



РОСАТОМ
РФЯЦ-ВНИИЭФ



НЦФМ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ

**XV ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА
НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА
ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ
И ИНСТИТУТА ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ РФЯЦ-ВНИИЭФ
ПО ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ
И ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

Для студентов, аспирантов,
молодых ученых и специалистов

ТЕЗИСЫ

8–10 октября 2024

г. Саров



ГОСКОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР –
ВСЕРОССИЙСКИЙ НИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

**XV ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА
НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ
И ИНСТИТУТА ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РФЯЦ-ВНИИЭФ ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ,
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ЛАЗЕРНОЙ
ФИЗИКЕ И ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

ТЕЗИСЫ

8–10 октября 2024 года

г. Саров

XV Всероссийская школа Национального центра физики и математики и Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Тезисы. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2024. – 98 с.: ил.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на XV Всероссийской школе Национального центра физики и математики и Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям 8–10 октября 2024 г.

Состав программного комитета

XV Всероссийской школы Национального центра физики и математики и Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям

Гаранин С. Г.	Председатель программного комитета – генеральный конструктор по лазерным системам – заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ, директор ИЛФИ
Романовский М. Ю.	Заместитель председателя программного комитета – заместитель директора АНО «НЦФМ» по науке
Автайкин Д. А.	Первый заместитель директора ИЛФИ
Бельков С. А.	Главный научный сотрудник ИТМФ – советник при дирекции
Буйко С. А.	Заместитель директора ИЛФИ
Деркач В. Н.	Заместитель директора ИЛФИ по моделирующим установкам – начальник научно-исследовательского отделения
Зарецкий Н. А.	Начальник научно-исследовательского отдела, ученый секретарь НТС ИЛФИ
Литвин Д. Н.	Заместитель начальника научно-исследовательского отделения ИЛФИ
Ивановский А. В.	Заместитель директора ИЛФИ по исследованиям высокотемпературной замагниченной плазмы, начальник научно-исследовательского отделения
Карпенко С. И.	Начальник научно-конструкторского отделения ИЛФИ
Крот А. М.	Начальник отдела научно-технического развития ИЛФИ
Рогачев В. Г.	Заместитель директора ИЛФИ по стратегическому планированию экспериментальных исследований на мощных лазерных установках – начальник научно-исследовательского отдела
Рогожников Г. С.	Старший научный сотрудник ИЛФИ
Сафронов С. Е.	Директор по безопасности ИЛФИ
Стариков Ф. А.	Начальник научно-теоретического отдела ИЛФИ

СОДЕРЖАНИЕ

Тезисы лекций*Илья Сергеевич Абрамов*

Источник экстремального ультрафиолетового излучения на основе плазмы ксенона: принципы, новые результаты и перспективы для литографии. 9

Вадим Александрович Арефьев

Рентгеновский телескоп ART-XC обсерватории «Спектр-РГ» – флагман российской космической науки 10

Сергей Юрьевич Гуськов

Состояние исследований в области лазерного термоядерного синтеза 11

Владимир Николаевич Деркач

Российская мегаджоульная установка. Первые результаты 12

Кирилл Игоревич Зайцев

ТГц-ИК спектроскопия лабораторных аналогов межзвездных и околозвездных льдов различного молекулярного состава 13

Илья Емельянович Кожеватов

Актуальные задачи современной оптической метрологии 14

Игорь Юрьевич Костюков

Проект XCELS. Обзор основных направлений исследований 15

Давид Георгиевич Кочиев

Технологии фотоники в хирургии 16

Андрей Петрович Кузнецов

Лазерная физика высокой плотности энергии: техника и эксперимент 17

Андрей Борисович Савельев-Трофимов

Компактные лазерно-плазменные ускорители электронов для прикладных исследований 18

Александр Михайлович Сергеев

Новые рубежи лазерной физики в научной программе НЦФМ 19

Федор Алексеевич Стариков

Адаптивная оптика как инструмент изучения турбулентности 20

Андрей Алексеевич Шайкин

Технологические вызовы проекта XCELS 21

В. Н. Юфа, И. Н. Бурдонский, А. Г. Леонов

Лазерное моделирование противодействия астероидно-кометной опасности 23

Тезисы докладчиков*М. С. Адамова, И. Н. Бурдонский, В. Н. Юфа*

Влияние предварительного облучения УФ излучением на скорость разлета и размер пылевых частиц при моделировании плазменно-пылевых процессов у поверхности Луны 25

<u>Н. А. Андреев, Н. П. Пятаков, Б. П. Якутов</u> Влияние силы радиационного трения, действующей на электроны, на процесс ускорения тонкой непрозрачной мишени сверхинтенсивным лазерным импульсом . . .	27
<u>Г. В. Башкатов, И. В. Животовский</u> Моделирование ретрорефлекторной системы для задачи измерения дальности до МКА	29
<u>А. М. Болтаев, А. В. Зубков, В. П. Коваленко, В. М. Рябцев</u> Численное моделирование влияния вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна на процесс генерации второй гармоники неодимового лазера	31
<u>Е. М. Бузаева, П. А. Рябочкина, А. О. Арискин, Р. Н. Максимов, В. А. Шитов, В. В. Осипов</u> Спектрально-люминесцентные свойства лазерной керамики $Tm, Ho: Y_2O_3$	32
<u>И. А. Быкова, А. О. Углов, Г. С. Рогожников</u> Исследование спектральных особенностей образцов веществ в видимой и ближней инфракрасной областях в многопроходной оптической схеме с накоплением сигнала	33
<u>В. О. Васюкевич, А. О. Липатов, А. Н. Маначинский, А. В. Яхлов</u> Улучшение параметров волнового фронта лазерного излучения в экспериментах на многоканальной лазерной установке нового поколения	34
<u>О. С. Вязанкин, А. И. Бобров, П. В. Волков, Д. А. Семиков, А. В. Нежданов</u> Численное моделирование узлов ввода/вывода фотонной интегральной схемы	36
<u>А. А. Гарелина, А. Г. Арзев, Л. С. Ганин, Е. Н. Задорожная, Е. В. Коженков, А. В. Креков, В. И. Лесков, В. А. Осин, В. В. Свиридов, Р. А. Фомин</u> Анализ работы системы накопления и коммутации электрической энергии в экспериментах на лазерной установке нового поколения за 2020–2023 гг.	37
<u>А. А. Горбунов, О. И. Горчаков, А. Г. Кравченко, К. В. Стародубцев</u> Методика измерений энергии лазерного излучения второй гармоники на входе финального оптического модуля установки нового поколения	38
<u>Г. Н. Качалин, А. В. Самсонов, Д. А. Елхимов</u> Расчетные методики восстановления значений концентрации активных атомов в составе рабочей среды газовых лазеров с диодной накачкой	39
<u>В. С. Жигарьков</u> Лазерно-индуцированный прямой перенос для клеточной печати и нанесения фотолюминесцентных наночастиц	40
<u>В. В. Залетов, А. И. Шишпанов, Ю. З. Ионих</u> Распад метастабильных атомов неона в послесвечении волны ионизации	42
<u>А. Е. Запрядлов, М. Ю. Коптев, А. А. Вольф, Д. С. Липатов, М. Е. Лихачев, С. В. Муравьев, А. В. Ким</u> Чирпированные волоконные брэгговские решетки, записанные фемтосекундным лазером в активном волокне, легированном иттербием, для восстановления спектра, компенсации потерь и эффективного использования в СРА-схеме	43

<i>А. Ю. Игуменов</i>	
Оптические методы стабилизации усилителей мощности для протяженных оптоволоконных линий связи	45
<i>Р. Ф. Имамов, Л. М. Виноградский, Г. Н. Качалин, Д. С. Назаров, А. В. Самсонов, А. С. Шулаев</i>	
Подготовка исходных компонентов рабочих смесей газовых лазеров	46
<i>А. А. Калачева, Ю. А. Адаменков, М. А. Горбунов, Е. В. Кабак, В. А. Шайдулина, А. В. Юрьев</i>	
Одновременная генерация на трёх длинах волн в среде гелий–аргон–криптон с оптической накачкой	47
<i>Д. Н. Капуста</i>	
Источник ультрахолодных атомов ^{87}Rb для атомного интерферометра-гравиметра . . .	48
<i>Е. Е. Ковалев</i>	
Интеррогатор на основе широкополосного источника для опроса точечных оптических датчиков	49
<i>А. А. Кориунов</i>	
Технические аспекты разработки микрофокусного лазеро-плазменного рентгеновского источника на основе фемтосекундного лазера с использованием автоустиривочных подвижек на основе машинного обучения с подкреплением, а также автоматизация работы установки	56
<i>А. Д. Крупин, В. В. Стрелков, М. Ю. Рябикин</i>	
Резонансная генерация высоких гармоник лазерного излучения в режиме ионизации, промежуточном между многофотонным и туннельным	59
<i>Я. А. Крюков, С. В. Тютин, Н. А. Зарецкий, В. С. Цыкин, С. Н. Бантуров, О. Л. Течко, С. В. Хохлов, М. И. Коновальцов, Н. М. Ракчеев, К. Г. Аксёнов</i>	
Исследование возможности повышения пороговой мощности ВРМБ при помощи широкополосной фазовой модуляции белым шумом	60
<i>И. В. Кузьмин</i>	
Численное моделирование усиления широкополосных чирпированных лазерных импульсов в $\text{Yb}^{3+}:\text{KGW}$ с использованием уравнений Максвелла – Блоха	61
<i>П. М. Кузьмицкий, В. В. Топоровский, А. В. Кудряшов</i>	
Конструкция деформируемого зеркала на пьезоактуаторах с шагом 6 мм	62
<i>Р. А. Курамин</i>	
Измерение температурных зависимостей констант скорости энергообменных процессов, протекающих в активной среде лазера на метастабильных атомах аргона .	63
<i>И. С. Месензова</i>	
Многочастотная лазерная спектроскопия субдоплеровских резонансов в миниатюрных ячейках с парами цезия	65
<i>Е. К. Михайлов</i>	
Масштабирование средней мощности в полностью волоконном импульсном лазере на основе конусного световода, легированного иттербием	67
<i>М. Д. Можеева</i>	
Разработка прототипа мобильной установки ЛИМС для лазерной биопечати	69

<i>А. В. Митрофанов, М. В. Рожко, Д. С. Моисеев, Я. О. Романовский, Д. А. Сидоров-Бирюков</i>	
Переключение направления поля терагерцовых импульсов при двухчастотной генерации лазерным излучением среднего ИК диапазона	71
<i>Р. Ю. Костюнин, С. А. Макаров, Р. В. Мокрецов, С. В. Мочкаев, В. В. Мурылев, В. Ю. Романова, А. В. Савкин, И. М. Устинов</i>	
Параметрический усилитель системы формирования опорного излучения лазерной установки нового поколения	72
<i>М. Д. Наумов, Н. А. Кирдяев, А. В. Самсонов, Г. Н. Качалин, И. В. Минеев</i>	
Исследование зависимости расходимости лазерного излучения от характеристик газового потока лазерной камеры	73
<i>И. Н. Николаева, В. В. Костромыкина, Г. С. Рогожников</i>	
Исследование взаимодействия терагерцового излучения миллиметрового диапазона длин волн со структурированными поверхностями диэлектрических материалов	75
<i>К. В. Пузановский</i>	
Исследование процессов формирования фотонных устройств на основе градиентных кристаллов LiNbO_3 и его керамических соединений	76
<i>М. В. Решетова, Н. В. Минаев, Д. В. Басманов</i>	
Использование технологии двухфотонной полимеризации для печати структур с субмикронным разрешением внутри микрофлюидного канала	77
<i>Ю. Д. Росчихмарова, С. А. Анциферов, С. А. Буйко, В. Ю. Гладкий, С. В. Маркин</i>	
Алгоритм начального позиционирования сегментированного зеркала на основе Z-сканирования	78
<i>П. А. Руди, Г. С. Рогожников</i>	
Спектральные особенности биологических тканей в миллиметровом диапазоне длин волн как потенциальные маркеры онкологических заболеваний	79
<i>В. М. Рябцев, А. В. Зубков, А. М. Болтаев, В. П. Коваленко, В. С. Файзулин</i>	
Исследование влияния формы поверхности кристаллов KDP большой апертуры на эффективность преобразования излучения во вторую гармонику	80
<i>В. И. Самойлов, Н. И. Карпов, А. Н. Бойко, И. А. Зуйков, В. А. Островский, Е. А. Пеганов, К. Н. Макаров</i>	
Характеристики системы предусилителя лазерного излучения с использованием квантрона с диодной накачкой и активным элементом в виде стержня $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$. . .	81
<i>И. А. Самсонов, И. Б. Мухин, С. В. Луконькин</i>	
Стретчирование узкополосных импульсов в твердотельном регенеративном усилителе	83
<i>Г. П. Санников, А. В. Добиков, Д. С. Тимаев, И. А. Юрлов</i>	
Исследования воздействия высокой температуры на структуру и свойства оптических покрытий $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ и $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$	84
<i>И. Р. Смагин, С. В. Бондаренко, Л. П. Выломов, С. Ю. Головкин, В. Н. Деркач, Л. А. Душина, В. Н. Пугачева</i>	
Моделирование экспериментов на установке «Луч» с двумя пересекающимися в плазме лазерными пучками	85

<i>А. В. Снегирев</i>	
Оптоэлектронные эффекты в напряженных дираковых материалах	86
<i>В. В. Топоровский, И. В. Галактионов, А. Л. Рукосуев, А. В. Кудряшов</i>	
Снижение ошибки позиционирования вторичных источников излучения в лазерных комплексах пета- и тераваттного уровня мощности	87
<i>И. Р. Хайрулин, И. Б. Мухин</i>	
Уточнение балансных уравнений для расчета инверсии и усиления в иттербиевых активных элементах в условиях многопроходной накачки и сигнала	89
<i>А. В. Андраманов, Д. В. Бакайкин, В. Е. Гаганов, С. Ф. Попов, Д. Д. Халхаров</i>	
Способ наведения лазерного излучения на мишень многоцелевого исследовательского комплекса установки нового поколения	91
<i>А. В. Царева, А. В. Илюшечкина, С. М. Прохоров, Е. Ю. Соломатина, И. А. Чугров</i>	
Получение малоплотных пористых материалов и их применение в мишенях для ЛТС	92
<i>В. А. Шайдулина, Ю. А. Адаменков, М. А. Горбунов, Е. В. Кабак, А. А. Калачева, А. В. Юрьев</i>	
Генерация в среде Ag-Ne на длине волны 912 нм с оптической накачкой	93
<i>А. С. Шулаев, Р. Ф. Имамов, Г. Н. Качалин, Л. М. Виноградский, Д. С. Назаров</i>	
Влияние состава смазочных материалов на ресурс газовых лазеров замкнутого цикла с диодной накачкой	94
<i>Л. М. Лавров, В. М. Ямицков</i>	
Диаграмма направленности рассеянного лазерной плазмой излучения на многоканальной мощной лазерной установке	95
<i>М. А. Ямицкова, В. М. Ямицков</i>	
Модернизация многослойных зеркал на основе рубидия для мягкого рентгеновского излучения	97

ИСТОЧНИК ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЫ КСЕНОНА: ПРИНЦИПЫ, НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ЛИТОГРАФИИ

Илья Сергеевич Абрамов
abramov@ipfran.ru

Заместитель заведующего отделом по научной работе
Институт прикладной физики имени А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород

Лекция посвящена теории лазерного разряда в струе ксенона высокого давления, предлагаемого в качестве эффективного источника экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ) для литографии [1]. Обсуждаются основные аспекты динамики разряда, в частности, возможность расширения области разряда, излучающей в ЭУФ диапазоне длин волн, за пределы фокального пятна лазера вследствие фотоионизации окружающего нейтрального ксенона и последующего нагрева электронов потоком тепла из области энерговклада вследствие теплопроводности [2]. Результаты моделирования в рамках разработанной теории проверяются на доступных экспериментальных данных [3–6] и используются для исследования предельных параметров источника ЭУФ излучения на основе плазмы ксенона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-2200270).

Литература

1. Chkhalo N. I., Garakhin S. A., Lopatin A. Ya. et al. // AIP Adv. 2018. V. 8. Art. no. 105003.
2. Abramov I. S., Golubev S. V., Gospodchikov E. D., and Shalashov A. G. // Appl. Phys. Lett. 2023. V. 123. Art. no. 193502.
3. Kalmykov S. G., Butorin P. S., and Sasin M. E. // J. Appl. Phys. 2019. V.~126. Art. no. 103301.
4. Kalmykov S. G., Butorin P. S., Sasin M. E., and Zakharov V. S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2022. V. 55. Art. no. 105203.
5. Guseva V. E., Nechay A. N., Perekalov A. A., et. al. // Appl. Phys. B. 2023. V. 129, No. 10. Art. no. 155.
6. Abramov I. S., Golubev S. V., Gospodchikov E. D., Shalashov A. G. Perekalov A. A., Nechay A. N., Chkhalo N. I., “Laser discharge in high-pressure jet of heavy noble gas: expansion of emitting volume promises efficient source of EUV light for lithography” // Phys. Rev. Applied. 2024. with referees.

**РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП ART-XC ОБСЕРВАТОРИИ «СПЕКТР-РГ»-
ФЛАГМАН РОССИЙСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ НАУКИ**

Вадим Александрович Арефьев
arefiev@cosmos.ru

Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук
Институт космических исследований Российской академии наук, Москва

Первый российский телескоп с рентгеновской оптикой косоугольного падения – ART-XC им. Михаила Павлинского, установленный на борту обсерватории Спектр-РГ, успешно работает на орбите с июля 2019 года. За это время было проведено несколько полных обзоров всего неба, а также значительное количество наблюдений за наиболее интересными областями неба и уникальными космическими объектами. В докладе представлен обзор результатов обсерватории, в первую очередь полученных с помощью телескопа ART-XC, который в настоящее время является определяющим инструментом обсерватории: глубокий обзор нашей Галактики, открытие и исследование природы новых объектов, определение физических параметров вещества в экстремальных условиях, основанных на результатах многоволновых наблюдений совместно с другими наземными и космическими приборами. Подробно рассказано о конструкции телескопа и развитии научно-технического задела, полученного при создании телескопа ART-XC, для будущих космических проектов.

Литература

1. Pavlinsky, M., Tkachenko, A., Levin, V. et al. The ART-XC telescope on board the SRG observatory, *Astronomy & Astrophysics*. 2021. Vol. 650.

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Сергей Юрьевич Гуськов
guskovsy@lebedev.ru

Главный научный сотрудник, и.о. заведующего сектором,
профессор, доктор физико-математических наук

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

В лекции излагаются основные элементы современной концепции лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) и наиболее значимые результаты исследований в этой области. Представлен сравнительный анализ перспектив применения традиционных подходов, основанных на облучении сферической мишени плавно профилированным по времени импульсом лазерного излучения (прямое облучение) или лазерно-индуцированного излучения (непрямое облучение) [1, 2], а также альтернативных методов, основанных на радикальном разделении процессов сжатия и нагрева мишени – методов быстрого зажигания [3, 4] и зажигания сфокусированной ударной волной [5, 6].

Обсуждаются результаты недавних экспериментов на крупнейшей лазерной установке NIF в Ливерморской лаборатории (США), в которых при непрямом облучении было достигнуто зажигание мишени ЛТС – превышение выделившейся энергии дейтерий-тритиевой реакции синтеза по отношению к энергии лазерного импульса – в 1,5–3 раза [7, 8].

Даётся краткая история и современное состояние совместных исследований Физического института им. П. Н. Лебедева РАН и Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ в области физики высоких плотностей энергии лазер-плазменного взаимодействия и лазерного термоядерного синтеза.

Литература

1. Rozanov V. B., Verdon C. P., Decroisette M. et al. Energy from inertial fusion. IAEA: Vienna, 1995.
2. Atzeni S. and Meyer-ter-Vehn J. The physics of inertial fusion. Oxford: Oxford Univ. Press, 2004.
3. Basov N. G., Gus'kov S.Yu., Feoktistov L. P. // J. Soviet Laser Res. 1992. 13, 396.
4. Tabak M., Hammer J. M., Glinsky M. E. et al. // Phys. Plasmas. 1994. 1, 1626.
5. Щербаков В.А. Физика плазмы 1983, 9, 409.
6. Betti R., Zhou C. D., Anderson K. S. et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. 98, 155001.
7. Kritcher A. L., Young C. V., Robey H. F. et al. // Nature Physics 2022. 18(3), 251.
8. Kritcher A. L., Zylstra A. B., Weber C. R. et al. // Phys. Rev. Lett. 2024. 109, 025204.

РОССИЙСКАЯ МЕГАДЖОУЛЬНАЯ УСТАНОВКА. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Владимир Николаевич Деркач

Заместитель директора ИЛФИ по моделирующим установкам – начальник научно-исследовательского отделения, кандидат физико-математических наук

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Установки мегаджоульного класса являются уникальной экспериментальной площадкой для реализации работ по инерциальному термоядерному синтезу и моделированию экстремальных состояний.

