous phases.

So, the etching technology was developed allowing the formation of a topological pattern of the  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  thin film.

*This work was supported by the Russian Science Foundation (grant number 24-19-00158).*

[1] T. Cao, M. Cen, *Fundamentals and Applications of Chalcogenide Phase-Change Material Photonics*, *Adv. Theory Simul*, 2 (8), 1-17 (2019).

[2] С.А. Козюхин, Лазаренко П.И., А.И. Попов, И.Л. Еременко, *Материалы фазовой памяти и их применение*, *Успехи химии*, 91(9), (2022).

**Электронные свойства кристаллов  $\text{CuInS}_2$ : расчёты из первых принципов и эллипсометрические измерения**

*I.A. Mamedova<sup>1</sup>, I.Q. Qasimoglu<sup>1</sup>, Z.A. Jahangirli<sup>1,2</sup>,  
S.S. Ragimov<sup>2,1</sup>, T.G. Mammadov<sup>1</sup>, N.A. Abdullayev<sup>1,2</sup>*

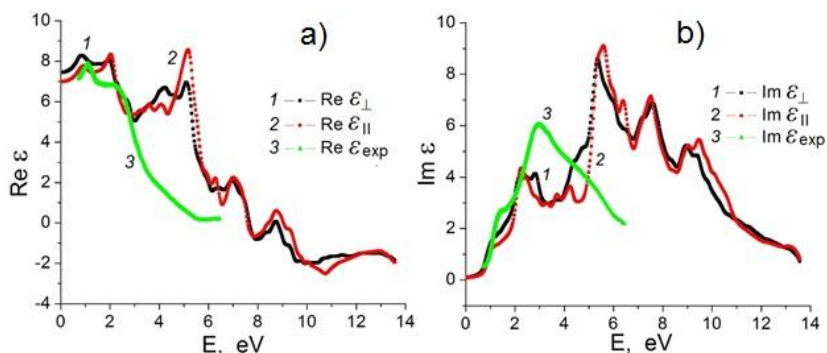
<sup>1</sup>*Институт физики Мин. науки и обр. Азербайджана,  
Баку, Азербайджан*

<sup>2</sup>*Бакинский Государственный Университет,  
Баку, Азербайджан*

*e-mail: abnadir@mail.ru*

Соединения I-III-VI<sub>2</sub> являются тройными аналогами известных соединений ZnS и CdS.  $\text{CuInS}_2$ , кристаллизуются в тетрагональную, халькопиритную структуру с пространственной группой  $I\bar{4}2d$ . Элементарная ячейка  $\text{CuInS}_2$  содержит 8 атомов. С одной стороны, кристаллы  $\text{CuInS}_2$  привлекают внимание исследователей в связи с высоким двулучепреломлением и потому они потенциально интересны как нелинейные оптические материалы. С другой стороны, величина ширины запрещенной зоны  $\text{CuInS}_2$  позволяет использовать эти кристаллы в качестве элементов эффективных солнечных фотоэлектрических преобразователей.

В настоящей работе оптические свойства кристаллов  $\text{CuInS}_2$  исследованы экспериментально методом спектральной эллипсометрии, а также теоретически из первых принципов с использованием теории функционала плотности (DFT). Из эллипсометрических исследований в интервале энергий 0,7–6,5 эВ определены действительные и мнимые части диэлектрической функции (на рисунке, кривые 3), дисперсия коэффициентов преломления, экстинкции и поглощения. Проектированные на атомы парциальные плотности состояний (PDOS), электронная зонная структура, происхождение энергетических состояний, оптические функции при поляризациях падающего света вдоль и перпендикулярно оптической оси кристалла (на рисунке, кривые 1 и 2) определены расчётами из первых принципов [1].



Действительные ( $\text{Re } \epsilon$ ) (a) и мнимые ( $\text{Im } \epsilon$ ) (b) части диэлектрической функции  $\text{CuInS}_2$  (1, 2 – теория: 1 - перпендикулярно тетрагональной оси  $c$  ( $\perp$ ); 2 - вдоль тетрагональной оси  $c$  ( $\parallel$ ); 3 - эксперимент)

Проведено сравнение результатов, теоретически рассчитанных из первых принципов, с экспериментальными данными настоящей работы, полученными методом спектральной эллипсометрии.

[1]. Z.A. Jahangirli, I.Q. Qasimoglu, Kh.A. Hidiyev, I.A. Mamedova, J.A. Guliyev, S.S. Ragimov, T.G. Mammadov, and N.A. Abdullayev, *Physics of Wave Phenomena*, **33** (1), 36–45 (2025).

**Analysis of optical absorption in Ge-As-Se and Ge-As-Se-S chalcogenide glass systems using the Belehradek functional model and the Tauc method**

*S.I. Mekhtiyeva<sup>1</sup>, R.I. Alekberov<sup>1,2</sup>, S.M. Mammadov<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>The Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,  
Institute of Physics, Baku, Azerbaijan*

*<sup>2</sup>Azerbaijan State University of Economics (UNEC), Baku, Azerbaijan*

*e-mail: smmemmedov@mail.ru*

Chalcogenide glass exhibits high infrared transparency and possesses desirable properties for various technological applications [1]. Studies have shown that the variation in the optical properties of amorphous semiconductors, as well as the characteristics of their density of states, is due to the lack of sharp band edges, in contrast to crystalline materials [2,3].

The purpose of the present work is to investigate deviations from the Tauc law and to determine the actual energy dependence of the density of states. This is achieved through a comparative analysis using power-law and exponential models, alongside experimental data of the absorption coefficient ( $\alpha$ ) as a function of photon energy ( $h\nu$ ) in both the Tauc region (strong absorption above the mobility edge) and the Urbach tail region in Ge-As-Se and Ge-As-Se-S chalcogenide glass semiconductors.