Завершен первый этап создания российской установки данного класса, введен в эксплуатацию многоцелевой исследовательский комплекс МИК, начаты эксперименты по физике высоких плотностей энергии.

В докладе представлен обзор работ по отработке параметров лазерной системы, постановке исследований на МИК и основным результатам некоторых экспериментальных кампаний по облучению мишеней.

**ТГц-ИК СПЕКТРОСКОПИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ АНАЛОГОВ МЕЖЗВЕЗДНЫХ
И ОКОЛОЗВЕЗДНЫХ ЛЬДОВ РАЗЛИЧНОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО СОСТАВА***Кирилл Игоревич Зайцев*

Ведущий научный сотрудник, руководитель Центра лазерной физики и фотоники,
доктор физико-математических наук, кандидат технических наук

Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва

Знание широкополосных (ТГц–ИК) оптических (диэлектрических) характеристик астрофизических льдов различного молекулярного состава необходимо для моделирования спектров теплового излучения пылевых облаков, где на поверхности пылевых частиц образуются ледяные мантии, а также переноса излучения в таких облаках. Подобные данные до сих пор отсутствуют в литературе, что можно объяснить отсутствием соответствующих спектроскопических систем и методов. В нашей работе методы ТГц импульсной спектроскопии и ИК фурье спектроскопии адаптированы для изучения широкополосного диэлектрического отклика лабораторных аналогом астрофизических льдов, выращенных при криогенных температурах [1, 2]. С их помощью впервые изучен ТГц-ИК диэлектрический отклик льдов CO и CO₂ [2], N₂ [3] и др. Более того, изучены эффекты рассеяния излучения на структурных неоднородностях льдов, что позволило получить данные об их пористости. Наконец, на основе зарегистрированных диэлектрических спектров оценены параметров переноса излучения в пылевых облаках с рассмотренными льдами.

Литература

1. B.M. Giuliano, A.A. Gavadush, B. Müller, K.I. Zaytsev, T. Grassi, A.V. Ivlev, M.E. Palumbo, G.A. Baratta, C. Scirè, G.A. Komandin, S.O. Yurchenko, P. Caselli, “Broadband spectroscopy of astrophysical ice analogues. I. Direct measurement of the complex refractive index of CO ice using terahertz time-domain spectroscopy” *Astronomy & Astrophysics* 629, A112 (2019), DOI: 10.1051/0004-6361/201935619.
2. A.A. Gavadush, F. Kruczkiewicz, B.M. Giuliano, B. Müller, G.A. Komandin, T. Grassi, P. Theulé, K.I. Zaytsev, A.V. Ivlev, P. Caselli, “Broadband spectroscopy of astrophysical ice analogues. II. Optical constants of CO and CO₂ ices in the terahertz and infrared ranges,” *Astronomy & Astrophysics* 667, A49 (2022), DOI: 10.1051/0004-6361/202244102.
3. F. Kruczkiewicz, A.A. Gavadush, F. Ribeiro, A. Vyjidak, B.M. Giuliano, G.A. Komandin, T. Grassi, P. Theulé, K.I. Zaytsev, A.V. Ivlev, P. Caselli, “Broadband spectroscopy of astrophysical ice analogues. III. Optical constants of N₂ ice in the terahertz and infrared ranges,” *Astronomy & Astrophysics* (2024), under review.

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ СОВРЕМЕННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МЕТРОЛОГИИ

Илья Емельянович Кожеватов
Ilya.kozhevaton@ipfran.ru

Доктор физико-математических наук

Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
Нижний Новгород

Представляются задачи оптической метрологии, которые на сегодняшний день кажутся наиболее интересными и актуальными.

Современные требования к точности оптических измерений. Место России в разработке и создании точных оптических приборов.

ПРОЕКТ XCELS. ОБЗОР ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

Игорь Юрьевич Костюков
kost@ipfran.ru

Заведующий отделом сверхбыстрых процессов, заместитель руководителя отделения
нелинейной динамики и оптики по научной работе, член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук

Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
Нижний Новгород

Целью проекта XCELS (eXawatt Center for Exteme Light Studies) является создание исследовательской инфраструктуры – Центра исследований экстремальных световых полей. Основной инфраструктурой должна стать многоканальная (12 каналов) лазерная система (суб-экзаваттной) мощностью [1, 2]. Многоканальная архитектура установки позволяет создавать в области фокуса сложные распределения ЭМ полей, максимизирующих различные параметры излучения (например, напряженность лазерного поля). Дополнительные каналы могут также применяться как в целях диагностики, так и для генерации потоков вторичного излучения и частиц. Основной задачей инфраструктуры является исследование фундаментальных процессов взаимодействия лазерного излучения экстремально высокой интенсивности с веществом. Экспериментальную программу проекта XCELS можно условно разделить на 4 направления: (i) исследования сильно полевой КЭД; (ii) новые методы ускорения заряженных частиц; (iii) лазерно-плазменная генерации ЭМ излучения высокой интенсивности в труднодоступных областях ЭМ спектра; (iv) лабораторная астрофизика, процессы с высокой плотностью энергии, диагностика экстремального света и другие приложения. В докладе представлен обзор возможных экспериментов в области фундаментальных и прикладных исследований на инфраструктуре XCELS.

Литература

1. Хазанов Е. и др. // Квантовая электроника. 2023. 53. 95.
2. Khazanov E. et al. // High Power Laser Sci. Eng. 2023. 11. e78.

ТЕХНОЛОГИИ ФОТОНИКИ В ХИРУРГИИ

Давид Георгиевич Кочиев
dkochiev@mail.ru

Заместитель директора по научной работе, кандидат физико-математических наук
Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва

Доклад посвящен новым разработкам лазерной медицинской техники, технологиям хирургического лечения, основывающихся на результатах фундаментальных исследований, проводимых в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Рассмотрены способы реализации различных режимов генерации лазерного излучения, их воздействия на биологические ткани и внедрения полученных результатов в клиническую практику. Показаны возможности применения технологий лечения в различных областях хирургии.

**ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ:
ТЕХНИКА И ЭКСПЕРИМЕНТ**

Андрей Петрович Кузнецов
apkuznetsov@mephi.ru

Директор Института лазерных и плазменных технологий, доктор физико-математических наук
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт), Москва

В настоящее время, в мире постоянно расширяется фронт работ по созданию импульсных мощных лазерных установок, при фокусировке излучения которых достигаются плотности мощности позволяющие создавать в веществе термодинамические состояния доступные в природе только в центрах массивных звезд. Это связано с бурным ростом технологий, обеспечивающих возможность достижения все более высоких энергетических, частотных и пространственных характеристик лазерных импульсов. Область применения подобных систем простирается далеко за пределы традиционной лазерной физики. Строительство мощных лазерных установок формирует новые технологические платформы национального уровня.

Лазеры высокой плотностью мощности используются в физике экстремального состояния вещества, материаловедении, лабораторной астрофизике, экспериментальных исследованиях в интересах лазерного термоядерного синтеза. Для проведения работ в перечисленных направлениях в мире используются установки с излучением в широком диапазоне энергий и длительности импульса – от 1 Дж до 10^6 Дж и от >50 фс до 10 нс соответственно. Однако наибольшее количество существующих в настоящее время мощных лазерных установок (>100 ТВт) сосредоточено в достаточно узкой области данных параметров. Сверхъяркие, петаваттного и субпетаваттного класса, (с длительностью импульса менее 100 фс и энергией до 100 Дж) достаточно хорошо отработаны конструктивно и даже могут поставляться «под ключ» фирмами разработчиками. Однако эти лазеры могут быть эффективно использованы для исследования в основном кинетических процессов, протекающих в малых объемах вещества, например, лазерно-плазменного ускорения частиц, в то время как для моделирования физических процессов при ударно-волновом нагружении в «макрообъектах» размером ~ 1 мм³ их энергии недостаточно.

Лекция посвящена принципам построения лазеров килоджоульного уровня энергии и методикам экспериментальных исследований процессов взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом.

Литература

1. Colin N. Danson et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide // High Power Laser Science and Engineering. 2019. Vol. 7.
2. Spaeth M. L. et al. Description of the NIF Laser // Fusion science and technology. 2016. Vol. 69. 25–145,
3. Соловьев А. А. и др. Исследования в области физики плазмы и ускорения частиц на петаваттном лазере PEARL // УФН. 2024. Т. 194, № 3.

**КОМПАКТНЫЕ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ
ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Андрей Борисович Савельев-Трофимов
abst@physics.msu.ru

Профессор физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Представлены результаты экспериментально-расчетных исследований формирования электронных пучков сверхкороткими лазерными импульсами с тераваттной пиковой мощностью. Обсуждаются различные режимы ускорения – прямое лазерное ускорение (DLA), ускорение в кильватерных волнах (LWFA), а также гибридные варианты. Продемонстрирована возможность управления процессами, протекающими при таких взаимодействиях, дополнительным наносекундным лазерным импульсом: от формирования плазмы с нужной концентрацией и профилем и изменения направления вылета электронного пучка, до генерации квазимоноэнергетического спектра электронов и улучшения эмиттанса пучка. Также обсуждаются возможные применения таких настольных ускорителей при исследовании фотоядерных процессов, для генерации униполярных импульсов терагерцового диапазона спектра экстремальной амплитуды и др. В численных экспериментах обоснована перспективность реализации развиваемых подходов на установках с большей пиковой мощностью (МультиТерра, XCELS).

НОВЫЕ РУБЕЖИ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ В НАУЧНОЙ ПРОГРАММЕ НЦФМ*Александр Михайлович Сергеев*

Научный руководитель Национального центра физики и математики, академик РАН,
доктор физико-математических наук

АНО «Национальный центр физики и математики», Москва

Лазерная физика и фотоника широко представлены в научной программе Национального центра физики и математики, от теоретических исследований новых способов генерации когерентного излучения с уникальными характеристиками до создания крупных исследовательских инфраструктур класса мегасайенс. Мировые тренды в развитии оптики, создание новых оптических материалов, широко востребованные технологические приложения новых лазеров определяют современные тенденции и запросы в расширении рубежей лазерной физики. В докладе обсуждаются последние мировые достижения в освоении новых рубежей длительности, мощности, интенсивности лазерного излучения, в создании источников в не освоенных ранее диапазонах частот, в квантовой оптике и информатике, оптической метрологии и стандартах частоты. Обсуждаются проекты участников кооперации научной программы НЦФМ по созданию и использованию лазерных источников с рекордными характеристиками.

АДАПТИВНАЯ ОПТИКА КАК ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ*Федор Алексеевич Стариков*

Начальник научно-теоретического отдела ИЛФИ, доктор физико-математических наук
Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

В общепринятой модели турбулентности Колмогорова с ограничением низких пространственных частот фон Кармана корреляционные характеристики амплитуды поля излучения зависят от параметра Фрида r_0 и внешнего масштаба турбулентности L_0 , вклад каждого из которых в размер изображения заезды трудно разделить. Существует несколько способов оценки параметра Фрида. Прямым методом является измерение дисперсии изображения звезды. Этот метод осложняется неизбежным дрожанием как фотоприемного устройства, так и зеркала телескопа, что вызывает появление паразитного общего (глобального) наклона волнового фронта. Преодолеть эту проблему позволяет DIMM-методика, основанная на определении дисперсии разности локальных градиентов фазы в двух субапертурах. Эта методика требует привлечения информации об оптической системе и не позволяет выделить глобальный наклон волнового фронта, обусловленный крупномасштабными турбулентными флуктуациями.

В настоящей работе развит метод определения параметра Фрида r_0 , основанный на измерениях недиагональной компоненты корреляционной функции градиентов фазы падающего на измерительную систему лазерного излучения. Метод позволяет независимо определить r_0 и оказывается нечувствителен к наличию глобального наклона волнового фронта, как турбулентного, так и паразитного, связанного с дрожанием аппаратуры. Привлечение диагональной компоненты корреляционной функции градиентов фазы позволяет затем извлекать из экспериментальных данных внешний масштаб турбулентности L_0 и подтверждать надежность полученного результата простой проверочной процедурой. Методика успешно апробирована на данных лабораторного эксперимента. Обработка экспериментальных данных доказала эффективность предложенного метода и позволила извлечь значения r_0 , L_0 , которые согласуются с экспериментальной величиной расходимости.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ ПРОЕКТА XCELS

Андрей Алексеевич Шайкин
shaykin@ipfran.ru

Заведующий отделом нелинейной и лазерной оптики, кандидат физико-математических наук

Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород

С момента создания первого лазера [1] шла постоянная борьба за увеличение пиковой мощности излучения. Это может быть достигнуто как за счёт увеличения энергии импульсов, увеличивая апертуру оптических усилителей, так и за счёт уменьшения длительности импульсов. Сначала это была модуляция добротности, потом – режим синхронизация мод. А в 1985 г. был предложен метод усиления чирпированных импульсов [2], что обеспечило новый скачок мощности лазерных источников. В настоящее время лазеры мощностью 1 ПВт и более есть во многих лабораториях мира. [3].

Однако дальнейший рост интенсивности оптического излучения сопряжён с большими научными и технологическими трудностями. Длительность импульсов (15–30 фс) ограничивает полоса усиления используемых сред (140–80 нм). Энергия – апертурой усилителей. Так же для получения максимальной интенсивности излучения нужна «острая» фокусировка, следовательно, хорошее качество излучения. В 2000-х годах стартовал международный проект ELI [4], подразумевавший создание 100 ПВт лазера.

Фундаментальные процессы взаимодействия такого излучения с веществом представляют совершенно новую область знания. Впервые открывались возможности изучения пространственно-временной структуры вакуума и неизвестных явлений на стыке физики высоких энергий и физики сверхсильных полей.

Ввиду высокой сложности создания такого источника в 2010-х проект был разбит на этапы, а строительство 100 ПВт лазера отодвинуто на второй этап. Поэтому разработанный ИПФ РАН и одобренный в 2011 году правительственной комиссией России по высоким технологиям и инновациям в числе шести проектов класса мегасайенс проект создания 200 ПВт лазерного комплекса был лидером в мировом лазеростроении [5]. С тех пор изменились как наши знания в создании источников света предельно высокой интенсивности, так и многие технологии. Длительность импульсов мощных лазеров уменьшена до значений менее 10 фс [6]. Созданы и апробированы системы коррекции волнового фронта, что позволило увеличить число Штреля при фокусировке мощных лазерных пучков до 0,73 [7]. Проводятся эксперименты по фазировке нескольких фемтосекундных импульсов [8], что позволит в разы увеличить интенсивность излучения в фокусе. Всё это позволило доработать проект XCELS. В настоящее время планируется строительство в НЦФМ лазера мощностью 600 ПВт [9]. Аналогичные проекты существуют и в других странах: Китае [10], США [11], Японии [12].

Литература

1. T. Maiman // Nature, 1960. 187. P. 493.
2. Strickland D. and Mourou G., Optics Communications/ 1985. 56. P. 219–221.

3. Danson C., Bromage J., Butcher T. et al. High Power Laser Science and Engineering. 2019. 7, e54,
4. <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/> The Extreme Light Infrastructure (European Project)
5. <https://xcels.ipfran.ru/img/xcels-project-russian%20version.pdf>.
6. Shaykin A., Ginzburg V., Yakovlev I., et al Use of KDP crystal as a Kerr nonlinear medium for compressing PW laser pulses down to 10 fs // High Power Laser Science and Engineering. 2021. 9. E54.
7. Soloviev A., Kotov A., Martyanov M. et al. // Opt. Express. 2022. T. 30 (22). P. 40584-40591.
8. Бурдонов К., Соловьёв А., Кузнецов И. и др. // Радиофизика. 2024. Принято в печать. Т. 67, № 12.
9. https://xcels.ipfran.ru/img/XCELS_2022.pdf.
10. Z. Li, J. Liu, Y. Xu, Y. Leng, R. Li // Optics Express. 2022. 30, p.41296.
11. J. Bromage, S.-W. Bahk, M. Bedzyk, et al. High Power Laser Science and Engineering, 9, e63 (2021).
12. Z. LI, J. Kawanaka Review of Laser Engineering, 2021. 49, 101.

ЛАЗЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ АСТЕРОИДНО-КОМЕТНОЙ ОПАСНОСТИ*В. Н. Юфа^{1,2}, И. Н. Бурдонский^{1,2}, А. Г. Леонов¹*
*yufa_v@mail.ru*¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный²Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, Москва

Рассмотрен процесс генерации мощной ударной волны в каменных астероидах и обоснована возможность лазерного моделирования разрушения макета астероида. Определены критерии разрушения хондритовых астероидов с помощью контактного ядерного взрыва.

Исследованы механизмы изменения траектории движения астероида при возникновении абляционно гидравлической струи, возникающей при облучении астероида рентгеновским или лазерным излучением. Выработаны критерии мощности и рассмотрены различные способы облучения.

Литература

1. Зеленый Л. М., Есин В. И., Кокошин А. А. // Наука в России, 2013. № 4. С. 31–36.
2. Hanneke Weitering. 'Tunguska'-Size Asteroid Makes Surprise Flyby of Earth. Space.com, April 16, 2018. (www.space.com/40315-asteroid-2018-ge3-surprise-flyby.html).
3. Аристова Е. Ю., Аушев А. А., Баранов В. К и др. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды. ЖЭТФ, 2018, том 153, вып. 1, стр. 157–172.
4. Near-Earth Object Survey and Deflection Analysis of Alternatives Report to Congress, March 2007. <http://neo.jpl.nasa.gov/neo/report2007>.
5. G. Vardaxis, T. Winkler, B. Wie, A. Pitz, and B. Kaplinger, Conceptual Design of a Hypervelocity Asteroid Intercept, Asteroid Deflection Research Center, Iowa State Univ. USA, IA 50011-2271 (2012).
6. Asteroid Initiative Idea Synthesis Workshop Selected Abstracts, NASA, Nov. 20–22 (2013).
7. Шубин О. Н. О разработке мер по обеспечению планетарной защиты от космических рисков и угроз, Круглый стол, доклад, Совет Федерации ФС РФ, 12.03.2013, Москва (2013); defense.council.gov.ru.
8. Бурдонский И. Н., Гольцов А. Ю., Леонов А. Г. и др. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2013. Т. 36, Вып. 2. С. 8–18.
9. Phipps C. R. Laser deflection of NEO's. in: NASA Near Earth Object:Interception Workshop, New Mexico, USA, 1992.
10. Phipps C. R. Laser deflection of near-earth asteroids and comet nuclei, in:Proceedings International Conference on Lasers 96. STS Press, pp.580–587, 1997.

11. Massimiliano Vasile, Christie Alisa Maddock. Design of a formation of solar pumped lasers for asteroid deflection. *Advances in Space Research* 50 (2012) 891–905.

12. Phipps C. R., Turner T. P., Harrison R. F., York G. W., Osborne W. Z., Anderson G. K., Corlis X. F., Haynes L. C., Steele H. S., Spicochi K. C., and King T. R. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers. // *J. Appl. Phys.* V. 64, P. 1083, 1988.

13. Гуськов С. Ю., Бородзюк С., Калал М. и др. Генерация ударных волн и образование кратеров в твердом веществе при кратковременном воздействии лазерного импульса. // *Квантовая электроника*, 2004, Т. 34, В. 11, С. 989–1003.

14. И. Н. Бурдонский, А. Г. Леонов, К. Н. Макаров, В. Н. Юфа. Экспериментальное исследование лазерной абляции каменных поликристаллических мишеней. // *Квантовая электроника*, 50 (8) 763– 769 (2020)

15. Физика ядерного взрыва. В 2 томах. / МО РФ, Центральный физико-технический институт. - М.: Наука. Физматлит, 1997.

16. Блохин М. А., Швейцер И. Г. Рентгеноспектральный справочник. М.: Наука, Гл.ред. Физ-мат. лит., 1982.

**ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ УФ ИЗЛУЧЕНИЕМ
НА СКОРОСТЬ РАЗЛЕТА И РАЗМЕР ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ ПРОЦЕССОВ
У ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ**

М. С. Адамова¹, И. Н. Бурдонский^{2,3}, В. Н. Юфа^{2,3}
avomady@gmail.com

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Московский инженерно-физический институт), Москва

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный

³Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, Москва

В данной работе исследуется взаимодействие лазерного излучения с пористой хондритовой мишенью с содержанием на поверхности мелкодисперсных частиц талька. Проведено сравнение скоростей разлета частиц при их дополнительном облучения УФ излучением и без облучения.

Приведены результаты работы на установке «Сатурн» [10] по диагностике разлета пылевых частиц с поверхности мишени. Для моделирования ударов метеороидов используются импульсы сфокусированного излучения Nd³⁺ лазера.

В исследованиях было обнаружено, что состав и скорости разлета пылевых частиц, приводимых в движение ударной волной, могут приобретать достаточно большие значения (v вплоть до 1,5 км/с) и зависят от заряда частицы.

Результаты экспериментального моделирования могут применяться для описания подъема частиц пыли из зон нелинейных и линейных упругих деформаций вещества реголита, характеризующие ударное воздействие метеороида о поверхность Луны.

Литература

1. Stubbs T. J., Vondrak R. R., Farrell W. M. // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 59–66.
2. Sternovsky Z., Chamberlin P., Horányi M. et al. // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A10104.
3. Stubbs T.J., Glenar D. A., Farrell W. M. et al. // *Planet. Space. Sci.* 2011. V. 59. P. 1659–1664.
4. Попель С. И., Голубь А. П., Лисин Е. А. и др. // *Письма в ЖЭТФ.* 2016. Т. 103, № 9. С. 641–646.
5. Попель С. И., Голубь А. П., Зеленый Л. М., Хораньи М. // *Письма в ЖЭТФ.* 2017. Т. 105, № 10. С. 594–599.
6. Berezhnoy A. A., Velikodsky Y. I., Zubko E. et al. // *Planet. Space. Sci.* 2019. V. 177. P. 104689-1-104689-15.
7. Horányi M., Szalay J.R., Kempf S., Schmidt J., Grün E., Srama R., Sternovsky Z. // *Nature.* 2015. V. 522. P. 324–326.

8. Nemtchinov I. V., Shuvalov V. V., Artemieva N. A. et al. // *Int. J. Impact Eng.* 2002. V. 27. P. 521–534.
9. Попель С. И., Голубь А. П., Захаров А. В. и др. // *Письма в ЖЭТФ.* 2018. Т. 108. С. 379–387.
10. Бурдонский И. Н., Гольцов А. Ю., Леонов А. Г., Макаров К. Н., Тимофеев И. С., Юфа В. Н. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез.* 2013. Т. 36. Вып. 2. С. 8–18.
11. Мелеш Г. *Образование ударных кратеров.* М: Мир, 1994. 336 с.
12. Анисимов С. И., Прохоров А.М., Фортон В.Е. // *УФН.* 1984. Т. 142. С. 395–434.
13. Гуськов К. С., Гуськов С. Ю. // *Квантовая электроника,* 2001. Т. 31. С. 305–310.
14. Гуськов С. Ю. // *ЖЭТФ.* 2003. Т. 124. С. 1271–1280.
15. Гуськов С. Ю., Касперчик А., Писарчик Т., Бороздюк С., Уллшмид Й., Кроуски Е., Машек К., Пфейфер М., Скала Й., Писарчик П. // *ЖЭТФ.* 2007. Т. 132. С. 907–917.
16. Бурдонский И. Н., Леонов А. Г., Юфа В. Н. и др. // *Журнал технической физики.* 2020. Т. 46. Вып. 10. С. 1041–1044.

**ВЛИЯНИЕ СИЛЫ РАДИАЦИОННОГО ТРЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ
НА ЭЛЕКТРОНЫ, НА ПРОЦЕСС УСКОРЕНИЯ ТОНКОЙ НЕПРОЗРАЧНОЙ
МИШЕНИ СВЕРХИНТЕНСИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ**

Н. А. Андреюк, Н. П. Пятаков, Б. П. Якутов

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

В связи с обсуждением в литературе будущих экспериментов на мультитераваттных лазерных установках и проектируемой установкой XCELS [1] с интенсивностью лазерных импульсов порядка и выше 10^{23} Вт/см², возникает потребность в компьютерном моделировании взаимодействия лазерного излучения с заряженными частицами при данной величине интенсивности. Для адекватного описания ускорения заряженных частиц лазерным излучением с указанной интенсивностью необходимо учитывать силу радиационного трения, действующую на электроны [2]. С этой целью в уравнения движения электронов программы PLASMA-3P [3], моделирующей процессы взаимодействия сверхинтенсивного лазерного излучения с веществом, была включена классическая сила радиационного трения в форме Ландау-Лифшица [4], а также была проведена тестовая серия расчётов.

В работе представлены результаты 3D расчётов с учётом и без учёта силы радиационного трения ускорения тонкой непрозрачной мишени лазерными импульсами круговой поляризации, имеющими длительность 25 фс, длину волны 1 мкм и интенсивность от 10^{23} до 10^{25} Вт/см². Такие параметры лазерного импульса соответствуют проектным параметрам излучения установки XCELS. В качестве мишени был выбран слой углеродной плазмы с твердотельной плотностью 2,1 г/см³ толщиной 0,2 мкм. Расчёты проведены при помощи модернизированной полностью релятивистской параллельной программы PLASMA-3P, основанной на методе «частиц в ячейках» (particle-in-cell, PIC).

В расчётах получены и проанализированы энергетические спектры лазерно-ускоренных ионов и электронов. Изучено влияние силы радиационного трения на количество ускоренных ионов углерода C⁶⁺ и электронов, а также на величину их средней и максимальной энергии при различной интенсивности лазерного излучения. Расчёты показали, что включение силы радиационного трения в уравнения движения электронов слабо меняет энергию ионов, однако существенно влияет на энергию электронов. Показано, что учёт радиационного трения уменьшает среднюю и максимальную энергию ускоренных электронов при всех рассмотренных значениях интенсивности лазерного излучения: без учёта силы радиационного трения средняя энергия электронов для диапазона интенсивностей 10^{23} – 10^{25} Вт/см² составляет ≈ 65 – 300 МэВ, максимальная ≈ 700 – 4600 МэВ; с учётом силы радиационного трения средняя энергия электронов упала до ≈ 60 – 220 МэВ, максимальная энергия электронов уменьшилась до ≈ 600 – 2700 МэВ.

Литература

1. Хазанов Е. А., Шайкин А. А., Костюков И. Ю. и др. XCELS – Международный центр исследований экстремальных световых полей // Квантовая электроника. 2023. Т. 53, № 2. С. 95–122.

2. Попруженко С. В., Федотов А. М. Динамика и излучение заряженных частиц в лазерных полях экстремальной интенсивности // УФН. 2023. Т. 193, № 5. С. 491.

3. Андреюк Н. А., Голубев А. И., Пятаков Н. П., Якутов Б. П. Результаты двумерного и трехмерного моделирования ускорения электронов в плазменной кильватерной волне. / Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии. XX Харитоновские тематические научные чтения// Труды конференции. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. Т. 1. С. 207–212.

4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. М.: Наука, 1988.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕТРОРЕФЛЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО МКА

Г. В. Башкатов, И. В. Животовский
bashkatov@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва

Введение

Угловые световозвращатели (далее – УСВз), в силу узкой индикатрисы световозвращенного излучения, позволяют эффективно проводить измерения дальности до космических аппаратов, а также определять их пространственное положение. Обычно применяются не полые, а призматические УСВз благодаря более простому изготовлению с высокой точностью, а также их более широкой пеленгационной характеристике [1]. Однако для решения таких задач применяются не отдельные УСВз, а ретрорефлекторные системы, позволяющие еще больше расширить пеленгационную характеристику (до 180° по углу азимута). Основным расчетом для таких систем является светоэнергетический расчет. Методика расчета числа фотонов световозвращенного излучения, полученных приемным каналом системы измерения дальности описана в [2]. Однако, в данной работе отсутствует доказательство возможности применения приближения эффективной апертуры, а также расчет эквивалентной поверхности рассеяния (далее – ЭПР) представлен в очень сжатом виде. Исследования отечественных и зарубежных авторов позволяют составить общую модель для световозвращателей с любыми покрытиями граней [3, 4]. Однако такая модель избыточна для задачи моделирования ретрорефлекторной системы с металлизированными покрытиями. Малые космические аппараты (далее – МКА), такие как наноспутники и пикоспутники, в настоящее время активно запускаются университетами по всему миру в исследовательских целях [5]. Именно на такие МКА и предлагается устанавливать ретрорефлекторные системы.

Дифракция на УСВз

При расчете распределения интенсивности света, отраженного от УСВз, в плоскости анализа используется дифракционный интеграл в приближении Фраунгофера, с интегрированием по контуру эффективной апертуры [1]. Эта апертура формируется в двух различных плоскостях вдоль оптической оси: на прямом и обратном пути через входную поверхность (рис. 1). При обратном прохождении пучок ограничивается из-за смещения, вызванного внеосевым падением на УСВз, что приводит к отклонению внутри световозвращателя. Таким образом, происходит последовательная дифракция на двух апертурах, которые, в общем случае, имеют эллиптическую форму, и их пересечение образует эффективную апертуру. В работе показано, что использование приближения эффективной апертуры вносим пренебрежимо малую ($\sim 10^{-14}$) погрешность нормированной интенсивности в плоскости анализа.

Дифракция на системе световозвращателей

Дифракционное изображение, формируемое системой световозвращателей, можно описать как сумму интенсивностей полей, возвращаемых от отдельных эффективных апертур УСВз, что соответствует некогерентному суммированию. Этот случай характерен для

распространения света в атмосфере, где турбулентность нарушает когерентность волн. В условиях, исключающих атмосферное влияние, например, при измерении дальности в космосе, распределение интенсивности может быть получено с помощью Фурье-преобразования от транспаранта, состоящего из эффективных апертур УСВз. Для решения задачи дифракции была создана программа в среде Matlab, которая позволяет вычислять распределение интенсивности в плоскости наблюдения как для когерентного, так и для некогерентного освещения.

Светознергетический расчет

Уравнение, позволяющее найти количество фотонов на приемнике излучения описано в [2]. В работе представлена методика расчета ЭПР для ретрорефлекторной системы с произвольным количеством и расположением УСВз. Результатом расчета служит карта ЭПР, которая позволяет оценить эффективность измерения дальности до малого космического аппарата (рис. 2).

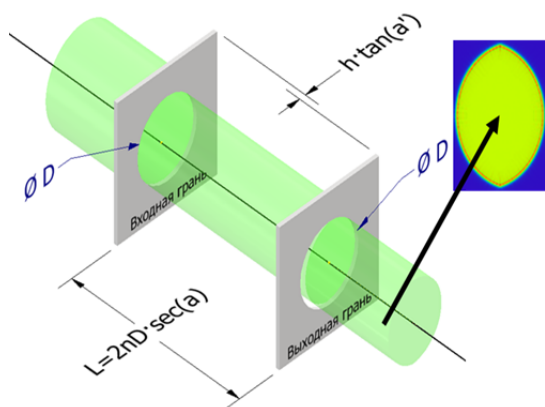


Рис. 1. Схема дифракции на УСВз (n – показатель преломления, α , α' – углы падения и преломления, h – высота УСВз)

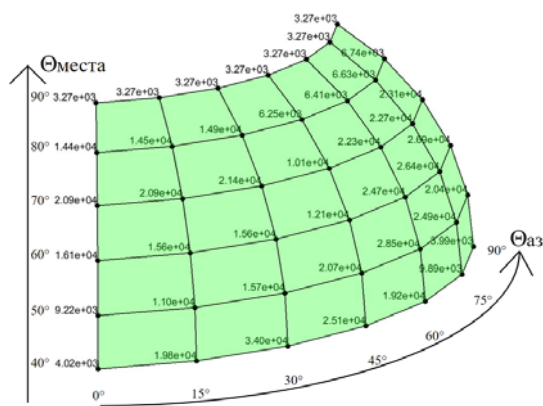


Рис. 2. Значения ЭПР для системы УСВз для углов азимута (от 0° до 90°) и углов места луча дальномера (от 90° до 40°)

Литература

1. Bartels N. et al. Design and qualification of a recessed satellite cornercube retroreflector for ground-based attitude verification via satellite laser ranging / CEAS Space Journal. 2019. Т. 11. С. 391–403.
2. Degnan J. J. A tutorial on retroreflectors and arrays used in satellite and lunar laser ranging / Photonics. MDPI, 2023. Т. 10. №. 11. С. 1215–1232. .
3. Arnold D. A. Method of calculating retroreflector-array transfer functions. 1978. №. NASA-CR-157932. С. 169.
4. Садовников М. А., Соколов А. Л. Пространственная поляризационная структура излучения, формируемая уголковым отражателем с неметаллизированными гранями. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 107. №. 2. С. 213–218.
5. Программа запуска малых космических аппаратов «УниверСат» // Роскосмос URL: <https://www.roscosmos.ru/23836/> (дата обращения: 10.09.2024).

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫНУЖДЕННОГО
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ И ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ
МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА НА ПРОЦЕСС ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ
ГАРМОНИКИ НЕОДИМОВОГО ЛАЗЕРА**

А. М. Болтаев, А. В. Зубков, В. П. Коваленко, В. М. Рябцев

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Рассмотрено влияние вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна на процесс преобразования излучения неодимового лазера во вторую гармонику в кристаллах KDP большой апертуры [1, 2]. Разработана расчётная модель механизма формирования ВКР и ВРМБ в кристалле-преобразователе излучения на лазерной установке нового поколения и определены предельные условия работы удвоителя. Проведённые на установке эксперименты подтверждают отсутствие существенного влияния ВКР и ВРМБ на эффективность преобразования при используемом в настоящее время диапазоне интенсивностей излучения основной частоты на выходе канала.

Литература

1. Bel'kov S. A., Dolgoplov Yu. V., Kochemasov G. G. et al. Voronich Experimental investigation of the transverse SBS excitation in anisotropic crystals // SPIE. 1997. Vol. 2633. P. 513–520.
2. Bel'kov S. A., Kochemasov G. G., Kulikov S. M. et al. Stimulated Raman Scattering in Frequency conversion Crystals // SPIE. 1997. Vol. 2633. P. 506–512.

**СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ
Tm, Ho: Y₂O₃**

*Е. М. Бузаева¹, П. А. Рябочкина¹, А. О. Арускин¹, Р. Н. Максимов^{2,3}, В. А. Шумов²,
В. В. Осипов²
katyabuzaeva@yandex.ru*

¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарёва, Саранск

²Институт электрофизики Уральского Отделения Российской академии наук, Екатеринбург

³Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург

Полуторные оксиды, активированные редкоземельными элементами, являются перспективными материалами для создания на их основе твердотельных лазеров с диодной накачкой [1]. Преимуществами данных активных сред являются высокие значения теплопроводности, механических характеристик, пиковых сечений поглощения и вынужденного излучения. Выращивание монокристаллов полуторных оксидов удовлетворительного оптического качества, из-за высокой температуры плавления (~2450 °С) является затруднительным. Поэтому в настоящее время активно исследуется лазерная керамика на основе полуторных оксидов, активированных ионами редкоземельных элементов [2].

В данной работе впервые представлены результаты исследований спектрально-люминесцентных характеристик лазерной керамики на основе оксида иттрия Y₂O₃, соактивированного ионами тулия Tm³⁺ и гольмия Ho³⁺. Выбор данного состава керамик обусловлен возможностью осуществления накачки с использованием полупроводниковых лазерных линеек и матриц с длиной волны излучения ~ 800 нм на уровень ³H₄ ионов Tm³⁺.

В настоящей работе исследовались образцы концентрационного ряда керамик 3%Tm, 0.3%Ho:Y₂O₃, 3%Tm, 0.6%Ho:Y₂O₃, 3%Tm, 1%Ho:Y₂O₃. Получение керамических образцов производилось методом твердофазного вакуумного спекания наноразмерных частиц со сложным химическим составом, синтезированных методом лазерной абляции.

Анализ полученных спектров пропускания керамических образцов свидетельствует о достаточно высоком оптическом качестве образцов. Методом оптической микроскопии выявлено наличие структурных дефектов в виде сферических пор диаметром от 2 до 8 мкм, однородно распределённых по глубине и поверхности керамик.

Зарегистрированные при возбуждении излучением с длиной волны 811 нм спектры люминесценции представляют собой суперпозицию полос, соответствующих переходам ³F₄→³H₆ ионов Tm³⁺ и ⁵I₇→⁵I₈ ионов Ho³⁺. Выявлено наличие безызлучательного переноса энергии с уровня ³F₄ ионов Tm³⁺ на уровень ⁵I₇ ионов Ho³⁺.

Литература

1. Fornasiero L., Mix E., Peters V., Petermann K., Huber G. New Oxide Crystals for Solid State Lasers // Cryst. Res. Technol. 1999. V. 34. P. 255–260.
2. Kaminskii A.A., Akchurin M.S., Gainutdinov R., Takaichi K., Shirakawa A., Yagi H., Yanagitani T., K. Ueda. Microhardness and fracture toughness of Y₂O₃- and Y₃Al₅O₁₂ -based nanocrystalline laser ceramics // Crystallogr. Rep. 2005. V. 50, № 5. P. 869–873.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАЗЦОВ ВЕЩЕСТВ
В ВИДИМОЙ И БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТЯХ В МНОГОПРОХОДНОЙ
ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ С НАКОПЛЕНИЕМ СИГНАЛА**

*И. А. Быкова¹, А. О. Углов¹, Г. С. Рогожников²
marshmallowbear@yandex.ru*

¹Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С. П. Королева, Самара

²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам экспресс-диагностики веществ и биологических тканей на предмет их качественного состава [1]. Таким образом проводится как контроль качества продукции, так и диагностика заболеваний у животных и человека [2]. Основными способами экспресс диагностики сейчас являются электрохимические и оптические методы. Электрохимические методы пока являются наиболее точными, но требуют больших затрат за счет изготовления индивидуальных тест систем для каждого химического соединения или комплекса. Оптические методики в данном аспекте являются более перспективными из-за возможности регистрации общей спектральной картины и выявления информации об отдельных веществах путем математической обработки.

В данной работе проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования спектральных характеристик микропрепаратов на основе органических красителей для выявления минимально возможных количеств веществ, необходимых для информативной диагностики. В экспериментах задействована многопроходная оптическая схема с накоплением сигнала, широкополосный источник оптического излучения и широкополосный спектрометр, работающий по схеме Черни-Тернера. Полученные результаты позволяют надеяться, что проведенные исследования станут базовыми исходными данными для создания систем экспресс диагностики биологических тканей на наличие заболеваний и контроля состава веществ, в том числе в пищевой промышленности и фармацевтике.

Литература

1. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике : [монография] / Тучин В. В. ; пер. с англ. Дербов В. Л. ; ред. пер. Тучин В. В. - М. : Физматлит, 2012. - 811 с., [6] л. ил. : ил. - Библиогр.: с. 691–795. - ISBN 978-5-9221-1422-6.
2. Разработка комплекса инвазивной малотравматичной оптической биопсии // Г. С. Рогожников, Т. Е. Любынская // X международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2021. 321–322, – URL: (дата обращения: 25.06.2024).

УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В. О. Васюкевич, А. О. Липатов, А. Н. Маначинский, А. В. Яхлов

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

В настоящее время в ряде ведущих стран мира созданы или создаются лазерные установки нового поколения с мегаджоульным уровнем энергии: NIF (США), LMJ (Франция), Shenguang IV (Китай) [1-6]. Одним из важных применений данных установок, в том числе многоканальной мощной лазерной установки мегаджоульного уровня энергии, созданной в России, является облучение и сжатие мишеней с термоядерным топливом – проведение экспериментов по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) [7]. Для достижения высоких температур, при которых происходит «зажигание», необходимо осуществить доставку в мишенную камеру взаимодействия – место расположения мишени – 192 лазерных пучка с наносекундной длительностью (разделенных на 24 лазерных модуля по 8 каналов в каждом) с суммарной энергией более 2 МДж. Для получения такой энергии лазерный импульс (ЛИ) задающего генератора подается на вход главного усилителя, использующего 4-х проходную схему прохождения усиливаемого импульса по активной среде, которая накачивается мощными импульсными лампами накачки, что в последствие вносит так называемые «тепловые» aberrации, возникающие в ходе нагрева активной среды. На протяжении всего пути, которое проходит ЛИ, располагается большое количество (с учетом 4 проходов более 100) оптических элементов, которые вносят фазовые искажения в лазерный пучок, увеличивая aberrации волнового фронта.

Адаптивная система, включающая в себя деформируемое зеркало (ДЗ), датчик волнового фронта (ДВФ), блок управления (БУ), применяется на многопроходных лазерных установках нового поколения для компенсации статических и «тепловых» фазовых искажений [8]. Это позволяет существенно облегчить юстировку оптического тракта, наведение на мишень, и позволяет получить практически плоский волновой фронт на выходе из усилительного тракта с расходимостью излучения $\theta \leq 5 \cdot 10^{-5}$ радиан.

Основным методом коррекции тепловых aberrаций, возникающих при нагреве активной среды, является придание формы поверхности деформируемого зеркала, обеспечивающей после четырехкратного прохождения ЛИ через усилители фазовую компенсацию aberrаций, возникающих в усилительном тракте. С целью улучшения качества коррекции остаточных aberrаций, был применён итерационный подход с разложением по полиномам Цернике до 10-го порядка включительно всех волновых фронтов, с которыми работает адаптивная система.

	1 канал	2 канал	3 канал	4 канал	5 канал	6 канал	7 канал	8 канал
PV, мкм	1,09	0,93	0,71	0,88	0,76	0,78	1,18	1,04
RMS, мкм	0,16	0,14	0,11	0,13	0,15	0,13	0,16	0,14
θ , рад	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$

Результаты экспериментов с применением итерационного подхода и разложения по полиномам Цернике для 8 каналов на многоканальной мощной лазерной установке.