Experimental findings indicate that deviations from the Tauc relationship occur in both simple and complex chalcogenide glasses [4]. A comparative mathematical analysis between the Belehradek-type functional form and experimental data reveals that the exponent  $n$  in the relation  $\alpha \cdot h\nu \sim A \cdot (h\nu - E_g)^n$  takes values of  $n = 1.59$  for  $\text{Ge}_4\text{As}_{14}\text{S}_2\text{Se}_{80}$  and  $n = 1.37$  for  $\text{Ge}_{33}\text{As}_{17}\text{S}_{35}\text{Se}_{15}$ . These values are close to  $n \approx 3/2$ , with minor deviations attributable to the presence of direct forbidden optical transitions [5].

In contrast, the analysis of  $\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{S}_{10}\text{Se}_{60}$  and  $\text{Ge}_{26}\text{As}_{18}\text{S}_{30}\text{Se}_{26}$  shows exponents of  $n = 1.9$  and  $n = 2.1$ , respectively. These values are closer to  $n \approx 2$ , which suggests that optical absorption in these materials primarily occurs via indirect allowed transitions [5].

[1] Margarita Dronova, Alexander Semencha, *Water absorption and moisture resistance of As-S-Se-I glasses*, *Materials Today: Proceedings* 30, p.456-461.

[2] Mott, N.F. and Davis, E.A. (1979). *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*, Clarendon Press, Oxford.

[3] Jai Singh and Koichi Shimakawa *Advances in Amorphous Semiconductors*, 2003, Taylor Francis, p.324.

[4] Tauc, J. (1968). *Mat. Res. Bull.*

[5] S.K. Mohamed, M.M. Abd El-Raheem, M.M. Wakkad, A.M. Abdel Hakeem, H.F. Mohamed *Structural, optical, and electrical characteristics of Ge<sub>18</sub>Bi<sub>4</sub>Se<sub>78</sub> chalcogenide glass for optoelectronic applications*. *Memories - Materials, Devices, Circuits and Systems* 6 (2023) 100085.

*О проводимости графена**G. Shpenkov**Бельско-Бяла, Польша**e-mail: g.shpenkov@gmail.com*

Частное решение волнового уравнения в сферических полярных координатах даёт расположение узлов стоячих волн в трёхмерном сферическом пространстве. Это решение впервые было представлено нами в графическом виде. Структура узлов стоячих волн подобна кристаллическим [1-3]. Расположенные последовательно в соответствии с квантовыми числами  $l$  и  $m$ , графические образы решения (с пронумерованными нами потенциальными узлами) образуют систему, которая, как оказалось, чётко коррелирует с периодичностью расположения элементов в периодической системе Д.И. Менделеева.

В итоге была обнаружена связь полученных решений с внутренней пространственной структурой атомов. Это неудивительно, поскольку атомы, как и все сущее во Вселенной, находящееся в состоянии постоянного колебательно-волнового движения, имеют волновую природу. Для прямой экспериментальной проверки открытия был выбран углерод, как один из наиболее распространённых элементов в природе, и его двумерное образование – графен.

Атом углерода  $6\text{-C-}^{12}$ , как следует из полученных в графическом виде решений, представляет собой элементарную нуклонную молекулу, оболочечно-узловая структура которого имеет: 5 полярных потенциально-кинетических узлов, расположенных вдоль оси  $z$  (при  $m=0$ ), это узлы покоя и движения одновременно, а потому в данном стабильном изотопе углерода они пустые (незаполненные нуклонами); 6 кинетических полярно-азимутальных (пустых) узлов; 6 заполненных спаренными нуклонами потенциальных полярно-азимутальных узлов на двух волновых полярно-азимутальных оболочках – 2 узла на внутренней ( $l=1, m=\pm 1$ ) и 4 узла на внешней ( $l=2, m=\pm 1$ ) оболочках.

Двумерная гексагональная решётка графена, образованная из атомов углерода, имеющих оболочечно-узловое строение, должна быть анизотропной. Это, естественно, должно отражаться на физических параметрах графена, в частности, на его электрической проводимости. Эксперименты



по проверке анизотропии последней проводились на ненапряжённом первородном графене, на специально приготовленных образцах круглой формы. На основании полученных данных построены полярные диаграммы температурной зависимости проводимости. Все они имеют типичную для анизотропных материалов эллипсоидальную форму. Вдоль одного из направлений в плоскости графен ведет себя как полупроводник. В перпендикулярном направлении, вдоль цепочки связанных в графене пустых полярных потенциально-кинетических узлов, сопротивление в графене практически не зависит от температуры, подвижность носителей заряда высока – максимальна среди всех известных материалов.

Таким образом, анизотропия графена, следующая из оболочечно-узловое строения атомов углерода, была подтверждена экспериментально, а тем самым подтверждена и их волновая природа. Двумерная гексагональная решётка графена имеет вращательную симметрию 2-го порядка. Невидимые полярные узлы, расположенные вдоль оси симметрии  $z$  (при  $m=0$ ), будучи связанными друг с другом, образуют в кристалле графена параллельную систему пустых каналов, благоприятствующих «баллистическому» (без рассеяния) движению носителей зарядов.

Поэтому становится понятным и объяснимым теперь, почему «Graphene...is an interesting mix of a semiconductor...and a metal» и «Electrons in graphene ... have very long mean free paths» [4], а также почему «Carbon nanotubes can be metallic or semiconducting...» [5].

[1] G.P. Shpenkov, Chapter 7 in «*The Mathematic of the Periodic Table*» (Nova Sci. Publishers, NY) 119-160 (2006).

[2] G.P. Shpenkov, Chapter 12 in «*Quantum Frontiers of Atoms and Molecules*» (Nova Science Publishers, NY) 277-324 (2011).

[3] Г.П. Шпенков, Механизм образования связей в соединениях атомов, имеющих оболочечно-узловое строение. Сб. трудов Международной конф. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», ФТИ им. Иоффе, СПб 3–5 июля 2023 г., 155–156.

[4] A.H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov and A. K. Geim, *The electronic properties of graphene*, Rev. Mod. Phys. 81 (2009).

[5] Tsuneya Ando, *The electronic properties of graphene and carbon nanotubes*, Review, NPG Asia Materials (2009) 1, 17–21; doi:10.1038/asiamat.2009.1.

**Laser-induced modification of chalcogenide vitreous semiconductor films: periodic surface nanorelief, optical anisotropy and photoluminescence**

*D.V. Shuleiko<sup>1</sup>, E.V. Kuzmin<sup>2</sup>, D.V. Pepelyaev<sup>3</sup>, P.P. Pakholchuk<sup>2</sup>,  
S.A. Kozyukhin<sup>3</sup>, P.K. Kashkarov<sup>1,4</sup>*

*<sup>1</sup>Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

*<sup>3</sup>Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian  
Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*<sup>4</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

*e-mail: shuleyko.dmitriy@physics.msu.ru*

Chalcogenide vitreous semiconductors (ChVS) possess significant interest for infrared (IR) photonics and optical storage media due to their transparency in the near-IR range [1], reversible phase transitions [2] and possibility to form laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on them, when applying laser pulses of femtosecond (FS) duration [3]. In the latter case, optical anisotropy can emerge as a result of high-contrast submicron surface relief formation, which is promising for creating polarizing IR optics. In addition to the surface nanorelief formation, laser irradiation with band gap light leads to well-known photostructural transformations [4] in ChVS, such as photodarkening and photobleaching, associated with the formation/rupture of «wrong» homopolar bonds in these materials. Such changes can be detected by photoluminescence (PL) spectroscopy methods.

Thus, in our work, we aimed to form a surface relief possessing optical anisotropy on ChVS As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> and As<sub>50</sub>Se<sub>50</sub> thin films using FS laser pulses; for As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> films we additionally analyzed PL properties to identify laser-induced photostructural changes in them.

Modification of As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> and As<sub>50</sub>Se<sub>50</sub> thin (850 ± 5 nm) films prepared by thermal evaporation in vacuum was carried out with FS laser pulses (Satsuma Amplitude Systems, second optical harmonic 515 nm, 300 fs) with fluence  $E$  varied from 8 to 270 mJ/cm<sup>2</sup> and pulses number  $N$  from 10 to 1600 respectively, to produce different LIPSS types.

On the irradiated surface, LIPSS with periods in the subwavelength ( $\sim 170$  nm) and wavelength ( $\sim 500$  nm) ranges were revealed by scanning electron and atomic force microscopy. The formed gratings are attributed to the high spatial frequency LIPSS (HSFL) and low spatial frequency LIPSS (LSFL) types, with their ridges directed parallel or orthogonal to the laser polarization, respectively. The mode of fabricating a hierarchical structure consisting of mutually orthogonal HSFL and LSFL gratings was also selected at  $E = 34$  mJ/cm<sup>2</sup> and  $N \sim 1000$ .

Polarization-sensitive optical transmission microscopy revealed the presence of an optical retardance of up to 30 nm at 633 nm wavelength in the laser-modified thin As<sub>50</sub>Se<sub>50</sub> film. For the near-IR range the difference in the refractive indices of ordinary and extraordinary waves was up to 0.1, determined from the position of the interference maxima in the IR spectrum.

The PL emission spectra of both initial and laser-modified As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> films demonstrate broadband signal in 1.6–2 eV range, consisting of two bands centered at 1.65 and 1.8–1.9 eV for the initial films, and only one band at 1.7–1.9 eV for the modified ones. Twofold increase in the PL intensity is observed for the modified As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> films, owing to laser-induced creation of defect states in the Urbach edge. Namely, the concentration of homopolar bonds that act as radiative recombination centers for carriers presumably increases, while paramagnetic defects in a form of S dangling bonds, registered by electron paramagnetic resonance spectroscopy, do not contribute to PL.

*This work was supported by Russian Science Foundation (grant 22-19-00035-II).*

[1] J.S. Sanghera, L.B. Shaw, L.E. Busse, *et al. Fiber and Integrated Optics* 19(3) 251 (2000).

[2] S. Zobotnov, A. Kolchin, D. Shuleiko, *et al. Micro* 2, 88 (2022).

[3] E. Kuzmin, S. Zobotnov, D. Shuleiko, *et al. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 88(Suppl.3), S370–S374 (2024).

[4] J.P. De Neufville, S.C. Moss, S.R. Ovshinsky, *J. Non-Cryst. Solids*, 13(2), 191–223 (1974).

**Modification of thin  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  films with light beams of different spatial structure and their application for control of laser radiation parameters***M.P. Smayev<sup>1,2</sup>*<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia*<sup>2</sup>*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia**e-mail: smayev@lebedev.ru*

Phase-change materials in the form of thin chalcogenide films are well known for their potential for various optical applications, as they are characterized by fast reversible switching between amorphous and crystalline phase states, which differ significantly in their electrical and optical properties. Despite the fact that many processes that cause switching between phases have been studied quite actively, there are currently a large number of fundamental and applied questions, the solution of which will significantly improve the understanding of the mechanisms and increase the efficiency of the devices being created. Laser switching is attractive for inducing transformations of phase-change materials because it allows control of various parameters responsible for switching (such as exposure time, polarization, spectral and energy characteristics of the acting radiation, localization of the optical effect) in a very wide range.

This study presents the features of photoinduced crystallization of thin amorphous  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  films exposed to laser beams with different spatial structures. Optical modification of thin films of phase-change material was carried out by linearly polarized Hermite-Gaussian modes  $\text{HG}_{00}$  ( $\text{TEM}_{00}$ ) and  $\text{HG}_{01}$ , linearly or circularly polarized Laguerre-Gaussian modes  $\text{LG}_{01}$ , as well as cylindrical beams with radial or azimuthal polarization [1]. It is demonstrated that laser beams with ring-shaped intensity profile are more efficient and convenient for optical crystallization compared to the fundamental Hermite-Gaussian mode  $\text{HG}_{00}$  due to a more uniform temperature distribution within the irradiated region. To evaluate the efficiency of the selected mode and to analyze the degree of crystallinity within the modified regions, optical microscopy with digital brightness filtering and Raman spectroscopy were used.