Литература

1. Miquel J-L, Lion C., Vivini P. The Laser Mega-Joule: LMJ&PETAL status and Program Overview // 8th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2013).
2. Lawrence Livermore National Laboratory. ICF Quarterly Report. Special Issue: National Ignition Facility. April-June 1997. Vol. 7, № 3.
3. Andre M. L. Status of the LMJ Project // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3047. P. 38
4. Colin N. Danson, Haefner Constantin, Bromage Jake et al «Petawatt and exawatt class lasers worldwide» // High Power Laser Science and Engineering (2019), Vol. 7, e54, 54 p.
5. Bookless W. A. The National Ignition Facility // Energy & Technology. Review. UCRL-52000-94-12 – 1994.
6. Шанин О. И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках. Москва: Техносфера, 2012. – 200с, ISBN 978-5-94836-313-4 .
7. Belkov S. A., Garanin S. G., Shagalkin Yu.V.UFL-2M facility - initial steps for construction // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics & Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2013), Moscow, June 18-22, 2013, Technical Digest.
8. Бельков С. А., Зималин Б. Г., Круглов П. Ю. и др. «Коррекция волнового фронта на многоканальной мощной лазерной установке нового поколения» 2023. Т. 53, № 11. (617). С. 873–877.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛОВ ВВОДА/ВЫВОДА ФОТОННОЙ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ**

О. С. Вязанкин¹, А. И. Бобров², П. В. Волков¹, Д. А. Семиков¹, А. В. Нежданов²
vyazankin.os@ipmras.ru

¹Институт физики микроструктур Российской академии наук, Афонино

²Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород

В настоящее время бурно развивается сфера создания и использования фотонных интегральных схем (ФИС), например в сенсорики или волоконно-оптической связи. ФИС – это планарный микрочип, содержащий в себе более одного фотонного компонента, образующего схему, выполняющую обнаружение, генерацию, транспортирование и различную обработку излучения [1]. Основным преимуществом планарной схемы является миниатюрность, так выполненные по технологии кремний на изоляторе (КНИ) волноводы имеют субмикронную геометрию.

Для исследования параметров планарных схем используют согласующие узлы, направляющие излучение из SMF волокна в волновод и наоборот. Их можно реализовать при помощи дифракционных решёток в вертикальном вводе [2–3], что позволяет более эффективно размещать исследуемые ФИС на чипе, или торцевых планарных элементов, имеющих высокую эффективность и сохраняющих двухмерность схемы, но ограниченных размещением только по периметру чипа.

В данной работе приведен результат исследования различных узлов связи одномодового оптоволоконного SMF и ФИС. Найдены оптимальные параметры элементов ввода\вывода, по которым они были созданы и исследованы экспериментально. Также был рассмотрен допустимый технологический разброс, определяющий минимальное разрешение для фотолитографии при создании элементов ФИС без сильного изменения их характеристик.

Литература

1. Yue Yu and Xiankai Sun. Etchless photonic integrated circuits enabled by bound states in the continuum: tutorial // J. Opt. Soc. Am. 2023. В 40, 2801–2808.
2. W. Bogaerts, D. Taillaert, B. Luyssaert, P. Dumon, J. Van Campenhout, P. Bienstman, D. Van Thourhout, R. Baets, V. Wiaux, and S. Beckx // "Basic structures for photonic integrated circuits in Silicon-on-insulator" // Opt. Express. 2004. 12, 1583–1591.
3. Roelkens, Günther & Vermeulen, Diedrik & Selvaraja, Shankar Kumar & Halir, Robert & Bogaerts, Wim & Thourhout, Dries (2011) // Grating-Based Optical Fiber Interfaces for Silicon-on-Insulator Photonic Integrated Circuits. Selected Topics in Quantum Electronics // IEEE Journal of. 17. 571–580. 10.1109/JSTQE.2010.2069087.

**АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ И КОММУТАЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ЗА 2020–2023 гг.**

*А. А. Гарелина, А. Г. Арзев, Л. С. Ганин, Е. Н. Задорожная, Е. В. Коженков, А. В. Креков,
В. И. Лесков, В. А. Осин, В. В. Свиридов, Р. А. Фомин*

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Для обеспечения электрической энергией импульсных ламп накачки силовых усилителей установки нового поколения предназначена система накопления и коммутации электрической энергии (СНКЭЭ), основу которой составляет конденсаторная батарея, построенная по модульному принципу. Один модуль СНКЭЭ содержит 10 идентичных параллельных разрядных контуров, осуществляющих питание 20 ламп накачки одной секции лазерного усилителя, и общий контур предионизации. Для разряда накопителей впервые применены полупроводниковые коммутаторы на основе реверсивно включаемых динисторов, коммутирующие импульсные токи амплитудой до 250 кА длительностью около 500 мкс.

В настоящее время на установке нового поколения проводятся эксперименты, где задействованы 36 модулей СНКЭЭ с общей запасаемой энергией около 30 МДж при рабочем напряжении 24 кВ.

В данной работе представлены результаты работы СНКЭЭ в течение 2020–2023 гг. Показано устройство и принцип работы системы. Приведена статистика срабатываний модулей накопителя в различных режимах. Описаны проблемы, возникавшие при проведении экспериментов, методы их выявления и пути решения.

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВТОРОЙ
ГАРМОНИКИ НА ВХОДЕ ФИНАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ
УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

А. А. Горбунов, О. И. Горчаков, А. Г. Кравченко, К. В. Стародубцев

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Проведение экспериментов с облучением мишеней в камере многоцелевого исследовательского комплекса установки нового поколения производится излучением 2ω . Для описания облучательных экспериментов с различными типами мишеней необходимо знание параметров излучения 2ω . С этой целью на этапе создания проекта установки была спроектирована система диагностики параметров лазерного излучения на входе финального оптического модуля (СДПЛИ ФОМ), предназначенная для проведения измерений энергии и длительности импульсного лазерного излучения 2ω поступающего на финальный оптический модуль установки нового поколения, вследствие чего в СДПЛИ ФОМ реализуются две методики измерений.

В работе представлена разработанная и реализованная методика измерений энергии лазерного излучения второй гармоники на входе финального оптического модуля установки нового поколения в состав которой входят:

- средство измерений энергии импульсного лазерного излучения 2ω многоканальное, осуществляющее измерения полной энергии лазерного пучка в градуировочных экспериментах;
- регистратор излучения 2ω , осуществляющий отбор и определение значений энергии 2ω в штатных (рабочих) экспериментах;
- конструктивные элементы крепления, предназначенные для размещения приборов в проектное положение;
- система автоматического управления, предназначенная для включения и настройки технологического оборудования, автоматической юстировки блоков приёмно-распределительных оптических, автоматизации всех процессов при подготовке и проведении экспериментов.

**РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
АКТИВНЫХ АТОМОВ В СОСТАВЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ
С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**

Г. Н. Качалин, А. В. Самсонов, Д. А. Елхимов

Филиал Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Саров

Сообщается о разработке и экспериментальной апробации двух методик определения концентрации атомов щелочного металла в активной среде лазера с накачкой излучением лазерных диодов и протоком активной среды по замкнутому циклу. Приводятся измеренные значения концентраций рубидия и цезия в активных средах лазеров с продольной и поперечной накачкой для различных тепловых и газодинамических режимов работы лазера. Исследовано изменение концентрации паров рубидия под влиянием нагрева газового потока в режиме генерации, показаны различия в температуре буферной газовой смеси и в эффективной температуре насыщенного пара рубидия. Измеренные значения концентрации рубидия используются для оптимизационных расчётов выходных параметров лазера в программном пакете DPALcross3D.

Ключевые слова: *лазер на парах щелочного металла, поперечная диодная накачка, продольная диодная накачка, измерение концентрации паров рубидия, проток активной среды.*

**ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ ПРЯМОЙ ПЕРЕНОС ДЛЯ КЛЕТочНОЙ ПЕЧАТИ
И НАНЕСЕНИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ НАНОЧАСТИЦ**

В. С. Жигарьков
vzhigarkov@gmail.com

Институт фотонных технологий Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Лазерная печать, основанная на методе прямого лазерно-индуцированного переноса (Laser-Induced Forward Transfer, LIFT) [1, 2], обладает значительным научным и практическим потенциалом. Метод LIFT зарекомендовал себя как эффективный инструмент для создания трехмерных объектов на макроуровне, аддитивного нанопроизводства, а также для печати разнообразных материалов, включая биоматериалы и функциональные микроустройства [3].

Особое внимание в рамках LIFT уделяется микробиологическим задачам [4]. Так, быстрый прогресс в генетических технологиях развил новые методы секвенирования биополимеров, что значительно расширило возможности исследования микроорганизмов. Однако большинство микроорганизмов остаются некультивируемыми с использованием традиционных лабораторных подходов. В этой связи одной из ключевых задач современной микробиологии становится разработка новых методов выделения и культивирования этих организмов. Применение ранее неизученных микроорганизмов может способствовать решению множества глобальных проблем, включая синтез новых природных антибиотиков, производство биологически активных веществ с помощью инновационных продуцентов и создание банка микроорганизмов для сохранения биоразнообразия и защиты уникальных штаммов без изменения их природных свойств. Для решения поставленной задачи был разработан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий прецизионный перенос малых объемов геля (от десятков пиколитров) с микробными объектами из природных гетерогенных сред на различные акцепторные питательные среды. Эта технология получила название лазерной инженерии микробных систем (ЛИМС) [5]. В рамках ЛИМС импульсное лазерное излучение используется для переноса отдельных микроорганизмов или их консорциумов в геле на питательную среду. Такой подход сохраняет естественное окружение микроорганизмов и минимизирует нежелательные взаимодействия между антагонистичными организмами благодаря высокому пространственному разделению. Дополнительные физические факторы могут инициировать размножение микроорганизмов, активируя их из пассивного состояния [6]. В докладе представлены результаты применения ЛИМС для выделения чистых микробных культур, с использованием проточной цитофлуориметрии обсуждаются возможности и недостатки предлагаемой технологии [7].

Перспективным направлением является также лазерная печать фотолюминесцентными наноматериалами, которые приобрели широкое применение благодаря способности обеспечивать «обратную связь» с нанообъектами через фотолюминесцентный отклик. Особый интерес здесь представляют апконвертирующие наночастицы, обладающие антистоксовой люминесценцией, что обусловлено нелинейным оптическим процессом преобра-

зования света с увеличением частоты испускаемых квантов. Благодаря своим фотолюминесцентным свойствам, апконвертирующие наноматериалы находят применение в фотонике, что дает возможность создавать различные устройства и развивать новые технологии, такие как 3D-дисплеи [8], наносенсоры [9], низкотоксичные высоколюминесцентные бионанозонды [10], анти-контрафактные метки, солнечные элементы [11], 3D-печать [12] и многофотонная апконверсионная микроскопия сверхвысокого разрешения [13].

В рамках доклада будут представлены результаты печати апконвертирующих наночастиц вида ядро/оболочка $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}\text{Tm}^{3+}/\text{NaYF}_4$ со средним размером 30 нм с проверкой сохранения их функциональных характеристик. Высокое пространственное разрешение печати обеспечивается за счет создания на донорной подложке структуры «сэндвича»: для надежной фиксации наночастицы располагаются между слоями золота с толщинами 50 нм и 20 нм. Перенос АН реализован при фокусировании наносекундного лазерного излучения в пятно с диаметром ~ 30 мкм и при оптимальных энергиях в импульсе 8.5–25 мкДж [14].

Работа поддержана грантом РФФ № 20-14-00286 в части разработки программно-аппаратных комплексов для лазерной печати.

Литература

1. Adrian F. J., Vac J. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. 5, 1490 (1987).
2. P. Serra and A. Piqué // Adv. Mater. Technol. 2019. 4, 1.
3. Q. Li, D. Grojo, A.-P. Alloncle, B. Chichkov, and P. Delaporte // Nanophotonics. 2018. 8, 27.
4. P. Liang, B. Liu, Y. Wang, K. Liu, Y. Zhao, W. E. Huang, and B. Li // Appl. Environ. Microbiol. 2022. 88.
5. V. I. Yusupov, M. V Gorlenko, V. S. Cheptsov, N. V Minaev, E. S. Churbanova, V. S. Zhigarkov, E. A. Chutko, S. A. Evlashin, B. N. Chichkov, and V. N. Bagratashvili // Laser Phys. Lett. 2018. 15, 065604.
6. V. Cheptsov, V. Zhigarkov, I. Maximova, N. Minaev, and V. Yusupov // World J. Microbiol. Biotechnol. 2023. 3.
7. E. V. Grosfeld, V. S. Zhigarkov, A. I. Alexandrov, N. V. Minaev, and V. I. Yusupov // Int. J. Mol. Sci. 2022. 23.
8. R. Deng, F. Qin, R. Chen, W. Huang, M. Hong, and X. Liu // Nat. Nanotechnol. 2015. 10, 237.
9. Green K. K., Wirth J., and Lim S. F. // Sci. Rep. 2017. 7, 762.
10. А. Г. Шмелев, В. Г. Никифоров, Д. К. Жарков и др. // Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая. 2020. 84, 1696.
11. S. Hao, Y. Shang, D. Li, H. Ågren, C. Yang, and G. Chen, Nanoscale 9, 6711 (2017).
12. П. А. Демина, К. В. Хайдуков, В. В. Рочева, Р. А. Акасов, А. Н. Генералова, and Е. В. Хайдуков, PHOTONICS Russ. 16, 600 (2022).
13. C. Chen, F. Wang, S. Wen, Q. P. Su, M. C. L. Wu, Y. Liu, B. Wang, D. Li, X. Shan, M. Kianinia, I. Aharonovich, M. Toth, S. P. Jackson, P. Xi, and D. Jin, Nat. Commun. 9, 3290 (2018).
14. Zhigarkov V. S., Yusupov V. I., and Khaydukov E. V. // JETP Lett. 2024. 120, 151.

РАСПАД МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ НЕОНА В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ ВОЛНЫ ИОНИЗАЦИИ

В. В. Залетов, А. И. Шишпанов, Ю. З. Ионих
vlad.zaletov@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Волной ионизации (ВИ) называют уединенную волну электрического поля, образованную объемными и поверхностными зарядами, распространяющуюся вдоль разрядного промежутка [1]. Благодаря высокой напряженности поля на фронте ВИ, в этой зоне возникают быстрые электроны, которые активно производят ионизацию и возбуждение атомов. Поэтому ВИ используют, в частности, в качестве механизма продольной накачки газоразрядных лазеров и в разрядниках для быстрой коммутации устройств. В данной работе исследовался одноэлектродный разряд, в котором удобно исследовать состояния частиц газа в послесвечении, вызванным прохождением ВИ [2].

Проведена серия экспериментов с длинными разрядными трубками (длина 80 см, диаметр 1,6 см), заполненных неоном при давлениях $p = 0,6\text{--}10$ Торр. В них возбуждался одноэлектродный пробой, для чего на один из электродов трубки подавался прямоугольный импульс напряжения положительной полярности с длительностью фронта ≈ 50 нс и амплитудой U_0 , которую можно было регулировать. Концентрация атомов на метастабильном уровне $1s_5(^3P_2)$ измерялась в послесвечении одноэлектродного пробоя методом поглощения [3]. Источником просвечивающего излучения служил тлеющий разряд в неооне при давлении 0,5 Торр. Излучение собиралось ортогонально оси трубки. Исследовался промежуток времени от $\approx 0,1$ до 4 мс после прохождения ВИ.

Спад концентрации метастабильных атомов во времени оказался близким к экспоненциальному, что позволило определить характерные времена распада (τ) после пробоя при различных давлениях и амплитудах импульсов напряжения. При увеличении U_0 от 2,5 до 4,5 кВ концентрация метастабильных атомов, оставшихся после ВИ, возрастает от 2 до $7 \cdot 10^{10}$ см⁻³. При этом τ не зависит от напряжения. При увеличении давления концентрация возбужденных атомов увеличивается, в то время как зависимость $\tau(p)$ имеет максимум (0,8 мс) в области $p = 3$ Торр. Проведенные оценки показали, что наиболее значимыми процессами гибели метастабильных атомов в рассматриваемых условиях является диффузия и перемешивание атомами с резонансным состоянием $1s_4(^3P_1)$. При этом расчетная зависимость $\tau(p)$ качественно ведет себя сходным с наблюдаемым в эксперименте образом, хотя имеются некоторые расхождения в области давлений 5–10 Торр. Для более низких давлений экспериментальные и расчетные значения τ оказались близки друг к другу.

Литература

1. Василяк, Л. М., Костюченко, С. В., Кудрявцев, Н. Н., Филюгин, И. В. Высокоскоростные волны ионизации при электрическом пробое. УФН, 1994. 164, 263–286.7.
2. Shishpanov, A. I., Bazhin, P. S., Ivanov, D. O., Meschanov, A. V. Low-frequency one-electrode discharge in long tubes at low gas pressure. Plasma Research Express, 2020. 2(1), 015012.
3. Очкин, В. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. Litres. 2022.

ЧИРПИРОВАННЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ, ЗАПИСАННЫЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ В АКТИВНОМ ВОЛОКНЕ, ЛЕГИРОВАННОМ ИТТЕРБИЕМ, ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРА, КОМПЕНСАЦИИ ПОТЕРЬ И ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СРА-СХЕМЕ

*А. Е. Запрялов¹, М. Ю. Контев¹, А. А. Вольф², Д. С. Лунатов³, М. Е. Лухачев⁴,
С. В. Муравьев¹, А. В. Ким¹
zaprialov12345@mail.ru*

¹Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
Нижний Новгород

²Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск

³Институт химии особо чистых веществ им. Г. Г. Девярых Российской академии наук,
Нижний Новгород

⁴Институт общей физики им. Прохорова Российской академии наук,
Научный центр волоконной оптики им. Дианова, Москва

Построение полностью волоконного стретчера для СРА-систем является достаточно сложной задачей, особенно если требуется обеспечить растяжение фемтосекундных импульсов до длительностей 100 и более пикосекунд с последующим эффективным сжатием. Для таких задач становится существенным влияние дисперсий высших порядков и нелинейных эффектов при усилении на форму сжатого импульса [1]. Использование куска оптоволокна в качестве стретчера, даже если его дисперсионный профиль соответствует профилю компрессора, не лучшая идея, так как такие стретчеры требуют большого количества волокна, а также их параметры дисперсии невозможно регулировать в процессе эксплуатации. Другая проблема стретчеров на основе куска волокна состоит в том, что при использовании компрессора Трейси от стретчера требуется нормальная дисперсия групповой скорости, что легко обеспечить (из-за свойств кварцевого стекла) в диапазоне 1 мкм и гораздо сложнее в диапазонах 1,5 и 2 мкм [2]. Лучшим решением для растяжения импульсов в волоконных системах СРА является использование чирпированных волоконных брэгговских решеток. Основным недостатком решеток, записываемых методом РbР, является высокий уровень рассеяния на пустотах, образующих решетку. Это приводит не только к значительному уровню потерь при отражении от таких решеток, но и к неоднородности отраженного спектра.

В этой работе представлен новый подход, основанный на точечной РbР-записи чирпированных брэгговских решеток [3] в высоколегированном активном иттербиевом волокне. Основная идея заключается в том, что спектрально-зависимые потери, характерные для метода РbР, могут быть компенсированы за счет усиления в иттербиевом волокне, поскольку коротковолновые компоненты, которые испытывают большие потери на отражение, получают более высокий коэффициент усиления за счет большего пробега в активном волокне. Использование активного волокна также помогает решить проблему высоких потерь на рассеяние, свойственных РbР методу. В работе были исследованы спектральные и усиливающие свойства таких решеток в зависимости от мощности и направления накачки. Примене-

ние ЧВБР с оптимальной накачкой позволило растянуть 300-фемтосекундные импульсы до 100 пикосекунд, а затем усилить и сжать их до длительности, близкой к исходной, что, как нам известно, является первым успешным примером использования ЧВБР, записанных методом РbР, в качестве стретчера в оптоволоконной системе CPA [4].

Литература

1. Бодров С. Б. Фемтосекундные волновые процессы: учебное пособие / С. Б. Бодров ; Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. 73 с.
2. Звелто О. Принципы лазеров. Пер. под науч. ред. Т. А. Шмаонова. 4-е изд. : учебные пособия для вузов. Специальная литература / О. Звелто; СПб: Издательство «Лань», 2008. С. 720 с. – ISBN 978-5-8114-0844-3.
3. Femtosecond laser inscribed chirped fiber Bragg gratings / X.-P. Pan, Q. Guo, Y.-D. Wu, S.-R. Liu, B. Wang, Y.-S. Yu, H.-B. Sun // Opt. Lett. 46 (2021) 2059. <https://doi.org/10.1364/OL.422576>
4. Ulyanov I. Point-by-point inscription of chirped apodized fiber Bragg gratings for application as ultrashort pulse stretchers / I. Ulyanov, D. V. Przhialkovskii, O. V. Butov; Results in Physics 32 (2022) 105101. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.105101>.

**ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИИ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ
ДЛЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

А. Ю. Игуменов
igumenov.au@mipt.ru

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва

В данной работе проведен ряд исследований систем оптической стабилизации эрбиевых усилителей с удаленной оптической накачкой и распределенных усилителей на основе вынужденного комбинационного рассеяния. Оптическая стабилизация основана на создании лазерной генерации на длине волны внутри спектра усиления усилителя путем помещения усилителя в спектрально-селективный линейный резонатор.

**ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ РАБОЧИХ СМЕСЕЙ
ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ**

*Р. Ф. Иمامов¹, Л. М. Виноградский¹, Г. Н. Качалин^{1,2}, Д. С. Назаров¹,
А. В. Самсонов^{1,2,3}, А. С. Шулаев¹*

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

²Филиал Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Саров

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Лазеры с диодной накачкой сочетают в себе значительные уровни мощности накачки с малой теплоёмкостью активной среды. В последнее время лазеры данного типа получают все более широкое распространение, связанное с их преимуществом, в числе которых высокий КПД, низкий квантовый дефект уровней и т. д. В процессе подготовки лазерной кюветы и при проведении профилактических работ с ней используются различные типы химически инертных газов. Также в качестве буферного газа используются гелий, метан и этан. К чистоте этих газов предъявляются существенные требования.

В представленной работе приведено описание технологии подготовки и аттестации исходных газообразных веществ, а также способ приготовления рабочих смесей для наполнения кювет газовых лазеров с диодной накачкой, которые обеспечивают сохранение эксплуатационных параметров на протяжении нескольких недель.

**ОДНОВРЕМЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА ТРЁХ ДЛИНАХ ВОЛН В СРЕДЕ
ГЕЛИЙ–АРГОН–КРИПТОН С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ**

А. А. Калачева, Ю. А. Адаменков, М. А. Горбунов, Е. В. Кабак, В. А. Шайдулина, А. В. Юрьев
[oefimova@otd13.vniief.ru](mailto: oefimova@otd13.vniief.ru)

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

На стенде лазера с оптической накачкой на инертных газах (ЛОНИГ) [1-3] была получена лазерная генерация одновременно на трёх длинах волн (912,3 нм, 893,1 нм и 877,7 нм) с использованием газовой смеси, состоящей из 98% He (буферный газ), 1,5% Ar и 0,5% Kr [4].

Экспериментально исследована зависимость мощности генерации и отношения интенсивностей отдельных линий в общей генерации от расхода газовой смеси, давления в кювете и частоты следования импульсов разряда.

Полученные результаты экспериментов показывают принципиальную возможность получения одновременной генерации на двух атомах инертных газов при их одновременной накачке. Варьируя расход газовой среды и частоту следования разрядных импульсов, можно получить произвольное соотношение интенсивностей на обеих длинах волн генерации. В проведённых экспериментах отношение интенсивностей лазерной генерации на атомах аргона и криптона были практически равны при частоте следования импульсов разряда – от 80 до 100 кГц, расходе смеси – от 8 до 9 л/мин, давлении смеси – от $1,2 \cdot 10^5$ до $1,4 \cdot 10^5$ Па. Максимально достигнутый уровень мощности лазерного излучения (суммарно на всех длинах волн) составил порядка 8 мВт.

Лазерное устройство, позволяющее генерировать излучение на двух близких длинах волн равной интенсивности, может оказаться полезным для получения излучения в терагерцовом диапазоне, так как разностная частота длин волн 912,3 нм и 893,1 нм составляет 7 ТГц.

Литература

1. Михеев П. А. Лазеры на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой // Квантовая электроника. 2015. 45. № 2.
2. J. Han, M.C. Heaven, P. J. Moran, et al. Demonstration of a CW diode-pumped Ar metastable laser operating at 4 W // Optics Letters. 2017. Vol. 42, N 22. P. 4627-4630
3. Адаменков А. А., Адаменков Ю. А., Волков М. А. и др. // Квантовая электроника. 2022. 52(8). 695.
4. Quingshan Liu, Rui Wang, Zining Yang et.al. // High Power Laser Science and Engineering, 2023. 11, e87.

**ИСТОЧНИК УЛЬТРАХОЛОДНЫХ АТОМОВ ^{87}Rb ДЛЯ АТОМНОГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА-ГРАВИМЕТРА***Д. Н. Канюста*
dmitriikapusta@mail.ru

Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

Разработка сверхчувствительных квантовых сенсоров на основе интерференции ультрахолодных атомов открывает большие перспективы для нового поколения приборов и устройств, таких как акселерометры, гравиметры, градиентометры, гироскопы и т. д. [1]. Они сочетают высокую эффективность измерений с компактностью и мобильностью. В этом контексте абсолютные квантовые гравиметры представляют большой интерес. Они имеют преимущества в таких приложениях, как метрология (стандарты массы, стандарты частоты), навигация, геофизика и т. д.

По результатам работы был создан источник ультрахолодных атомов для квантового интерферометра-гравиметра, основой которого является магнитооптическая ловушка (МОЛ). Получено облако 10^7 – 10^8 атомов ^{87}Rb с температурой около 2 мкК. Проведена компенсация остаточного магнитного поля до уровня порядка 10 мГс с использованием микроволновой спектроскопии магнитодипольных переходов, что позволило провести глубокое субдоплеровское охлаждение атомов. Осуществлена их селективная микроволновая и оптическая накачка в основное немагнитное квантовое состояние $|F=1, m_F=0\rangle$ в количестве более 15 % от изначального числа атомов в МОЛ. Проведено исследование двухфотонных рамановских переходов между сверхтонкими подуровнями основного состояния $|F=1,2\rangle$ и выполнена регистрация сигнала атомной интерференции в двух-импульсной схеме – резонансов Рамси. В работе реализован атомный интерферометр по трех-импульсной схеме с использованием встречных рамановских пучков и с временем свободного падения атомов до 20 мс. Была проведена регистрация сигнала атомной интерференции (рис. 1). Осуществлено измерение ускорения свободного падения с точностью на уровне около единиц мГал.

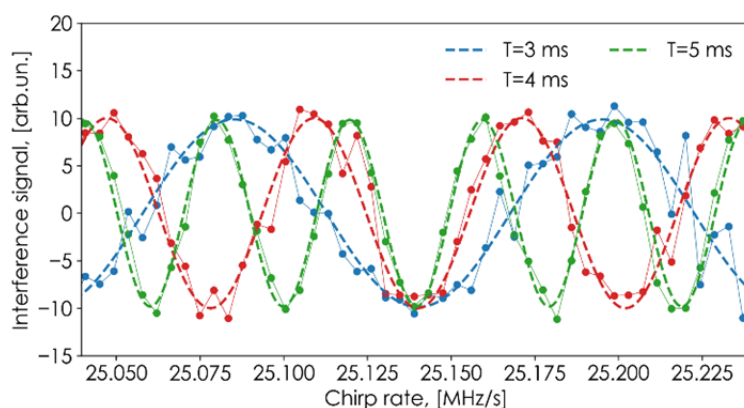


Рис. 1. Сигналы атомной интерференции, полученные в ходе сканирования скорости chirпирования частоты рамановского излучения для различных времен между рамановскими импульсами (3, 4 и 5 мс)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-12-00182.

Литература

1. R. Geiger et al, AVS Quantum Sci. 2, 024702 (2020)

ИНТЕРРОГАТОР НА ОСНОВЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ОПРОСА ТОЧЕЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Е. Е. Ковалев
Egor.Kovalev@skoltech.ru

Сколковский институт науки и технологий, Москва

Введение

В последнее время оптоволоконные сенсоры всё активнее входят в различные сферы нашей жизни, предлагая уникальные преимущества в самых разных областях: от инфраструктурного мониторинга до медицины и телекоммуникаций. Эти устройства, основанные на передаче и анализе света, обладают высокой чувствительностью, долговечностью и стойкостью к неблагоприятным внешним условиям. Одним из ключевых преимуществ оптоволоконных сенсоров является их способность работать в условиях экстремальных температур и радиации [1], а также в потенциально взрывоопасных средах, где традиционные электрические датчики могут быть неприменимыми. Кроме того, они обеспечивают высокую точность измерений и возможность мониторинга в реальном времени на больших расстояниях, что делает их незаменимыми для ряда промышленных и научных приложений.

Существует множество видов оптоволоконных сенсоров, по принципу работы они разделяются на распределенные и квази-распределенные сенсоры [2]. В распределённых системах измерения производятся вдоль всей длины волокна, что позволяет получать данные с большого количества точек. В свою очередь, квази-распределённые системы используют отдельные сенсоры, размещённые вдоль волокна на определённых участках. Эти сенсоры передают информацию в заранее определённых точках, что позволяет получать более точные данные с конкретных позиций.

Оптический интеррогатор служит для измерения изменений параметров света, прошедшего через оптоволоконные сенсоры, такие как длина волны или интенсивность. В данном докладе будет рассмотрен интеррогатор, применяемый исключительно для квази-распределённых систем. Его основная задача – интерпретация данных, полученных с отдельных сенсоров, что делает его эффективным решением для задач, требующих точечного измерения. Таким образом, оптический интеррогатор используется для мониторинга различных физических величин, таких как температура [3], механические напряжения, давление и перемещение [4]. Большую часть квази-распределённых сенсоров составляют волоконные брэгговские решетки (ВБР), поэтому далее будут рассмотрены алгоритмы опроса именно для этого типа сенсоров. Однако стоит отметить, что текущее устройство интеррогатора может быть использовано для работы со всеми квази-распределёнными сенсорами.

Схемы построения интеррогатора для опроса ВБР можно разделить на две основные категории: те, которые сканируют весь спектр, и те, что перестраивают длину волны для измерений. В первом случае используются устройства на основе спектрометра, позволяющие одномоментно регистрировать широкий диапазон длин волн. Во втором случае применяются системы с перестраиваемым лазером, которые измеряют отклик ВБР, изменяя длину волны в процессе сканирования. Во втором случае также для перестройки длины волны используют перестраиваемые фильтры [5].

Интеррогатор, рассматриваемый в данном докладе, относится к первому типу. В нём в качестве спектрометра используется дифракционная волноводная решётка (ДВР), реализованная на фотонной интегральной схеме (ФИС). Этот элемент выполняет функцию спектрального демультиплексирования, разделяя длины волн по отдельным каналам. По уровню сигнала в каждом из этих каналов можно определить, какая длина волны попадает в резонанс ВБР.

Интеррогаторы на основе ДВР обеспечивают точность определения положения пика длины волны ВБР до 0,32 пм [6], тогда как интеррогаторы на базе перестраиваемого лазера достигают точности менее 0,1 пм [7]. При этом обе схемы используют фотонные интегральные схемы (ФИС) для создания ключевых элементов устройств. Одним из недостатков интеррогаторов на ДВР является низкая мощность, поступающая на фотодетекторы, что связано с низкой спектральной плотностью мощности широкополосного источника и узким спектром отражения ВБР. Однако эта схема отличается простотой реализации, возможностью лёгкой реконфигурации и масштабирования, а также высокой частотой опроса, которая ограничивается лишь рабочей частотой фотодетекторов и электроники. Интеррогаторы на перестраиваемом лазере более популярны благодаря своей универсальности, однако они обладают более сложной структурой и алгоритмами работы, а из-за ограниченной скорости сканирования их частота опроса ниже [8].

Целью данного доклада является демонстрация алгоритма работы интеррогатора на основе ДВР на ФИС для опроса датчиков на ВБР. Разработанный алгоритм может быть использован для детектирования всех типов ВБР датчиков (температуры, механических напряжений и т.д.) в составе систем мониторинга структурной целостности конструкций.

Теория

На рис. 1 представлена схема интеррогатора на ДВР, в состав которой входят: суперлюминисцентный диод (СЛД), циркулятор, ВБР, ДВР, фотодиоды (ФД) и система обработки сигналов.

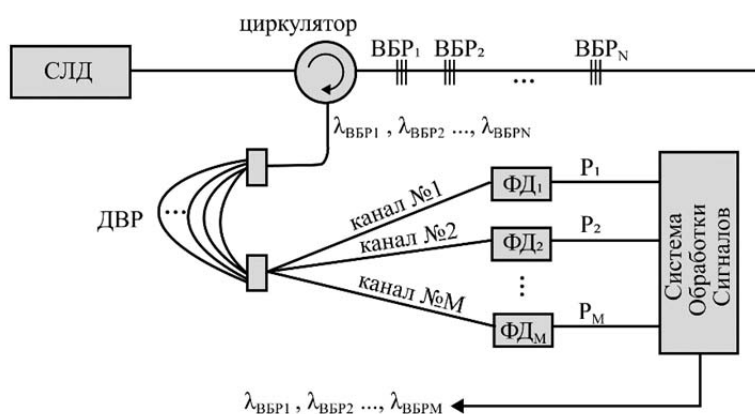


Рис. 1. Схема интеррогатора на ДВР. СЛД – суперлюминисцентный диод, ВБР – волоконная брэгговская решетка, ДВР – дифракционная волноводная решетка, ФД – фотодиод

Принцип работы интеррогатора на основе ДВР для измерений с использованием ВБР заключается в следующем. Свет от широкополосного источника, такого как СЛД, через цир-

кулятор направляется на датчики, чувствительным элементом которых является волоконная брэгговская решётка (ВБР). Каждая ВБР отражает свет на определённой длине волны ($\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$), и это отражение через циркулятор поступает на вход ДВР. Изменения внешних факторов, таких как температура или механические напряжения, влияют на период ВБР, что приводит к сдвигу пика её спектра отражения. ДВР функционирует как спектрально-селективное устройство с выходными каналами, настроенными на определённые длины волн, которые пропускают узкие полосы спектра. Спектр пропускания используемой в данной работе ДВР представлен на рис. 2. Далее система обработки данных регистрирует изменения мощности на фотодетекторах (ФД1, ФД2... ФДМ) и вычисляет положение пика отражённой длины волны для каждого датчика ВБР, что затем преобразуется в измеряемую физическую величину.

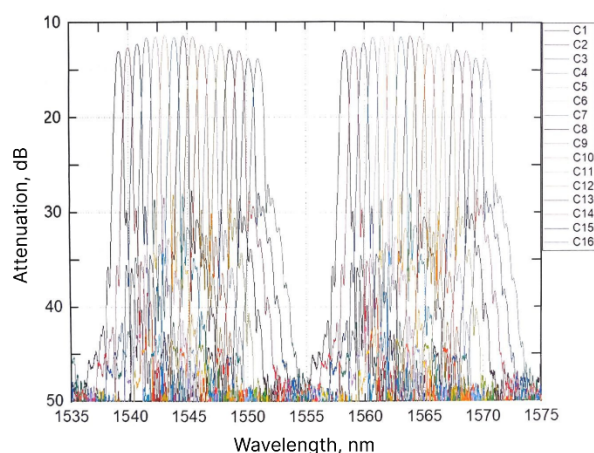


Рис. 2. Спектр пропускания используемой ДВР производства Зеленоградского нанотехнологического центра (ЗНТЦ)

В процессе работы интеррогатора пик отражённого спектра ВБР обычно находится между двумя каналами ДВР, как видно на рис. 3. В каждый момент времени положение этого пика вычисляется на основе мощностей, зафиксированных на соседних каналах.

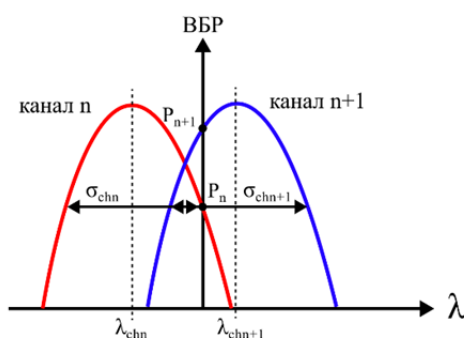


Рис. 3. Положение максимума спектра отражения ВБР в виде дельта-функции относительно спектров пропускания каналов ДВР (канал $n, n+1$) в виде функции Гаусса. λ_n, λ_{n+1} – центральные длины волн каналов ДВР, $\sigma_{chn}, \sigma_{chn+1}$ – полуширина каналов ДВР, P_n, P_{n+1} – детектируемые мощности в каналах ДВР

На рис. 3 рассмотрено приближение, в котором спектр отражения ВБР представляет дельта-функцию ($R_{\text{FBG}}(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_{\text{FBG}})$), а спектр пропускания каналов ДВР – функцию Гаусс-

са (1, 2). Используя данное приближение можно аналитически проанализировать систему и получить качественные выводы о её работе.

В используемом приближении, спектры пропускания каналов ДВР могут быть записаны следующим образом (1, 2):

$$T_{ch\ n}(\lambda) = \frac{1}{\sigma_{ch\ n}\sqrt{2\pi}} \cdot \exp -\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_{ch\ n}}{\sigma_{ch}} \right)^2; \quad (1)$$

$$T_{ch\ n+1}(\lambda) = \frac{1}{\sigma_{ch\ n+1}\sqrt{2\pi}} \cdot \exp -\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_{ch\ n+1}}{\sigma_{ch\ n+1}} \right)^2, \quad (2)$$

где $\sigma_{ch} = \sigma_{ch\ n} = \sigma_{ch\ n+1}$ – полуширина каналов, которые равны между собой для одной ДВР; $\lambda_{ch\ n}$, $\lambda_{ch\ n+1}$ – центральные длины волн каналов ДВР.

Детектируемые мощности в каналах ДВР будут следующими, принимая во внимания фильтрующее свойство дельта-функции:

$$P_n = \int_0^{\infty} T_{ch\ n}(\lambda) \cdot R_{FBG}(\lambda) d\lambda = T_{ch\ n}(\lambda_{FBG}); \quad (3)$$

$$P_{n+1} = \int_0^{\infty} T_{ch\ 2}(\lambda) \cdot R_{FBG}(\lambda) d\lambda = T_{ch\ n+1}(\lambda_{FBG}); \quad (4)$$

В данной работе предлагается использовать отношение мощностей на соседних каналах в качестве ключевой характеристики для определения длины волны ВБР. Этот подход помогает минимизировать влияние колебаний мощности источника света и облегчает обработку данных на микроконтроллерах, требуя меньше вычислительных ресурсов. На каждом этапе предлагается определять два канала с максимальной оптической мощностью, измерять их значения, вычислять отношение мощностей, а затем восстанавливать длину волны пика спектра ВБР с помощью двумерной калибровочной кривой. Далее представлено аналитическое описание метода.

Для выполнения обратной задачи по нахождению длины волны, введем следующую калибровочную функцию:

$$f(\lambda_{FBG}) = \frac{P_n}{P_{n+1}}; \quad (5)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в (5), получим:

$$f(\lambda_{FBG}) = \exp \left(-\frac{1}{\sigma_{ch}^2} [\Delta\lambda(\lambda - \lambda_C)] \right), \quad (6)$$

где $\Delta\lambda = \lambda_{ch\ n+1} - \lambda_{ch\ n}$ – расстояние между каналами ДВР;

$\lambda_C = (\lambda_{ch\ n+1} + \lambda_{ch\ n})$ – длина волны центра между каналами ДВР.

Далее рассчитаем погрешность определения длины волны ВБР (λ_{FBG}):

$$\delta\lambda_{FBG} = \sqrt{\left(\frac{\partial\lambda}{\partial P_n} \right)^2 \cdot \delta P^2 + \left(\frac{\partial\lambda}{\partial P_{n+1}} \right)^2 \cdot \delta P^2}, \quad (7)$$

где $\delta P = \delta P_1 = \delta P_2$ – погрешность измерения мощности в каналах ДВР.

Будем считать, что $\delta P_1 = \delta P_2 = const$. Подставив в (7) значения частных производных, определим погрешность определения длины волны (8):

$$\delta\lambda_{FBG} = \frac{\sigma_{ch}^2}{\Delta\lambda} \exp \left(\frac{\Delta\lambda(\lambda - \lambda_C)}{\sigma_{ch}^2} \right) \frac{\sqrt{T_{ch\ n}(\lambda)^2 + T_{ch\ n+1}(\lambda)^2}}{T_{ch\ n+1}(\lambda)^2} \delta P. \quad (8)$$

Исходя из формулы можно сказать, что точность определения положения пика отражённого спектра ВБР зависит от следующих факторов: ширины полосы пропускания каналов ДВР (σ_{ch}), интервала между каналами ДВР ($\Delta\lambda$) и погрешности измерения мощности в каждом канале (δP). Минимальная ошибка в определении длины волны наблюдается в

точке, расположенной между двумя каналами ДВР (λ_c), и экспоненциально увеличивается по мере удаления от этой точки.