The use of structured beams for modification of thin  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  films can also be useful for the inverse problem, i.e. for reconstructing the parameters of the modifying beam based on the characteristics of the transformed region of the film. To implement this approach, the features of laser crystallization and ablation of the amorphous  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  film under the action of cw visible radiation of the Hermite-Gaussian mode  $\text{HG}_{01}$ , characterized by two intensity maxima, were examined in more detail. Depending on the power density of the light beam, the effect of  $\text{HG}_{01}$  on  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  could lead to two-zone crystallization and ablation, which, in turn, allowed the observation of Young's fringes in the far-field zone for the probe beam passing through the sample, similar to interference from two point sources. The spatial period of the observed interference pattern allows one to reconstruct the characteristics of both the modifying mode  $\text{HG}_{01}$  and the original laser mode  $\text{HG}_{00}$  before its conversion [2,3].

[1] M.P. Smayev, P.A. Smirnov, I.A. Budagovsky, M.E. Fedyanina, V.B. Glukhenkaya, A.V. Romashkin, P.I. Lazarenko, S.A. Kozyukhin, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 633, 122952 (2024).

[2] I.A. Budagovsky, P.A. Smirnov, A.S. Zolot'ko, P.I. Lazarenko, M.P. Smayev, *Physics of Wave Phenomena*, 32, 393-400 (2024).

[3] I.A. Budagovsky, P.A. Smirnov, M.P. Smayev, P.I. Lazarenko, «Device for determining parameters of focused laser beam». Patent RU 2827964 C1. Published: 04.10.2024. Bull. No. 28.

**Amorphization of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  thin films by femtosecond single-pulse laser irradiation**

*P.A. Smirnov<sup>1,2</sup>, T.S. Kunkel<sup>3</sup>, A.V. Romashkin<sup>1</sup>, Yu.V. Vorobyov<sup>3</sup>,  
M.P. Smayev<sup>1,4</sup>, P.I. Lazarenko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Laser and Devices, Zelenograd, Russia*

<sup>3</sup>*Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia*

<sup>4</sup>*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: petrsmirnov2009@gmail.com*

The compound  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST225) is a promising material for advanced optical photonic devices due to its phase transitions between crystalline and amorphous states under various influences, for example laser irradiation. The phase transitions in GST225 thin films have been extensively studied. However, the amorphization process induced by ultrashort laser pulses remains poorly understood, although it is priority responsible for the energy consumption of the optical device.

Amorphous 130-nm thin films were deposited onto glass substrates by magnetron sputtering of a polycrystalline target. Then the films were annealing at 200°C for 15 minutes to ensure a crystalline GST255 structure. Single femtosecond laser pulses with a wavelength of 1030 nm and a duration of 233 fs were used to amorphized the films.

This study demonstrated the possibility of GST225 thin films amorphization. The energy ranges at which amorphization occurs were identified using Raman spectroscopy. The Gaussian beam profile allowed us to conclude that the threshold energy fluence for the amorphization process is in the range 650–690  $\mu\text{J}/\text{sm}^2$ . Analysis of the irradiated surface using atomic force microscopy revealed a dip in the height of the thickness of the amorphized region, which cannot be explained by changes in the density of the material. These pits may be related to the ablation process.

*The work was carried out in the research laboratory "Materials and Devices of Active Photonics" with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSMR-2025-0002).*

**Phonon-mediated nanoscale thermal transport in phase-transformed and irradiated wide band-gap semiconductors**

Z.N. Utegulov<sup>1</sup>, A. Abdullaev<sup>1,2</sup>, K. Sekerbayev<sup>1,2</sup>, O. Farzadian<sup>1</sup>,  
L. Mukhangaliyeva<sup>1</sup>, I. Tkhorzhevskiy<sup>1</sup>, R. Tlegenov<sup>1</sup>, J. O'Connell<sup>3</sup>,  
A. Azarov<sup>4</sup>, A. Kuznetsov<sup>4</sup>, Y. Zhang<sup>5</sup>, W. Weber<sup>6</sup>, Y. Wang<sup>2,7</sup>

<sup>1</sup>*Department of Physics, School of Sciences and Humanities,  
Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan*

<sup>2</sup>*Center of Energy and Advanced Materials Science,  
National Laboratory of Astana, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan*

<sup>3</sup>*Center for High Resolution Transmission Electron Microscopy,  
Nelson Mandela University, Summerstrand, Port Elizabeth, South Africa*

<sup>4</sup>*Department of Physics and Centre for  
Materials Science and Nanotechnology, University of Oslo, Norway*

<sup>5</sup>*Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University,  
Kingston, Canada*

<sup>6</sup>*Department of Materials Science and Engineering, University of Tennessee,  
Knoxville, TN, USA*

<sup>7</sup>*Department of Chemical and Materials Engineering, School of Engineering  
and Digital Sciences, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan*

*e-mail: zhutegulov@nui.edu.kz*

We demonstrate the results of phonon-mediated nanoscale thermal transport in novel wide-bandgap semiconductors such as phase-transformed Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ion irradiated nanostructured SiC explored for potential applications in high power electronics and advanced nuclear reactors, respectively. In both systems the cross-plane thermal conductivity  $k$  was measured by femtosecond laser-based time-domain thermoreflectance (TDTR) with MHz modulation rates.

The depth profiles of  $k$  across the  $\gamma$ -/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> structures was obtained resulting in  $k$  of  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ranging from 1.84 to 2.11 W/m K was found to be independent of the initial  $\beta$ -substrates orientations, in accordance with the cubic spinel structure of the  $\gamma$ -phase and consistently with the molecular dynamics simulation. In turn, the thermal conductivity of monoclinic  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> showed a distinct anisotropy, with values ranging from 10 W/m K for  $[-201]$

to 20 W/m K for [010] orientations. Thus, for double  $\gamma$ -/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> polymorph structures formed on [010]  $\beta$ -substrates, there is an order of magnitude difference in thermal conductivity across the  $\gamma$ / $\beta$  interface. The reason for the low  $k$  of  $\gamma$ -phase is accounted for by a potential strain accumulation after phase transformation and low phonon mean free path (MFP), therefore thermal conductivity in these structures is dominated mostly by the vibrational modes with short MFP.

We also explore the synergistic effect of nano-structuring and point defect (PD) concentration on thermal transport in SiC. We demonstrate superior radiation tolerance in SiC thin films nano-engineered by low pressure chemical vapor deposition. Minimal relative drop in heat conductivity  $k$  under ion irradiation in nanostructured SiC was detected compared to that in SiC with micro- and macro- sized grains. These experimental results are supported by molecular dynamics (MD) simulations, which show that high-density stacking faults (SFs) in SiC, spaced within a few nanometers from each other, effectively facilitate the recombination of PDs, thereby recovering thermal transport. Even at elevated damage levels (up to 0.034 displacements per atom), the decline in  $k$  is less severe in systems with SFs compared to those with only PDs. These findings are also supported by our complementary calculations using the Boltzmann transport equation and the Klemens phonon scattering model. We also explore interfacial thermal conductance (ITC) across the Si [111] / SiC [111] interface, with Si defected by 6 distinct types of PDs. Our results show that compared to ITC across pristine Si/SiC interface, the carbon vacancies and anti-site defects in SiC can significantly enhance the ITC by approximately  $\sim 170$  MW/m<sup>2</sup>K (16%) at 5% PD concentration with further increase up to 411 MW/m<sup>2</sup>K when nanoscale SiC layer is completely amorphized. The role of propagon heat carriers mediated by various PDs in highly defected and amorphous SiC on the ITC is discussed.



**Structure transition in typical chalcogenide compounds***Yan Cheng**Key Laboratory of Polar Materials and Devices, Ministry of Education,  
East China Normal University, Shanghai, China**e-mail: ycheng@ee.ecnu.edu.cn*

New types of memory technologies have always been the hot research topic in academia and industry. Phase-change memory (PCM) has the advantages of non-volatility and high-speed. Chalcogenide compounds are the key materials of PCM devices, i.e. GeSbTe, SbTe, and so on. As device sizes continue to shrink, even atomic-scale structural changes in memory materials can impact device performance. Hence, it is necessary to intuitively obtain the atomic local structure and the dynamic change process of the atomic arrangement in the storage materials, which is important for the structure regulation of the storage material and the performance optimization of the device unit. In this talk, the atomic-scale structures of GeSbTe and SbTe films were investigated by using spherical aberration corrected transmission electron microscopy (CS-TEM), especially some complex phase transition processes, which will provide theoretical guidance and experimental support for developing high-speed, low-power, high-density non-volatile memory.

**Femtosecond laser fabrication of anisotropic structures in thin amorphous films of silicon and GST225**

*S.V. Zaboltnov<sup>1</sup>, D.V. Shuleiko<sup>1</sup>, E.V. Kuzmin<sup>1,2</sup>, P.P. Pakholchuk<sup>1,2</sup>,  
S.B. Venig<sup>3</sup>, A.A. Serdobintsev<sup>3</sup>, L.D. Volkovoyanova<sup>3</sup>, M.N. Martyshov<sup>1</sup>,  
A.V. Kolchin<sup>4</sup>, V.B. Glukhenkaya<sup>5</sup>, P.I. Lazarenko<sup>5</sup>, S.A. Kozyukhin<sup>4</sup>,  
P.K. Kashkarov<sup>1,6</sup>*

*<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia*

*<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia*

*<sup>3</sup>Saratov State University, Saratov, Russia*

*<sup>4</sup>Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS,  
Moscow, Russia*

*<sup>5</sup>National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*<sup>6</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

*e-mail: zaboltnov@physics.msu.ru*

Advanced technologies of photonics and microelectronics mean designing compact planar elements for integrated photonic circuits and data storage based on silicon or chalcogenide semiconductors. Thus, femtosecond laser pulses irradiation of thin films based on these materials might change their phase states (amorphous or crystalline) and provide surface texturing via fabrication of laser-induced periodic surface structures (LIPSSs) with micron and even submicron periods [1–4]. Such structures can be considered as metasurfaces with artificial anisotropy.

In our work, we fabricated thin films of amorphous silicon (600–1000 nm) and Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> (GST225, 130–200 nm) by magnetron sputtering. The films modification was realized by femtosecond laser irradiation using by Satsuma Amplitude Systems (300 fs, 515 or 1030 nm) or Avesta (125 fs, 1250 nm) lasers. We obtained separate craters, as well as lines and squares up to 1x1 cm<sup>2</sup> in a raster mode.

As a result of the femtosecond laser irradiation, we revealed the LIPSS occurrence both in the silicon and GST225 films. The periods of the surface gratings obtained are close to the wavelengths used. The appearance of the LIPSSs is caused by photoinduced surface plasmon-polaritons generation and is confirmed by calculations with the Sipe–Drude theory [1, 5].

The laser-induced modification was accompanied by crystallization, which was analyzed by Raman spectroscopy. In addition, the re-amorphization process was observed in GST225 films with increasing laser exposure. This reversible phase transition can be explained by the rapid solidification of the laser-induced melt from the earlier crystallized matter and be confirmed by calculations using the two-temperature model.

Laser-modified areas exhibit optical and electrophysical anisotropy. The measured infrared spectra (1.9–2.7  $\mu\text{m}$ ) indicate the presence of both dichroism (up to 0.12  $\mu\text{m}^{-1}$ ) and birefringence (up to 0.2) in the irradiated silicon-based samples. The silicon nanocrystal occurrence leads to growth of the specific conductivity up to 3 orders for the irradiated samples in comparison with non-irradiated ones. The in-plane conductivity anisotropy was also revealed.

Additionally, the GST225 films with LIPSSs exhibit reflectance anisotropy in the near infrared range. The strong anisotropy of the conductivity was revealed for these samples in the temperature range of 200–400 K. The in-plane DC conductivity of the modified films differs by up to 5 orders of magnitude for two orthogonal directions.

The observed artificial optical and electrophysical anisotropy can be explained both by the formation of LIPSS and by the presence of periodic laser tracks as a result of irradiation in the raster mode. The presence of periodic relief leads to a change in the depolarization factors for different directions in the plane of the samples. This hypothesis is confirmed by calculations using the generalized Bruggeman model [2].