Эксперимент

В рамках исследования был создан экспериментальный стенд, воспроизводящий работу интеррогатора, проведена его калибровка и оценена точность работы устройства. На рис. 4 представлена схема интеррогатора, использованного в эксперименте, которая включает: СЛД, волоконно-оптический усилитель (ВОУ), циркулятор, ВБР, ДВР и измеритель мощности (ИМ). В качестве демультиплексора использовался корпусированный 16-канальный модуль ДВР на основе ФИС с ТЕС-контроллером, разработанный ООО «ФОТИС» и изготовленный в отделе интегральной фотоники АО «ЗНТЦ» [9].

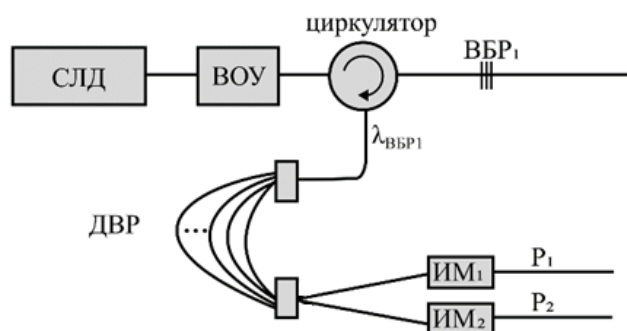


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для апробации алгоритма интеррогации ВБР на основе ДВР на ФИС. СЛД – суперлюминисцентный диод, ВОУ – волоконно-оптический усилитель, ВБР – волоконная брэгговская решетка, ДВР – дифракционная волноводная решетка, ИМ – измеритель мощности

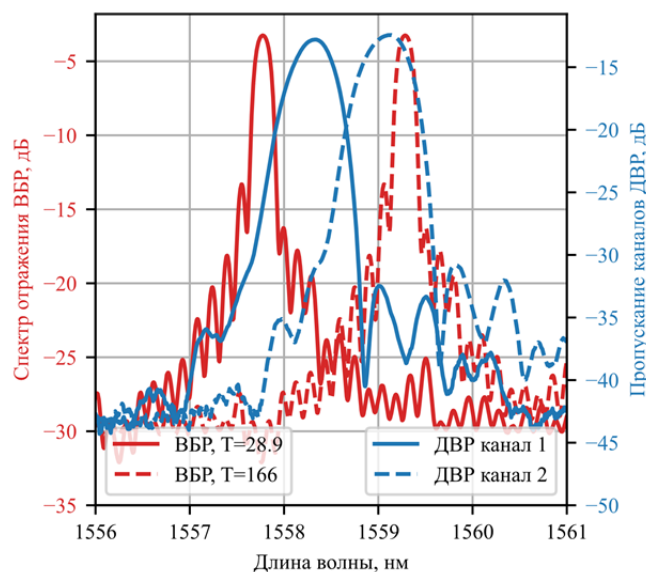


Рис. 5. Спектры пропускания каналов ДВР и отражения ВБР № 2 (спектр отражения ВБР № 2 при температуре 166 °С восстановлен по значению его максимума)

Экспериментально полученные спектры пропускания каналов ДВР на ФИС при комнатной температуре, а также спектры отражения ВБР при комнатной температуре и при 166°C без воздействия механических напряжений представлены на рис. 5.

В результате была построена калибровочная функция. Для её представления использовалось выражение (5), к которому применён десятичный логарифм для улучшения визуализации:

$$f(\lambda_{FBG}) = \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right). \quad (9)$$

Для аппроксимации полученных данных была использована логистическая функция (сигмоида), которая представлена на рис. 7 и описывается выражением (10):

$$f = \frac{-L}{(1 + \exp(-k \cdot (x - x_0)))} + b; \quad (10)$$

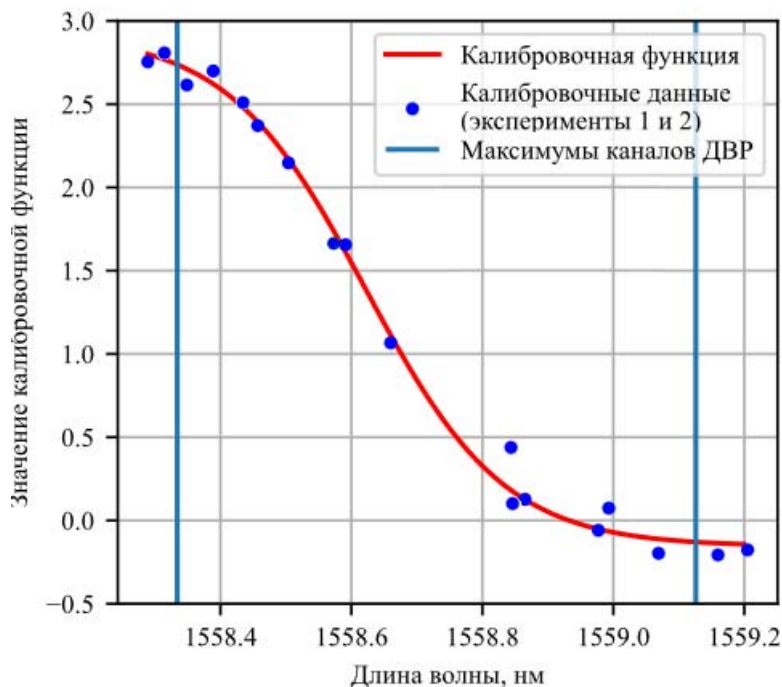


Рис. 7. Аппроксимация экспериментальных значений калибровочной функции. Синими точками отмечены экспериментальные значения калибровочной функции, полученные из калибровочного набора данных; красной линией — функции аппроксимации из выражения (10). Вертикальными линиями обозначены положения максимумов пропускания каналов ДВР

Среднеквадратичное отклонение измеренного значения длины волны от истинного для калибровочных данных составило 61 пм, что сопоставимо с разрешением используемого оптического спектрометра (50 пм). Это позволяет сделать вывод, что точность работы данной схемы может быть не хуже, чем разрешающая способность спектрометра, то есть около 50 пм. Таким образом, точность работы представленной системы оценивается в пределах 61 пм или меньше.

Литература

1. Deng Y., Jiang J. Optical fiber sensors in extreme temperature and radiation environments: A review // *IEEE Sensors Journal*. 2022. Т. 22. №. 14. С. 13811–13834.
2. Ferdinand P. The evolution of optical fiber sensors technologies during the 35 last years and their applications in structure health monitoring // *EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring*. – INRIA, 2014. С. 914–929.
3. Gangwar R. K. et al. Optical fiber based temperature sensors: a review // *Optics*. 2023. Т. 4, N 1. С. 171–197.
4. Sahota J. K., Gupta N., Dhawan D. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: A comprehensive review // *Optical Engineering*. 2020. Т. 59, N 6. С. 060901–060901.
5. Kim H. T., Yu M. High-speed optical sensor interrogator with a silicon-ring-resonator-based thermally tunable filter // *Optics Letters*. 2017. Т. 42, N 7. С. 1305–1308.
6. Pustakhod D. et al. High-resolution AWG-based fiber Bragg grating interrogator // *IEEE photonics technology letters*. 2016. Т. 28. №. 20. С. 2203–2206.
7. Ibrahim S. K., Farnan M., Karabacak D. M. Design of a photonic integrated based optical interrogator // *Photonic Instrumentation Engineering IV*. – SPIE, 2017. Т. 10110. С. 241–249.
8. Kazakov I. A., Malakhov K. M., Kovalev E. E. et al. Study of Operational Algorithm for Interrogator with Arrayed Waveguide Grating on a Photonic Integrated Circuit.
9. Goncharov A. A. et al. Integrated optical demultiplexer based on the SiO₂—SiON waveguide structure // *Quantum Electronics*. 2005. Т. 35, N 12. С. 1163.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ МИКРОФОКУСНОГО
ЛАЗЕРО-ПЛАЗМЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ
ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОЮСТИРОВОЧНЫХ
ПОДВИЖЕК НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ,
А ТАКЖЕ АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ УСТАНОВКИ**

*А. А. Коршунов^{1,2}
artemaskrut@yandex.ru*

¹Институт фотонных технологий ФГБНУ «Кристаллография и фотоника»
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический
институт», Москва

На текущий момент одной из актуальных проблем современной медицины является проблема рентгенографии тканей, имеющих низкий коэффициент поглощения рентгеновского излучения, что приводит к низкому контрасту амплитудных изображений. Соответственно, это вынуждает либо увеличивать используемую дозу рентгеновского излучения, либо использовать специальные контрастирующие жидкости, которые увеличивают поглощения рентгеновского излучения биологическими тканями человека [1]. Альтернативой подобным методам является использование метода фазового контраста, в основе которого лежит явление изменения фазы рентгеновских лучей при прохождении через более или менее плотные слои исследуемого объекта. Это позволяет получать чёткие и контрастные рентгеновские изображения внутренней структуры даже слабопоглощающих объектов. Однако при всех своих преимуществах, недостатками данного метода является высокая требовательность к малому размеру источника, а также выходу рентгеновских фотонов. Одним из наиболее перспективных направлений развития являются волоконные лазеры технологического класса, которые обладают сравнительной коммерческой доступностью, а также широко используются в задачах микрообработки материалов. Целью данной работы являлось микрофокусного рентгеновского источника на базе волоконного лазера, взаимодействующего с мишенью.

Установка представляет собой систему дихроичных зеркал, а также микрообъектива, фокусирующего лазерное излучение на поверхности торца медного диска [2]. При этом в результате взаимодействия лазерного излучения с мишенью происходит генерация рентгеновского излучения [3]. Особенности установки является то, что для её эффективного позиционирования необходимо иметь возможность выставить положение медного диска с микронной точностью, чтобы лазерная перетяжка находилась на поверхности мишени. Для этого в установке используются платы Duet 2 Wifi, которые с помощью моторизированной подвижки позволяют управлять положением микроскопического объектива и медной мишени. Платы поддерживают подключение к ним по локальной сети и могут выполнять заранее запрограммированные алгоритмы, записанные в виде специальных G-кодов. Также плата установлена на бесколлекторный мотор от квадрокоптера, который выполняет вращение мишени с частотой в несколько сот оборотов в минуту.

Также в настоящее время установлено, что размер пучка, спектр и амплитуда второй гармоники имеет корреляцию с амплитудой сигнала рентгеновского излучения. В связи

с этим разработана система, которая позволяет измерять диаметр пучка второй гармоники в автоматическом режиме, что позволяет как проводить юстировку оптической схемы, так и значительно упрощает оценку размера рентгеновского источника.

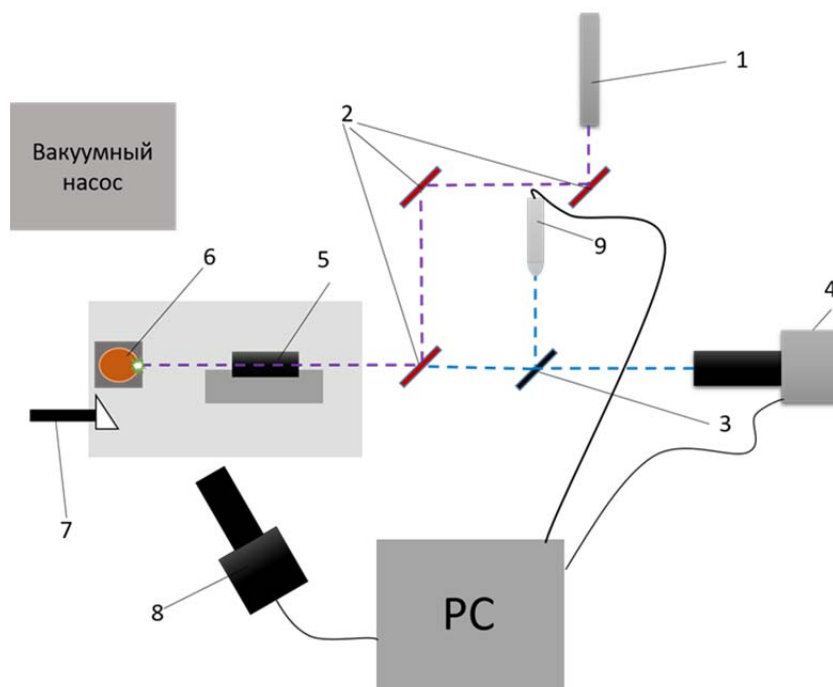


Рис. 1. Схема установки для получения рентгеновского излучения в условиях вакуума: 1 – лазерный источник, 2 – дихроичные зеркала, 3 – дихроичное зеркало второй гармоники, 4 – ПЗС-камера, 5 – микроскопический объектив на моторизированной подвижке, 6 – медная мишень на моторизированной подвижке, 7 – конец шланга вакуумного насоса, 8 – спектрофотометр, 9 – оптоволоконно спектрометра

При долговременной эксплуатации установки, происходит постепенная разъюстировка схемы, связанная с абляцией на поверхности мишени [4]. В связи с этим была разработана специальная система на основе машинного обучения с подкреплением, которая регистрирует сигнал второй гармоники [5] с помощью спектрометра, а далее на основе интенсивности сигнала второй гармоники с помощью специальных моторизированных подвижек, надеваемых на дихроичные зеркала, выполняет автоматическую юстировку системы, что значительно увеличивает долговременность работы установки. Система автоматической юстировки позволила повысить стабильность сигнала рентгеновского излучения.

Работа выполнена при поддержке государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» и Минобрнауки РФ (грант № 075-15-2021-1362) в части проектирования микрофокусного источника рентгеновского излучения.

Литература

1. Прицепова С. А. Ионизирующее излучение как биологическое воздействие // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России. 2020. Р. 53–55.

2. Гарматина А. А. et al. Микроскопия второй гармоники из приповерхностной плазмы, зажигаемой остросфокусированным пучком фемтосекундного волоконного лазера // Оптика и спектроскопия. 2024. Vol. 132, № 1. P. 34–41.

3. Седов М. В. Моделирование характеристического рентгеновского излучения фемтосекундной лазерной плазмы. 2019. P. 304.

4. Garmatina A. A. et al. X-ray generation under interaction of a femtosecond fiber laser with a target and a prospective for laser-plasma x-ray microscopy // J. Phys. Conf. Ser. 2021. Vol. 2036, N 1.

5. Von der Linde D. et al. Second Harmonic Generation in Plasmas Produced by Intense Femtosecond Laser Pulses // IEEE J. Quantum Electron. 1992. Vol. 28, N 10. P. 2388–2397.

**РЕЗОНАНСНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКИХ ГАРМОНИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В РЕЖИМЕ ИОНИЗАЦИИ, ПРОМЕЖУТОЧНОМ МЕЖДУ МНОГОФОТОННЫМ
И ТУННЕЛЬНЫМ**

А. Д. Крупин¹, В. В. Стрелков^{1,2}, М. Ю. Рябикин¹
a.krupin@ipfran.ru

¹ Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
Нижний Новгород

² Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

В рамках одномерного уравнения Шрёдингера с модельными потенциалами мы теоретически исследуем процесс генерации высоких гармоник в водородоподобных атомах в области параметров, соответствующих промежуточному режиму между многофотонным и туннельным. В качестве модельного потенциала мы преимущественно используем 1D потенциал Юкавы, позволяющий, путём варьирования радиуса действия кулоновского центра без изменения величины потенциала ионизации, контролировать степень влияния кулоновских эффектов и отстройки промежуточных дискретных уровней от резонансных положений. Для конкретных форм потенциала мы изучаем эффективность резонансной генерации гармоник под действием разнообразных лазерных импульсов и исследуем условия достижения максимального резонансного выигрыша в рассматриваемом процессе.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПОРОГОВОЙ МОЩНОСТИ ВРМБ ПРИ ПОМОЩИ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ БЕЛЫМ ШУМОМ

*Я. А. Крюков, С. В. Тютин, Н. А. Зарецкий, В. С. Цыкин, С. Н. Бантуров, О. Л. Течко,
С. В. Хохлов, М. И. Коновальцов, Н. М. Ракчеев, К. Г. Аксёнов*

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Проанализирована возможность применения СВЧ генератора белого шума для исследования возможности управления спектром. Описаны устройство и характеристики генератора белого шума, работающего в общей полосе частот 0,13–18,5 ГГц с разбивкой на 4 независимых канала в полосах: 0,13–2,7 ГГц, 0,72–7,8 ГГц, 1,26–8,18 ГГц и 5,6–18,5 ГГц. Определены амплитудно-частотные характеристики и значения выходной мощности сигнала генератора при различных режимах его работы.

Исследована возможность применения генератора в схеме управления шириной спектра излучения одночастотного волоконного лазера путем фазовой модуляции [1]. Проанализировано влияние режима фазовой модуляции широкополосным белым шумом на ширину спектра модулированного излучения. Продемонстрировано, что применение генератора позволяет увеличивать ширину спектра одночастотного лазера до 0,049–0,181 нм. Приведена зависимость пороговой мощности ВРМБ (Вынужденное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна) [2] от режима работы генератора. Показано, что использование широкополосной фазовой модуляции белым шумом позволяет повысить пороговую мощность ВРМБ более чем в 500 раз.

Литература

1. Yanshan Wang, Yujun Feng, Yi Ma, Zhe Chang, Wanjing Peng, Yinhong Sun, Qingsong Gao, Rihong Zhu, Chun Tang. «2.5 kW Narrow Linewidth Linearly Polarized All-Fiber MOPA With Cascaded Phase-Modulation to Suppress SBS Induced Self-Pushing» // IEEE Photonics Journal. 2020. Vol. 12, N 3. P. 1865–1878.
2. Беспрозванных В. Г., Первадчук В. П. Нелинейные эффекты в волоконной оптике»: учебное пособие / Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
ЧИРПИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В $Yb^{3+}:KGW$
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА-БЛОХА**

И. В. Кузьмин
kuzminiv@ipfran.ru

Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
Нижний Новгород

Как правило, для описания работы усилителей лазерных импульсов используется системы балансных уравнений [1]. Однако в условиях неоднородной ширины линии лазерного перехода, эффектов насыщения усиления и зависимости поляризации среды от величины инверсии населенности такого подхода явно недостаточно. В этом случае необходимо использовать модель, основанную на полуклассической системе уравнений Максвелла–Блоха [2, 3]. Активная среда с неоднородным уширением линии лазерного перехода описывается с помощью системы уравнений Блоха, связывающих динамику населенностей на соответствующем энергетическом уровне с динамикой парциальных поляризаций под действием полей сигнала и накачки. В этом случае учитываются особенности формирования спектральной полосы усиления и насыщения усиления лазерного импульса при учете когерентных эффектов. Распространение лазерного излучения в среде можно описать с помощью однонаправленного уравнения распространения (URPE), в котором учитываются дисперсионные, дифракционные и нелинейные эффекты, связанные с распространением лазерных импульсов в нерезонансной среде.

В работе с помощью численного моделирования предложенной системы уравнений для четырехуровневой среды показаны особенности формирования электронной линзы при продольной накачке в условиях насыщения усиления и неоднородной ширины линии лазерного перехода при усилении широкополосных чирпированных лазерных импульсов.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования РФ (проект № FFUF-2023-0001).

Литература

1. Gacheva E. I. et al. Disk $yb:KGW$ amplifier of profiled pulses of laser driver for electron photoinjector // OpticsExpress. 2015. Vol. 23, N 8. P. 9627.
2. Kocharovsky V. V., Zheleznyakov V., Kocharovskaya E. R., and Kocharovsky V. V. Superradiance: The principles of generation and implementation in lasers // Uspekhi Fizicheskikh Nauk. 2017. Vol. 187, N 04. P. 367–410.
3. Chang S.-H., Taflove A. Finite-difference time-domain model of lasing action in a four-level two-electron atomic system // Optics Express. 2004. Vol. 12, N 16. P. 3827.

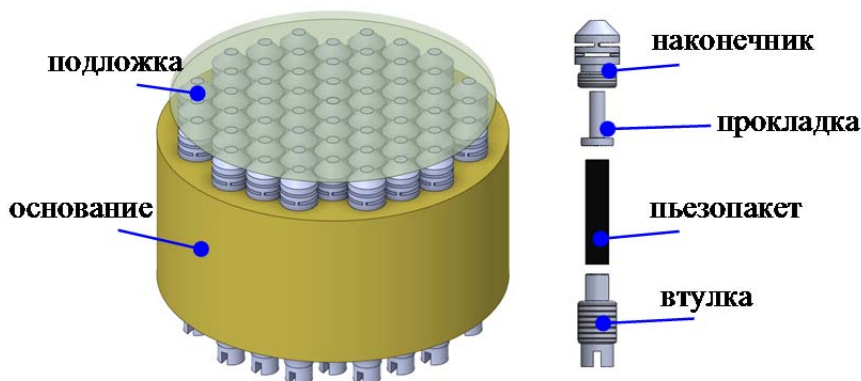
**КОНСТРУКЦИЯ ДЕФОРМИРУЕМОГО ЗЕРКАЛА НА ПЬЕЗОАКТИУАТОРАХ
С ШАГОМ 6 ММ**

П. М. Кузьмицкий, В. В. Топоровский, А. В. Кудряшов
kuzmitsky@activeoptics.ru

Институт динамики геосфер Российской академии наук им. М. А. Садовского, Москва

Деформируемое зеркало является ключевым элементом адаптивной оптической системы, использование которого позволяет компенсировать искажения волнового фронта лазерного излучения, вызванные атмосферной турбулентностью. Увеличение пространственного разрешения деформируемого зеркала позволяет расширить диапазон корректируемых фазовых флуктуаций [1], что особенно важно в задачах, где компенсация aberrаций волнового фронта высших порядков приводит к значительному улучшению качества работы оптической системы (астрономия, передача лазерного излучения на расстояние, микроскопия, офтальмоскопия [2,3]).