Thus, the silicon and GST225 films with LIPSSs can be considered as a promising base to design planar devices which are sensitive to the incident light polarization or the applied current direction.

*The investigation was partially funded by the Russian Science Foundation grant # 22-19-00035-II, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00035/>.*

[1] S. Zobotnov, A. Kolchin, D. Shuleiko, et al., *Micro*, 2, 88–99 (2022).

[2] A. Kolchin, D. Shuleiko, M. Martyshov, et al., *Materials*, 15, 3499 (2022).

[3] D. Shuleiko, S. Zobotnov, M. Martyshov, et al., *Materials*, 15, 7612 (2022).

[4] D. Shuleiko, S. Zobotnov, O. Sokolovskaya, et al., *Materials*, 16, 4524 (2023).

[5] J. Bonse, A. Rosenfeld, J. Krüger, *J. Appl. Phys.*, 106, 104910 (2009).

## Содержание

<b>Морозов А.П.</b> Модификация интерфейсов перовскитных фотодиодов для рентгеновских систем визуализации непрямого преобразования .....	3
<b>Мухаметкаримов Е.С., Приходько О.Ю., Немкаева Р.Р., Гусейнов Н.Р., Толенов Ж.К., Оман З.</b> Кинетика кристаллизации тонких пленок аморфного селенида индия .....	5
<b>Мухин И.С., Федоров В.В.</b> Эпитаксиальные слои GaP на сапфире с малыми оптическими потерями для фотонных интегральных схем.....	6
<b>Нагиев Т.Г., Бабаева Р.Ф., Рзаев Р.М.</b> Исследование методом ДСК облученных нейтронами наночастиц $\text{Si}_3\text{N}_4$ при низкой температуре .....	9
<b>Наджафов А.И., Махмудова Г.Р., Джахангирли З.А., Алиева В.Б., Бадалова З.И., Мамедов Т.Г., Абдуллаев Н.А.</b> Экспериментальные и теоретические исследования рамановских спектров кристаллов системы твердых растворов $\text{TlGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}_2$ .....	11
<b>Налимова С.С., Мошников В.А.</b> Атомно-молекулярный дизайн и наноархитектоника новых функциональных материалов.....	13
<b>Неверовская А.Ю., Возняковский А.П., Калинин А.В.</b> Модификация малослойного графена с целью получения устойчивой дисперсии.....	15
<b>Невзоров А.А., Проходцов А.И., Ковалюк В.В., Лазаренко П.И., Светухин В.В., Голиков А.Д., Козюхин С.А., Гольцман Г.Н.</b> Фазопеременные халькогенидные полупроводники в устройствах интегральной фотоники .....	17
<b>Павлов С.И., Певцов А.Б.</b> Резонансная фотоника метаповерхностей на основе гидрогенизированных аморфных полупроводников.....	19

<b>Паняев И.С., Итрин П.А., Коробко Д.А., Скрипачев В.И., Фотиади А.А.</b> Развитие средств бриллиантовой волоконной оптики для тестирования халькогенидных материалов .....	20
<b>Парочкин А.В., Савичев И.А., Марголин И.Г., Чуприк А.А.</b> Интеграция сегнетоэлектрических пленок $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ с тонкопленочными полупроводниками для создания устройств гибкой электроники.....	22
<b>Пестова В.Б., Толкач Н.М., Горошко Д.Л., Ромашкин А.В., Пестов Г.Н., Смаев М.П., Сауров М.А., Кицюк Е.П., Лазаренко П.И.</b> Перестраиваемые отражающие оптические элементы на основе тонких пленок фазопеременного материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ для устройств энергонезависимого отображения информации.....	24
<b>Петрова В.И., Козлов С.С., Алексеева О.В., Никольская А.Б., Карягина О.К., Шевалеевский О.И.</b> Получение и исследование тонких аморфных слоев органических красителей для использования в солнечных элементах.....	26
<b>Пономарев Р.С., Паньков А.С.</b> Сборка фотонных интегральных схем: оптимальные стратегии ввода-вывода излучения .....	28
<b>Приходько О.Ю., Кожакенова А.К., Колобов А.В., Гусейнов Н.Р., Толепов Ж.К., Мухаметкаримов Е.С., Исмаилова Г.А., Капанов А.С., Пешая С.Л., Максимова С.Я.</b> Структура и свойства пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , модифицированных азотом.....	29
<b>Проходцов А.И., Невзоров А.А., Ковалюк В.В., Лазаренко П.И., Кицюк Е.П., Голиков А.Д., Козюхин С.А., Гольцман Г.Н.</b> Исследования динамики переключения состояний интегральных фотонных устройств с перестраиваемыми элементами на основе фазопеременных халькогенидов.....	30
<b>Прудченко К.К., Калиновский В.С., Теруков Е.И., Контрош Е.В., Толкачев И.А.</b> Влияние термоциклирования на параметры кремниевых гетеропереходных солнечных элементов .....	32