Была разработана конструкция пьезоактюаторного деформируемого зеркала с 55 управляющими элементами, расположенными в гексагональном порядке с шагом между актюаторами 6 мм. Для обеспечения механизма предварительной нагрузки были исследованы и промоделированы специальные конфигурации наконечника и втулки (см. рисунок), что обеспечило симметричную амплитуду деформации отражающей поверхности зеркала величиной на $\pm 3,5$ мкм.



Конструкция пьезоактюаторного деформируемого зеркала с шагом между актюаторами 6 мм

Литература

1. Hamelinck R. Adaptive deformable mirror: based on electromagnetic actuators. 2010.
2. Neichel B. Adaptive optics for astronomy // Handbook of Adaptive Optics. – CRC Press. С. 137–160.
3. Holmes R. B. Adaptive optics for directed energy: fundamentals and methodology // AIAA Journal. 2022. Т. 60. №. 10. С. 5633–5644.

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОНСТАНТ СКОРОСТИ
ЭНЕРГООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В АКТИВНОЙ СРЕДЕ
ЛАЗЕРА НА МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМАХ АРГОНА**

Р. А. Курамышин
kuramshinr2001@gmail.com

Самарский филиал Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Самара

В настоящее время проблема создания мощных лазеров остается актуальной задачей, требующей поиска оптимального решения. В связи с бурным развитием диодно-лазерных технологий и создания мощных лазерных линеек на основе полупроводников в последние годы предлагается осуществлять преобразование излучения диодных лазеров посредством различных твердотельных или газовых сред. Современные мощные диодные лазерные линейки и матрицы на их основе отличаются высокой эффективностью и мощностью излучения свыше 10 киловатт, однако качество выходного пучка у таких системы все еще остается ниже дифракционного предела.

На сегодняшний день одной из самых перспективных лазерных систем для суммирования и преобразования излучения лазерных диодов в мощное излучение высокого качества является лазер на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой (ЛОНИГ) [1]. Метастабильные атомы Rg^* образуются в плазме тлеющего разряда, после чего происходит оптическая накачка с нижнего метастабильного состояния $1s_5$ (здесь и далее используются обозначения Пашена) на уровни $2p_9$ или $2p_8$. Далее в результате столкновений с более легкими атомами инертных газов (в общем случае используется He) заселяется верхний излучательный уровень $2p_{10}$, с которого происходит лазерная генерация. На сегодняшний день лазерная генерация получена на Ar, Ne, Kr и Xe в смеси с He. Максимальная достигнутая мощность на начало 2024 года составляет 4.1 Вт в смеси Ar/He в непрерывном режиме при продольной диодной накачке и эффективности преобразования 36 % [2].

Модели, созданные ранее [3], учитывали только уровни $1s_5$, $1s_4$, $2p_8$, $2p_9$, $2p_{10}$. В ходе проведенных нашей научной группой экспериментальных работ было выявлено, что при интенсивной накачке уровня $2p_8$ так же заселяются и уровни $2p_7$ и $2p_6$, поскольку $2p_7$ отстоит от $2p_8$ всего на 470 см^{-1} . Их заметное заселение происходит при давлении более 100 Торр, и оказывает влияние на измеряемые значения констант столкновительного энергообмена между уровнями $2p_8$, $2p_9$ и $2p_{10}$, что не учитывалось ранее. При этом уровень $2p_5$, отстоящий от $2p_6$ на 817 см^{-1} заселяется пренебрежимо мало.

В настоящее время развитие систем ЛОНИГ ограничено нехваткой верифицированных данных о температурных зависимостях констант скорости столкновительных энергообменных процессов, происходящих в плазме активной среды лазера. Температурные зависимости критически важны для данной системы ввиду повышенных температур газа в плазме разряда активной среды. В данной работе экспериментально получены температурные зависимости констант скорости тушения p -состояний метастабильного аргона Ar^* в столкновениях с He с прямым измерением температуры газа в плазме импульсно-периодического разряда методом перестраиваемой диодно-лазерной спектроскопии поглощения.

Литература

1. Han J., Heaven M.C. Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms // Opt. Lett. 2012. Vol. 37, N 11. P. 2157–2159.
2. Han J., Sanderson C. R., Нокр В. et al. Optically pumped rare gas lasers // In XXII International Symposium on High Power Laser Systems and Applications. 2019. Vol. 11042. P. 1104202.
3. Eshel B., Perram G. P. Five-level argon–helium discharge model for characterization of a diode-pumped rare-gas laser // JOSA B. 2018. Vol. 35, N 1. P. 164–173.

МНОГОЧАСТОТНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СУБДОПЛЕРОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ В МИНИАТЮРНЫХ ЯЧЕЙКАХ С ПАРАМИ ЦЕЗИЯ

И. С. Месензова
mesenzova.i@yandex.ru

Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

В настоящее время методы прецизионной лазерной спектроскопии атомов и молекул составляют основу многих лазерных технологий для решения как прикладных задач, так и задач из области фундаментальной физики, например, проверка постоянства мировых констант, поиск тёмной материи, поиск постоянных дипольных моментов у электрона и нейтрона, наблюдение и измерение лэмбовского сдвига, а также наблюдение многих других эффектов, предсказываемых общей теорией относительности и квантовой электродинамикой.

Единственным серьезным препятствием на пути создания миниатюрного КСЧ на основе предложенной двухчастотной техники была необходимость в использовании ЭОМ. Это устройство использовалось во всех работах, посвященных этому методу спектроскопии как с атомами цезия [1–4], так и с атомами рубидия. В настоящей главе предложен и исследован способ преодоления этой трудности с помощью прямой СВЧ модуляции тока диодного лазера и применения поляриметрической техники регистрации субдоплеровских резонансов.

Экспериментальные зависимости параметров качества нелинейных оптических субдоплеровских резонансов в схеме с ЭОМ и с прямой модуляцией (рис. 1, 2) DBR лазера. На рисунках представлены зависимости параметра качества от оптической мощности для трёх разных температур ячейки, сигнал получен в схеме с дифференциальной регистрацией резонансов. Параметр качества Q рассчитывался как отношение амплитуда/ширина резонанса к шуму. Шумы лазера снимались на Stanford research systems SR1 Audio Analyzer для каждого из значений оптической мощности, падающей в ячейку.

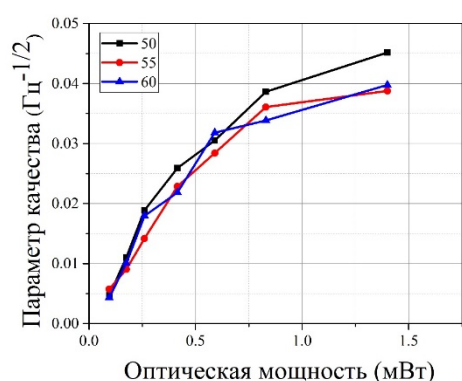


Рис. 1. Зависимость параметра качества для трёх температур ячейки для схемы с ЭОМ при дифференциальной регистрации сигналов

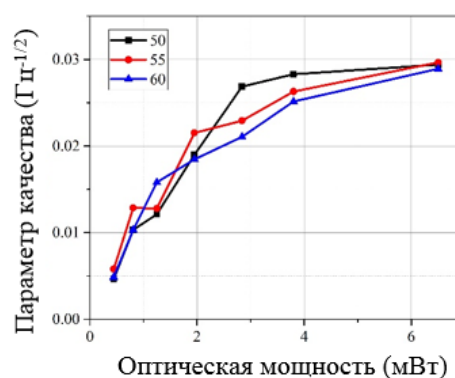


Рис. 2. Зависимость параметра качества для трёх температур ячейки для схемы с прямой модуляцией при дифференциальной регистрации сигналов

Характеристики получились сравнимые по параметрам, что является перспективным в дальнейших исследованиях и создании миниатюрного оптического стандарта частоты.

Литература

1. Newman Z. L. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock / Z. L. Newman, V. Maurice, T. Drake /// *Optica*. – 2019. V. 6, N 5. P. 680–685.
2. Brazhnikov D. Dual-frequency sub-Doppler spectroscopy: Extended theoretical model and microcell-based experiments // D. Brazhnikov, M. Petersen, G. Coget [et al.] // *Physical Review A*. 2019. V. 99. P. 062508.
3. Gusching A. Short-term stability of Cs microcell-stabilized lasers using dual-frequency sub-Doppler spectroscopy // Gusching A., M. Petersen, N. Passilly., Brazhnikov D., Hafiz M. A., Boudot R. // *Journal of the Optical Society of America B*. 2021. V. 38. P. 3254.
4. Abdel Hafiz M. Doppler-free spectroscopy on the Cs D1 line with a dual-frequency laser // M. Abdel Hafiz, G. Coget, E. De Clercq, R. Boudot // *Optics Letters*. 2016. V. 41. P. 2982–2985.

МАСШТАБИРОВАНИЕ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ В ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННОМ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРЕ НА ОСНОВЕ КОНУСНОГО СВЕТОВОДА, ЛЕГИРОВАННОГО ИТТЕРБИЕМ

Е. К. Михайлов
egor.mikhailov@fo.gpi.ru

Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук,
Научный центр волоконной оптики им. Е. М. Дианова, Москва

Лазеры и усилители ультракоротких импульсов на основе световодов, легированных иттербием имеют множество применений как в промышленности, так и в фундаментальных исследованиях. Наиболее востребованными из них являются обработка материалов, нелинейное преобразование частоты и накачка параметрических генераторов. Полностью волоконная реализация лазера обладает рядом преимуществ, таких как компактность, надежность и высокое качество пучка выходного излучения. Дополнительно, в большинстве приложений необходимо одновременно обеспечить высокую пиковую и высокую среднюю мощность на выходе из световода, что требует использования световодов с большой площадью моды. Одним из наиболее перспективных дизайнов таких световодов является конусный световод (КС) [1]. Наиболее эффективное подавление нелинейных эффектов в КС осуществляется при встречном вводе накачки. Большинство схем вынуждено использовать объемный ввод накачки в выходной торец КС с применением дихроичного зеркала, что делает систему не полностью волоконной. Для решения этой проблемы в работе [2] была предложена конфигурация несплавного объединителя накачки с вводом накачки через боковую поверхность и реализацией непосредственно на КС. При усилении пикосекундных импульсов на длине волны 1064 нм была получена средняя мощность 9,3 Вт и пиковая мощность 0,53 МВт.

Настоящая работа демонстрирует результаты оптимизации вышеупомянутой конфигурации в целях масштабирования средней мощности, ранее затрудненное сгоранием объединителя накачки. На рис. 1, *а* представлена схема реализованного объединителя накачки. Ввод накачки осуществлялся путем физического контакта боковых поверхностей жил ввода накачки и активного световода. В качестве принимающего световода использовался КС с двойной оболочкой. Так как это конусный световод, то его внешний диаметр менялся вдоль длины световода и его максимальное значение могло достигать до 400 мкм (рис. 1, *б*). Для ввода накачки в КС в зоне контакта был защищен слой защитного полимера, а вторая отражающая оболочка из фторированного стекла была удалена путем травления в плавиковой кислоте. Жилы ввода накачки имели локальную биконическую структуру для увеличения эффективности сообщения накачки. Они изготавливались из кварц-полимерного световода диаметром 125 мкм, а требуемый профиль диаметра достигался при растягивании жилы в процессе нагрева с помощью установки Vytran GPX 3400. Оптимальный профиль был установлен в ходе экспериментов с двумя пассивными сигнальными световодами – с полимерным покрытием, обеспечивающим апертуру более 0,45 и с отражающим слоем из фторированного кварцевого стекла, обеспечивающим апертуру 0,26. Диаметр ведущей части пассивных световодов был равен 400 мкм и не изменялся вдоль их длины. Максимальная эффективность ввода излучения накачки на длине волны 976 нм и мощностью до 100 Вт в световод с полимерным покрытием составила 91 %, в световод с покрытием из фторированного стекла – 76 %.

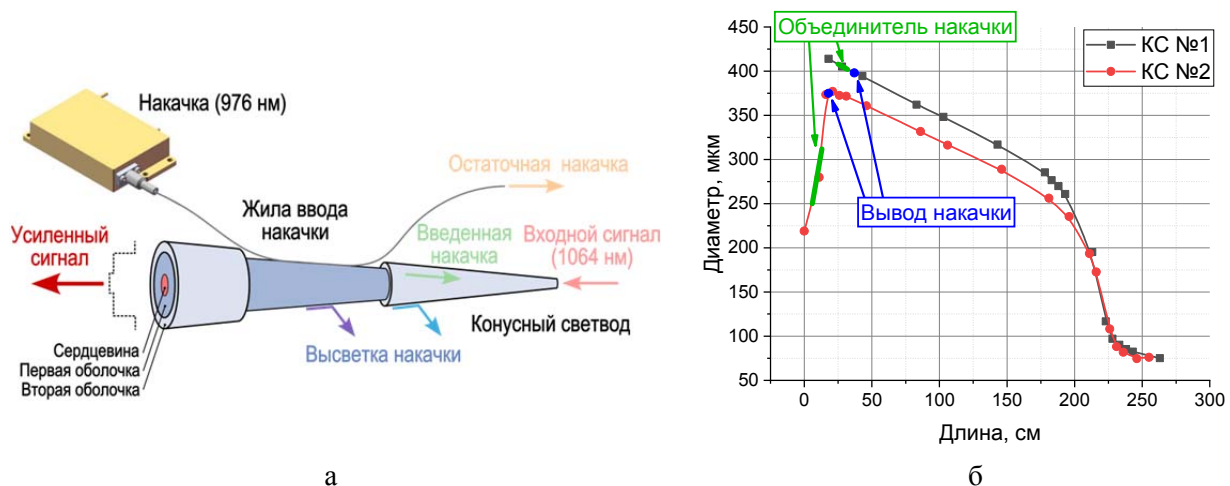


Рис. 1. (а) Принципиальная схема объединителя накачки; (б) Зависимость внешнего диаметра исследованных КС от их длины

Мы использовали стандартный произведенный нами КС № 1, аналогичный представленному в [3]. Значения диаметров сердцевины/первой оболочки/второй оболочки на выходном торце составляли 43/336/414 мкм, соответственно. Числовая апертура в сердцевине составляла $\sim 0,1$, а в первой оболочке $\sim 0,28$. Длина КС № 1 была равна $\sim 2,5$ м (рис. 1, б). Вторая оболочка, легированная фтором была стравлена плавиковой кислотой на участке длиной ~ 70 мм примерно в 60 мм от толстого конца. На расстоянии ~ 40 мм после области контакта мы сделали вывод накачки, чтобы устранить перед защитным полимером долю накачки, высвечивающуюся из второй оболочки из-за превышения числовой апертуры. Конструкция вывода накачки была аналогична представленной в работе [4]. На вход КС подавались импульсы длительностью 9,3 пс, средней мощностью до 50 мВт и с частотой следования 18,4 МГц. При 100 Вт накачки была получена средняя мощность 25 Вт. Это примерно в 2,5 раз больше, чем в нашей прошлой работе [2], однако эффективность ввода накачки составила лишь порядка 45 %, что существенно меньше полученной в пассивном сигнальном световоде с внешней оболочкой из фторированного стекла. Причиной такого поведения может быть рост числовой апертуры накачки при распространении вдоль сужающегося КС. Чтобы это предотвратить мы сделали КС № 2 у которого на конце толстой части вновь происходит резкое сужение диаметра до ~ 230 мкм (рис. 1, б). В итоге, в ходе реализации комбайнера на основе жилы ввода накачки с диаметром талии 30 мкм и КС № 2 было получено 42 Вт выходного сигнала с общей эффективностью 45,9 % и эффективностью ввода 77,7 %. Параметр M^2 на максимальной мощности составил 1,21/1,28. Также на частоте 1,84 МГц (аналогичной использованной в работе [2]) мы усилили сигнал до 10,6 Вт, получив 0,62 МВт пиковой мощности и продемонстрировав сохранение устойчивости конструкции к высоким пиковым мощностям. На конференции планируется представить более детальное рассмотрение проведенного исследования и основных принципов, лежащих в его основе.

Литература

1. Filippov V., Chamorovskii Y., Kerttula J. et al. // Opt. Express. 2008. 16(3), 1929–1944.
2. Bobkov K., Levchenko A., Lipatov D. et al. // Photonics. 2022. 9(10), 771.
3. Bobkov K., A. Andrianov, Koptev M. et al. // Opt. Express. 2017. 25, 26958-26972.
4. Aleshkina S., Kochergina T., Bobkov K. et al. / In Proceedings of the OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2016) // Conference on Lasers and Electro-Optics : – San Jose, USA, 5–10 June 2016.

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА МОБИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ЛИМС ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ БИОПЕЧАТИ

М. Д. Можяева
mmozhayeva1@gmail.com

Институт фотонных технологий ФГБНУ «Кристаллография и фотоника»
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Метод прямого лазероиндуцированного переноса LIFT – Laser induced forward transfer) является основой для современных подходов биопечати живыми клеточными культурами, единичными клетками и их агрегатами, а также микроорганизмами. Это перспективный метод для решения актуальных задач микробиологии и биомедицины [1][2]. В настоящее время активно развивается подход ЛИМС (Лазерная инженерия микробных систем)[3–5], который позволяет выделять отдельные микроорганизмы, например, штаммы бактерий. Для реализации этого метода непосредственно в биолабораториях разрабатывается мобильная версия установки ЛИМС[5] [6].

На экспериментальных стендах собрана оптическая схема с микроскопом и фокусировкой лазерного излучения вблизи поверхности мишени (рис. 1). В качестве источника лазерного излучения используется наносекундный лазерный модуль YLPM-1- 4x200-20-20 с длиной волны 1064 нм. Реализовано перемещение донорной подложки (предметного стекла с металлическим напылением) и акцепторной девяностошестиугольной пластины по двум осям с дистанционным управлением и написаны алгоритмы перемещений. Схема была успешно протестирована: произведен перенос капель гиалуроновой кислоты.

Было спроектировано компактное мобильное устройство для реализации лазерного переноса бактерий, которое на данный момент находится на стадии доработки и подготовки к тестированию (рис. 2).

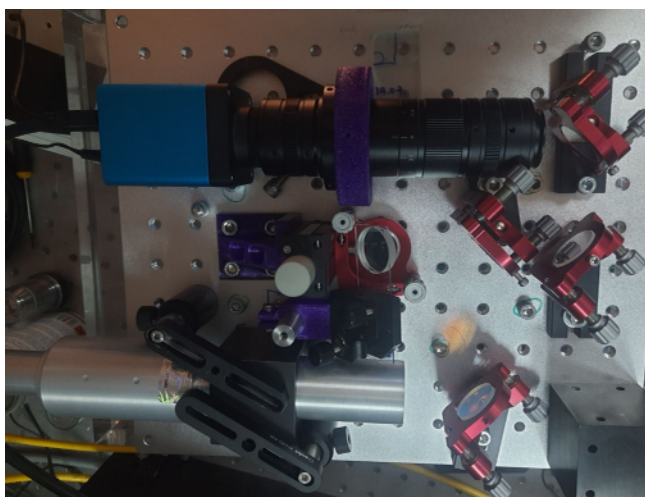


Рис. 1. Оптическая схема

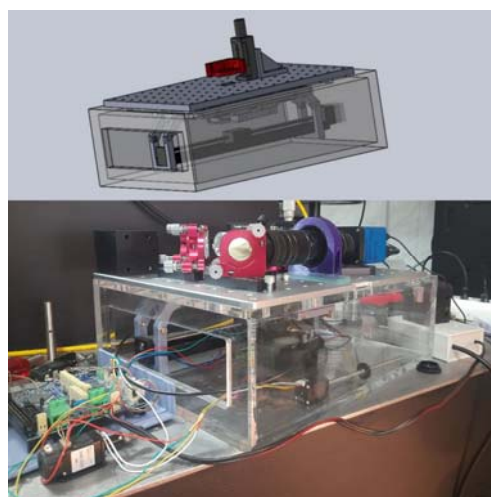


Рис. 2. Прототип мобильной ЛИМС

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 20-14-00286

Литература

1. Lewis W. H. et al. Innovations to culturing the uncultured microbial majority // *Nat. Rev. Microbiol.* 2021. Vol. 19, N 4. P. 225–240.
2. MacGowan A., Macnaughton E. Antibiotic resistance // *Med. (United Kingdom)*. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 45, N 10. P. 622–628.
3. Cheptsov V. S. et al. New Microorganism Isolation Techniques With Emphasis on Laser Printing // *Int. J. Bioprinting.* 2018. Vol. 5, N 1. P. 1–12.
4. Gorlenko M. V. et al. Laser microsampling of soil microbial community // *J. Biol. Eng. Journal of Biological Engineering*, 2018. Vol. 12, N 1. P. 27.
5. Yusupov V. I. et al. Laser engineering of microbial systems // *Laser Phys. Lett.* 2018. Vol. 15, N 6. P. 065604.
6. Минаев Н. В. et al. Установка для исследования лазерно-индуцированного переноса гелевых микрокапель с живыми клеточными и микробными объектами // *Приборы и техника эксперимента.* 2019. № 1. P. 153–155.