<b>Раянова К.А., Бабенко С.И., Брылева А.С., Канаев К.В., Кудрявцев О.А., Нигаматуллина Р.Р., Судакова А.Д., Щегольков А.В., Бобринецкий И.И., Комаров И.А.</b> Особенности локальной модификации пленок оксида графена лазерным излучением с импульсом микросекундной длины .....	34
<b>Рыбина Н.В., Колчин А.В., Рыбин Н.Б., Смаев М.П., Будаговский И.А.</b> Влияние лазерного облучения на рельеф и структуру пленок GST225.....	36
<b>Сафонова А.А., Провоторов П.С., Кононов А.А., Ильинский А.В., Климов В.А., Шадрин Е.Б.</b> Влияние легирования алюминием на оптические свойства моноклинной фазы диоксида ванадия .....	38
<b>Саяров И.Р., Dalal А., Тамеев А.Р.</b> Формирование поликристаллических пленок двойного галогенидного перовскита и их электрические свойства.....	39
<b>Сень В.В., Ануфриев Ю.В., Дюдьбин Г.Д., Аниканов А.А.</b> Влияние параметров синтеза на свойства алмазных пленок, выращенных методом MW PECVD на полупроводниковых и диэлектрических подложках.....	41
<b>Синев И.С.</b> Материалы с фазовой памятью в фотонике .....	443
<b>Синельник А.Д.</b> Мета-оптические системы на основе GeSbTe.....	44
<b>Смирнов А.С., Гарбузов К.Н., Косолобов С.С., Земцов Д.С., Земцова А.К., Вергулес А.И., Тазиев К.Р., Жигунов Д.М., Пшеничнюк И.А., Драчев В.П.</b> Быстрое прототипирование фотонных интегральных схем на кремнии.....	45
<b>Смирнова С.П., Смердов Р.С.</b> Исследование эмиссионных параметров прототипа нового низковольтного катода.....	46
<b>Совтус Н.В., Мынбаев К.Д.</b> Закон Джоуля-Ленца для гиперболического уравнения теплопроводности в аморфном халькогенидном полупроводнике .....	48

<b>Соколова Т.Ю., Кулагин Б.Ю., Барбаков Е.А., Бутманов Д.Д.</b> Цифровая интерактивная киберфизическая модель установки магнетронного распыления.....	50
<b>Сон А.Г., Гущина В.А., Тамеев А.Р., Козюхин С.А.</b> Исследование корреляций состав-структура-оптические свойства в наночастицах Cs-Pb-Br .....	51
<b>Степарук А.С., Иргашев Р.А., Казин Н.А., Русинов Г.Л., Текишина Е.В., Козюхин С.А., Емец В.В., Толкач Н.М., Лазаренко П.И.</b> Молекулярный дизайн и синтез органических красителей со структурой D- $\pi$ -A и A- $\pi$ -D- $\pi$ -A для их применения в сенсibilизированных красителем солнечных элементах .....	52
<b>Тамеев А.Р.</b> Галогенидные перовскиты для детектирования рентгеновского излучения .....	53
<b>Тарванен Д.А.</b> Технологическое оборудование для микрообработки материалов и интегральной фотоники .....	54
<b>Тверьянович Ю.С.</b> Стеклообразные неорганические полупроводники с повышенной пластичностью .....	55
<b>Текишина Е.В., Степарук А.С., Крупанова Д.А., Шулейко Д.В., Емец В.В., Козюхин С.А.</b> Стабильность солнечных элементов, сенсibilизированных красителями на основе тиено[3,2- <i>b</i> ]индола, и их модификация.....	57
<b>Терехов Д.Ю., Эль-Хадж Л.А., Волощук И.А., Русакевич Ю.В.</b> Фазопеременные материалы для создания термоэлектрических генераторов.....	59
<b>Теруков Е.И.</b> Разработка промышленной технологии дешевых и эффективных солнечных батарей для космических аппаратов ближнего Космоса .....	61

<b>Теруков Е.И., Утамурадова Ш.Б., Панайотти И.Е., Атабоев О.К., Михайлов О.П.</b> Влияния температуры на эксплуатационные характеристики НЖТ элементов в диапазоне 173 – 373 К.....	63
<b>Толкач Н.М., Казанков А.Н., Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Трусов М.А.</b> Современное зондово-оптическое промышленное и научное оборудование для исследований аморфных и микрокристаллических полупроводниковых материалов .....	65
<b>Толкач Н.М., Вишняков Н.В., Козодаев Д.А., Литвинов В.Г., Якубов А.О.</b> Оптимизация спектральных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания от степени кристалличности для многослойных структур на основе материалов системы Ge-Sb-Te.....	67
<b>Травкин В.В., Якубов М.Р.</b> Фотопреобразователи на основе этиопорфирина дифторида кремния.....	69
<b>Трактирищikov В.С., Ширяев М.Е.</b> Разработка и применение электростатического крепежного устройства для технологического микроэлектронного оборудования .....	71
<b>Троян Е., Смирнов А., Степанов А., Жовнерик Н.</b> Формирование кристаллической фазы в халькогенидных полупроводниках нового поколения .....	73
<b>Трусов Е.П., Ермачихин А.В., Воробьев Ю.В., Литвинов В.Г.</b> Влияние отжига и естественного старения на электрические свойства фазопеременных материалов системы GeTe – Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> .....	75
<b>Устинов А.Б.</b> Оптоэлектронные СВЧ-генераторы .....	76
<b>Утамурадова Ш.Б., Файзуллаев К.М., Зарифбаев Ж.Ш.</b> Рамановская спектроскопия дефектов в n-Si с примесями хрома и эрбия .....	77
<b>Федянина М.Е., Пестова В.Б., Сагунова И.В., Шерченков А.А.</b> Исследование стабильности оптических свойств тонких пленок Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>5</sub> .....	79



<b>Фефелов С.А., Казакова Л.П., Богословский Н.А., Былев А.Б.</b> Прохождение импульса тока через структуру TiN/Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>5</sub> /Au.....	81
<b>Фотиади А.А., Коробко Д.А., Паняев И.С.</b> Волоконные лазеры с низким уровнем шума и их потенциальные применения.....	83
<b>Царева А.А., Санори Д.Ж.П., Дмитриев И.Ю.</b> Моделирование тандемных фотопреобразователей перовскит/кремний в программе SCAPS-1D.....	84
<b>Черемисин А.В., Мелебаев Д., Шамухаммедова М., Теруков Е.И., Дюльдин М.В., Крупенина Н.В., Трапезникова И.Н., Рудь В.Ю.</b> Изучение спектральных зависимостей фоточувствительности в эпитаксиальных структурах Au-окисел-n-GaAs <sub>0.6</sub> P <sub>0.4</sub> /n+-GaAs для экологических приложений .....	86
<b>Черкунов В.И.</b> Решение для магнетронного напыления тонких плёнок оксида кремния и углерода .....	88
<b>Шамрай А.В.</b> Интегральная фотоника на основе ниобата лития – это сверхширокополосная модуляция и ультравысокие скорости управления оптическими сигналами.....	89
<b>Шарков М.Д., Бойко М.Е., Бойко А.М., Бобыль А.В., Николаев В.И.</b> МУРР-исследования порошков фосфата лития- железа с применением методики искусственных нейронных сетей .....	90
<b>Шерченков А.А., Штерн Ю.И., Штерн М.Ю., Рогачев М.С.</b> Среднетемпературные термоэлектрические материалы на основе РbТе. Стратегия повышения эффективности .....	92
<b>Щегольков А.В., Малинкина В.О., Комаров А.В., Авдонин Д.Е., Щегольков А.В.</b> О возможности использования оксида графена в электрохромных пленках оксида вольфрама .....	94
<b>Эль-Хадж Л.А., Терехов Д.Ю., Волощук И.А., Краснянский И.Я., Якубов А.О.</b> Формирование топологического рисунка методами позитивной и негативной фотолитографии на портативной установке экспонирования.....	96

<b>Якубов А.О., Лазаренко П.И., Терехов Д.Ю., Федянина М.Е., Гнеушев Д.А., Сагунова И.В., Шопков К.В., Козюхин С.А., Шерченков А.А.</b> Особенности технологии формирования тонких пленок халькогенидных фазопеременных материалов .....	98
<b>Abolmasov S.N.</b> Interdigitated back contact silicon heterojunction solar cells: towards industrially feasible manufacturing methods .....	100
<b>Alekberov R.I., Mekhtiyeva S.I., Ismayilov I.R.</b> Photoinduced effects in the Ga-Sb-S chalcogenide glassy system.....	102
<b>Alekberov R.I., Mekhtiyeva S.I., Sadikhli R.F.</b> Application of models bond strength–coordination number fluctuation and scaled viscosity models to glass transition processes in the Sb-Se system .....	104
<b>Badalova Z.I., Jahangirli Z.A., Abdullayev Yu.A., Ragimov S.S., Abdullayev N.A.</b> Оптические параметры магнитного полупроводника TlFeS <sub>2</sub> .....	106
<b>Zhang Baode, Aleshin A.N.</b> The charge separation of PIDT-BT/Single walled carbon nanotube quantum Heterojunctions .....	108
<b>Dalal A., Sayarov I., Chouprik A., Tameev A.</b> Optimized 3-step thermal evaporation of Cs <sub>2</sub> AgBiBr <sub>6</sub> thin films for optoelectronic applications .....	110
<b>Dubkov S.V., Tarasov A.M., Medenkov G.A., Novikov D.V., Gromov D.G., Gavrilov S.A.</b> Development of technologies for fabrication of SERS-active nanostructures for biosensorics.....	112
<b>Garibova S.N.</b> Modeling of the electron structure for Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>5</sub> based on density functional theory.....	114
<b>Gets D.S.</b> Charge-carrier dynamics in CsPbBr <sub>3</sub> perovskites.....	116
<b>Gostishchev P.A., Le T.S., Luchnikov L.O., Ilicheva E.A., Gren D.A., Saranin D.S.</b> Up-scaling and prototyping of perovskite solar panels.....	117

<b>Kolobov A.V.</b> Amorphous chalcogenides: from passive optical elements to neuromorphic applications.....	119
<b>Lebedeva Ya.S., Lazarenko P.I., Budagovsky I.A., Smayev M.P., Sherchenkov A.A.</b> Selective etching of laser-crystallized thin films of phase-change materials .....	121
<b>Mamedova I.A., Qasimoglu I.Q., Jahangirli Z.A., Ragimov S.S., Mammadov T.G., Abdullayev N.A.</b> Электронные свойства кристаллов $\text{CuInS}_2$ : расчёты из первых принципов и эллипсометрические измерения .....	123
<b>Mekhtiyeva S.I., Alekberov R.I., Mammadov S.M.</b> Analysis of optical absorption in Ge-As-Se and Ge-As-Se-S chalcogenide glass systems using the Belehradek functional model and the Tauc method.....	125
<b>Shpenkov G.</b> О проводимости графена.....	127
<b>Shuleiko D.V., Kuzmin E.V., Pepelyaev D.V., Pakholchuk P.P., Kozuykhin S.A., Kashkarov P.K.</b> Laser-induced modification of chalcogenide vitreous semiconductor films: periodic surface nanorelief, optical anisotropy and photoluminescence .....	129
<b>Smayev M.P.</b> Modification of thin $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films with light beams of different spatial structure and their application for control of laser radiation parameters.....	131
<b>Smirnov P.A., Kunkel T.S., Romashkin A.V., Vorobyov Yu.V., Smayev M.P., Lazarenko P.I.</b> Amorphization of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films by femtosecond single-pulse laser irradiation.....	133
<b>Utegulov Z.N., Abdullaev A., Sekerbayev K., Farzadian O., Mukhangaliyeva L., Tkhorzhevskiy I., Tlegenov R., O'Connell J., Azarov A., Kuznetsov A., Zhang Y., Weber W., Wang Y.</b> Phonon-mediated nanoscale thermal transport in phase-transformed and irradiated wide band-gap semiconductors.....	134
<b>Yan Cheng.</b> Structure transition in typical chalcogenide compounds .....	136

<b><i>Zabotnov S.V., Shuleiko D.V., Kuzmin E.V., Pakholchuk P.P., Venig S.B., Serdobintsev A.A., Volkovoyanova L.D., Martyshov M.N., Kolchin A.V., Glukhenkaya V.B., Lazarenko P.I., Kozyukhin S.A., Kashkarov P.K.</i></b>	Femtosecond laser fabrication of anisotropic structures in thin amorphous films of silicon and GST225 .....	137
---	--	-----

Научное издание

Аморфные и микрокристаллические полупроводники (AMS14). Материалы XIV Международной конференции. Сборник трудов. Часть 2.

Текст печатается в авторской редакции.

Подписано в печать с оригинал-макета 10.06.2025. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 8,60. Уч.-изд. л. 7,4. Тираж 150 экз. Заказ 39.

Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ.