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА

*А. В. Митрофанов^{1,2,3}, М. В. Рожко^{1,3}, Д. С. Моисеев^{1,3}, Я. О. Романовский^{1,3},
Д. А. Сидоров-Бирюков^{1,2,3}*
moiseev.ds20@physics.msu.ru

¹Российский квантовый центр, Территория инновационного центра «Сколково», Москва

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

³Физический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

В режиме ионизации газа двухчастотным полем среднего ИК диапазона наблюдается эффективная генерация терагерцовых (ТГц) импульсов длительностью в один период колебания поля [1]. Целью работы являлась разработка метода контроля направления вектора электрического поля, генерируемого ТГц импульса. В работе [2] в результате численных расчетов было показано, что направление поля ТГц импульса зависит от относительной фазы основного излучения и его второй гармоники.

В данной работе для генерации ТГц импульсов использовались мощные импульсы среднего ИК диапазона на длине волны 3900 нм с энергией около 12 мДж и длительностью 100 фс. Была собрана схема генерации ТГц импульсов и схема электрооптического сэмплирования (ЭОС) для характеристики и контроля генерируемых ТГц импульсов. Излучения фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 500 мм. Вторая гармоника основного излучения генерировалась в кристалле GaSe толщиной 300 мкм. Отделение ТГц поля от основного излучения и второй гармоники производилось при помощи пластинки полипропилена. ЭОС осуществлялось в кристалле GaP толщиной 1 мм в котором собирались ТГц импульс и опорный импульс на длине волны 1,03 мкм. Для изменения относительной фазы между основным излучением и его второй гармоникой использовалась пластинка ВаF₂ толщиной 1,5 мм. Эксперименты показали, что изменение угла поворота пластинки ВаF₂ на 15° приводит к переключению направления поля ТГц импульсов на противоположное без потери их энергии (рис. 1).

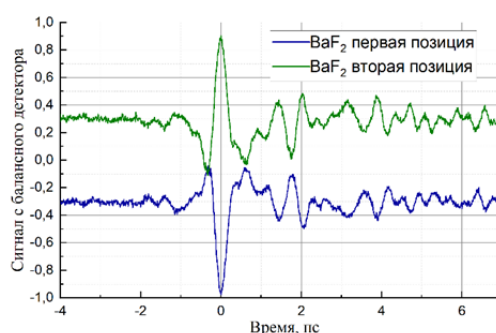


Рис. 1 Сигнал электрооптического сэмплирования ТГц для двух положений пластинки ВаF₂

Литература

1. Mitrofanov A. V. et al. Ultraviolet-to-millimeter-band supercontinua driven by ultrashort mid-infrared laser pulses //Optica. 2020. Т. 7. №. 1. С. 15–19.
2. Flender R., Borzsonyi A., Chikan V. The role of asymmetry in few-cycle, mid-IR pulses during THz pulse generation //Journal of Optics. 2022. Т. 24. №. 4. С. 045502.

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

*Р. Ю. Костюнин, С. А. Макаров, Р. В. Мокрецов, С. В. Мочкаев, В. В. Мурылев,
В. Ю. Романова, А. В. Савкин, И. М. Устинов*

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Мощные лазерные установки на неодимовом стекле с наносекундной длительностью импульса излучения являются в настоящее время основным инструментом в работах по взаимодействию мощного лазерного излучения с веществом. Такие установки строятся, как правило, по многоканальной схеме. Излучение с заданными пространственными, временными и спектральными характеристиками задается в системе формирования опорного излучения (СФОИ) и инжектируется на вход главных усилителей [1, 2]. В свою очередь, в состав СФОИ входят собственно задающий генератор и тракт предусиления.

В тракте предусиления излучения задающего генератора СФОИ целесообразно использование параметрического усиления (ПАУ), так как оно обладает по сравнению с прямым усилением рядом преимуществ: очень малый уровень собственного шума; большой коэффициент усиления; высокий энергетический и мощностной контраст излучения; широкий спектр усиления; возможность профилирования временной формы импульса [3].

В работе представлены результаты отработки ПАУ СФОИ лазерной установки нового поколения. Параметрический усилитель предназначен для усиления профилированного лазерного импульса с энергии 1 мкДж до энергии 50 мДж. Параметрический усилитель включает в себя два каскада усиления ПАУ1 и ПАУ2. В качестве нелинейных кристаллов используются кристаллы LBO размером 8×8×30 мм. Накачка параметрического усилителя осуществляется 2-й гармоникой излучения Nd:YAG лазера. В работе описаны оптическая схема ПАУ, основные параметры лазерного излучения и принцип настройки.

Литература

1. B. M. Van Wonterghem, D. R. Speck, M. J. Norman etc. The Beamlet Front End: Prototype of a New Pulse Generation System, ICF Quarterly Report, v. 3, 1992 г.
2. The Laser Mega-Joule: LMJ & PETAL status and Program Overview, Journal of Physics: Conference Series 688, 2016 г.
3. Yasukazu Izawa, Laser Fusion Research with GEKKO XII and PW Laser System at Osaka, 20th IAEA Fusion Energy Conference, 2004.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВОГО ПОТОКА ЛАЗЕРНОЙ КАМЕРЫ***М. Д. Наумов^{1,2}, Н. А. Кирдяев^{1,2}, А. В. Самсонов^{1,2}, Г. Н. Качалин^{1,2}, И. В. Минеев¹*¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров²Филиал Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Саров

Проведено экспериментальное исследование зависимости расходимости ЛИ от газодинамических параметров лазерной камеры (ЛК) газового лазера с диодной накачкой (ГЛДН). Получена зависимость расходимости от параметра Фрида при различных газодинамических параметрах ЛК и количества проходов ЛИ через рабочую среду ЛК.

Ключевые слова – ГЛДН, лазерная камера, параметр Фрида.

Движение газовой среды внутри ЛК приводит к возникновению оптических неоднородностей в области генерации, что сказывается на расходимости итогового лазерного излучения. Поэтому, исследование зависимости расходимости лазерного излучения от параметров газовых потоков, протекающих внутри лазерной камеры ГЛДН, является актуальной и практически значимой задачей.

Исследования зависимости параметра Фрида от температуры, скорости и числа проходов ЛИ газовых потоков внутри ЛК проводились на стенде, представленном на рис. 1.



Рис. 1. Стенд для исследования влияния параметров газового потока на расходимость проходящего ЛИ

По полученным экспериментальным данным построены зависимости, представленные на рисунке 2.

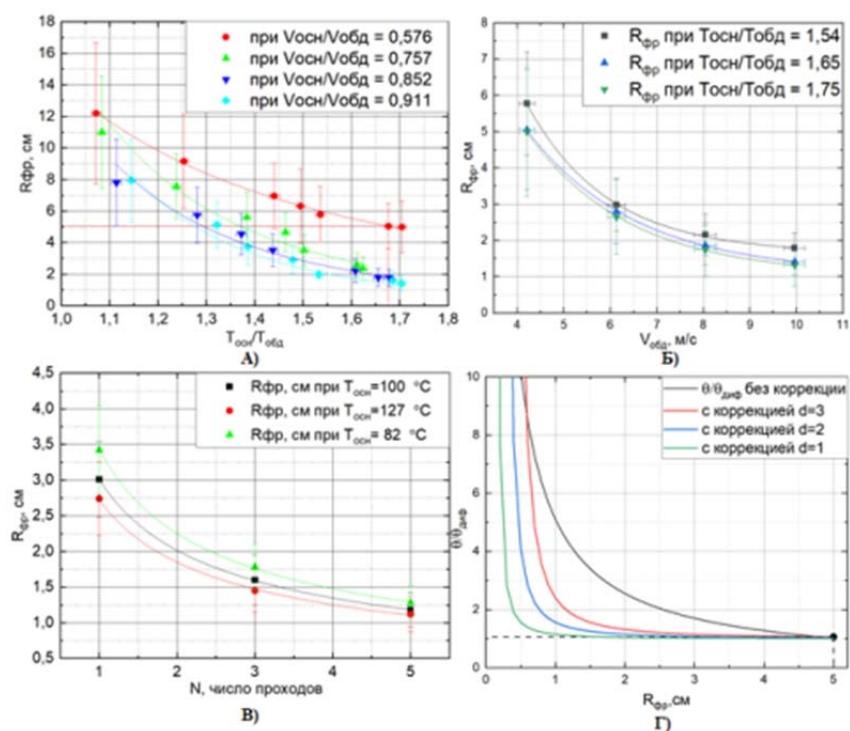


Рис. 2. Зависимость параметра Фрида от: А) отношения температур контуров; Б) скорости потока обдува; В) количества проходов ЛИ через ЛК; Г) Зависимость отношения $\theta/\theta_{диф}$ от параметра Фрида для апертуры излучения 5 см

Зависимость параметра Фрида от отношения температур (рис. 2А.) основного контура и обдувного указывает на необходимость их выравнивания.

Изменение скорости основного контура не влияет на параметр Фрида, а на основе зависимости рис. 2.Б, был подобран скоростной режим работы ЛК.

Получена зависимость параметра Фрида от числа проходов ЛИ через ЛК (рис. 2.В). Исходя из анализа изменения полиномов Цернике установлено, что с ростом числа проходов наблюдается рост aberrаций типа «дефокусировка», «сферическая» и «трэфойл».

Рисунок 2.Г иллюстрирует связь параметра Фрида и расходимости ЛИ без и при корректровке ВФ адаптивным зеркалом.

Полученные данные позволили подобрать оптимальный режим работы ЛК для наилучшей коррекции ВФ ЛИ, которому соответствует $\theta/\theta_{диф} = 1,02$ ($R_{Фр} = 5,04$ см).

Литература

1. Качалин Г. Н. Высокоэффективные газовые лазеры с диодной накачкой / <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/429518817//>.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН СО СТРУКТУРИРОВАННЫМИ
ПОВЕРХНОСТЯМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

И. Н. Николаева, В. В. Костромькина, Г. С. Рогожников

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Исследовано взаимодействие непрерывного терагерцового (ТГц) излучения миллиметрового диапазона длин волн ($\lambda = 2,13\text{--}2,16$ мм) со структурированными поверхностями диэлектриков с целью выявления зависимостей влияния формы поверхности на качество изображения, регистрируемого матричным приемным устройством при прохождении излучения сквозь изучаемый объект и при отражении от него [1]. Работа проведена в интересах отработки методик неразрушающего контроля и машинного зрения при работе с полимерными и металл-полимерными структурами сложной формы [2]. Были исследованы гладкие, упорядоченные и разупорядоченные поверхности объектов, созданных методом FDM печати, проведена расчетная верификация полученных результатов. Выявлены закономерности, связывающие информативность получаемых изображений с типом поверхности и геометрическими параметрами, и расположением неоднородностей.

Литература

1. Mishina I. V. et al. Imaging of hidden objects in millimeter wavelength range // 2016 International Conference Laser Optics (LO) (2016): R7-18.
2. Rogozhnikov G. S. Nondestructive examination of composite solids in millimeter wave range // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO) (2018): 225–225.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ФОТОННЫХ УСТРОЙСТВ
НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНЫХ КРИСТАЛЛОВ LiNbO_3 И ЕГО КЕРАМИЧЕСКИХ
СОЕДИНЕНИЙ**

К. В. Пузановский
puzanovsky.kv@yandex.ru

Кубанский государственный университет, Краснодар

Известно, что генерационные характеристики оптической керамики схожи с генерационными характеристиками кристаллов [1, 2]. Одно из направлений развития лазерной керамики – это расширение спектрального диапазона генерации, использование керамики из перспективных соединений ИК диапазона. Также перспективным направлением развития керамики является формирование функциональных элементов на основе структур с неоднородными параметрами. Градиентное легирование лазерной примесью керамики можно расширить функционал оптических элементов [3].

В настоящей работе представлены и исследованы градиентно легированные образцы лазерной керамики из ниобата лития, активированные ионами Er^{3+} . Нанесение градиентно легированного слоя производилось методом лазерной абляции после излучения YAG:Nd лазера в установке ВУП5. Проведенные спектрально-кинетические исследования нанесенных градиентных пленок $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ толщиной до 65 мкм показали координатную зависимость излучательных характеристик. При введении излучения в волноводный канал, сформированный на поверхности пленки $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$, нанесенной на подложку LiNbO_3 появляется возможность управлять в пассивном режиме однородным распределением температуры по поверхности пленки за счет компенсации температурных искажений и компенсации температурного тушения люминесценции Er.

Полученные результаты могут быть полезны при построении интегральных оптических схем, излучающих в среднем ИК диапазоне. Работа выполнена при поддержке проекта FZEN-2023-0006.

Литература

1. Thomas J. Rudzik, Zachary M. Seeley, Alexander D. Drobshoff, Nerine J. Cherepy, Yimin Wang, Steven P. Onorato, Michael R. Squillante, and Stephen A. Payne, Additively manufactured transparent ceramic thin disk gain medium // Opt. Mater. Express. 2022. 12. 3648–3657.
2. L. Esposito, J. Hostaša, A. Piancastelli, G. Toci, D. Alderighi, M. Vannini, T. Epicier, A. Malchère, G. Alombert-Goget and G. Boulon, Multilayered YAG-Yb:YAG ceramics: manufacture and laser performance // J. Materials Chemistry. 2014. С 2. 10138–10148.
3. Galutskiy, S.S. Ivashko, E.V. Stroganova, Growth of lithium niobate and potassium niobate single crystals using the Czochralski method with liquid and ceramic charging // Solid State Sciences. 2020. 108. 106355.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДВУХФОТОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ
ДЛЯ ПЕЧАТИ СТРУКТУР С СУБМИКРОНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ВНУТРИ
МИКРОФЛЮИДНОГО КАНАЛА**

М. В. Решетова^{1,2}, Н. В. Минаев², Д. В. Басманов³
maruav@yandex.ru

¹Сколковский институт науки и технологий, Москва

²Институт фотонных технологий ФГБНУ «Кристаллография и фотоника»
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

³Центр технологий и микрофабрикации Федерального научно-клинического центра
физико-химической медицины им. академика Ю. М. Лопухина Федерального
медико-биологического агентства России, Москва

Технология двухфотонной фемтосекундной полимеризации является одним из видов аддитивных технологий и позволяет создавать трехмерные структуры субмикронного разрешения [1]. Благодаря нелинейности процесса поглощения область полимеризации – воксель – оказывается в области внутри перетяжки лазерного луча, что обеспечивает печать в объеме, а не в приповерхностном слое. Это отличает данную технологию от технологий, основанных на однофотонном поглощении, и позволяет печатать структуру уже внутри готового устройства, например, микрофлюидного канала. Таким образом возможна доработка и модификация готовых микрофлюидных чипов структурами, обладающими более высоким разрешением, такими как микроклапаны, микронасосы, ловушки для удержания микрочастиц, мембраны.

В данной работе изучались технические возможности описанного метода на примере печати структуры ловушки для удержания микросфер во время иммунофлуоресцентного анализа [2]. Подбор параметров печати структуры ловушки проводился на установке с использованием излучения второй гармоники фемтосекундного лазера ТЕМА-100 (Авеста, Россия): $\lambda = 525$ нм, длительность импульса $t \sim 200$ фс, частота повторения $f = 70$ МГц. Масштабы структуры составили порядка 5 мкм по горизонтали и 10 мкм по вертикали, поэтому для печати использовался иммерсионный объектив (100x/ 1,4 Oil). Подобранный режим печати: скорость перемещения луча гальвано сканером 2–5 мм/с, средняя мощность излучения 2–4 мВт, шаг по оси z 0,5 мкм, шаг по осям x - y 0.1 мкм.

Технология двухфотонной фемтосекундной полимеризации является перспективной для решения задач по созданию структур с субмикронным разрешением и быстрого прототипирования таких структур. В работе продемонстрировано, что структура для удержания микросфер может быть напечатана на установке внутри микрофлюидного канала. Показано, что спектр люминесценции полимера не будет мешать получению флуоресцентного сигнала от микросфер. В дальнейшем планируется продолжение экспериментов в данном направлении и создание микрофлюидного чипа с различными структурами субмикронного разрешения.

Литература

1. Maruo S., Nakamura O., Kawata S. Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization. 1997. Vol. 22, N 2. P. 132–134.
2. Joshi S., Yu D. Immunofluorescence / Basic Science Methods for Clinical Researchers // Elsevier Inc., 2017. P. 135–150.

АЛГОРИТМ НАЧАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СЕГМЕНТИРОВАННОГО ЗЕРКАЛА НА ОСНОВЕ Z-СКАНИРОВАНИЯ

Ю. Д. Росчихмарова, С. А. Анциферов, С. А. Буйко, В. Ю. Гладкий, С. В. Маркин

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

В работе исследуется новый алгоритм позиционирования сегментов составных телескопов с произвольной формой поверхности зеркал на примере плоского составного зеркала из 4 сегментов. Главной особенностью алгоритма является анализ изображений, получаемых при установке камеры в нескольких точках на оси распространения излучения (ось Z) в прифокальной области (Z -сканирование). На 1-ом этапе реализации алгоритма идентифицируются изображения, создаваемые каждым сегментом в плоскости камеры. Определяются координаты центроидов изображений. На 2-ом этапе с помощью метода наименьших квадратов аппроксимируются траектории центроидов при смещении камеры вдоль оси Z . На 3-ем этапе осуществляется совмещение центроидов изображений отдельных сегментов друг с другом в выбранной плоскости на оси Z за счет введения наклонов в сегменты составного зеркала. Экспериментальные исследования показывают, что в результате произведенных действий сегменты могут быть выставлены с точностью $\sim 2''$. Данный алгоритм может быть использован как в качестве окончательного этапа позиционирования сегментов, так и в качестве подготовительного этапа к более точному позиционированию сегментов.

Литература

1. Сычев В. В. Теория и практика адаптивных оптических систем (прикладная адаптивная оптика). – М.: Горячая линия – Телеком, 2023. С. 416.
2. Sechak, E., Romyancev, A., Schesnyak, S.S., & Dubrovich, V.K. (2020). Adaptation algorithm for composite mirrors by the method of moments. 2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), 1–3.
3. Wavefront Sensing and Controls for the James Webb Space Telescope D. Scott Acton, J. Scott Knight, A Contos, S. Grimaldi, J. Terry, P. Lightsey, A Barto, B. League, Bruce Dean, J. Scott Smith, Charles Bowers, D. Aronstein, L. Feinberg, W. Hayden, T. Comeau, R. Soummer, E. Elliott, M. Perrin, Carl W. Starr Jr. 4 Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, edited by Mark C.

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ
МАРКЕРЫ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ**

П. А. Руди^{1,2}, Г. С. Рогожников²
oefimova@otd13.vniief.ru

¹Филиал Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Саров

²Институт лазерно-физических исследований Российского федерального ядерного центра –
Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики
(ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования по взаимодействию непрерывного электромагнитного излучения от источника на основе лавинно-пролетного диода и умножителей частоты [1], позволяющего варьировать центральную длину волны в пределах 2,13–2,16 мм с образцами биологических тканей *in vitro* с целью выявления спектральных особенностей (паттернов) для последующей дистинкции как различных видов тканей, так и тканей одного вида, но находящихся в различном состоянии [2–4]. Получены и обработаны спектры поглощения мышечно-жировой, жировой и соединительной ткани животных, – здоровых, и содержащих гистологически выявленные признаки перерождения и сформировавшихся новообразований [5–8]. Показано, что в исследованном диапазоне длин волн содержатся маркеры, характеризующие как схожесть образцов тканей, так и отличия, в том числе связанные с наличием онкологических заболеваний.

Литература

1. Казаринов К. Д. // Электронная техника. 2009. С. 48–58.
2. Рогожников Г. С., Любынская Т. Е. // X международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2021. С. 321–322.
3. Kucheryavenko A. S., Dolganova I. N., Zhokhov A. A. et al. // Physical Review Applied. 2023.
4. Пономарев Д. С., Ячменев А. Э., Лаврухин Д. В. и др. // УФН. 2024. С. 2–22.
5. Руди П. А., Ефремов А. Г., Рогожников Г. С. // XIII международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2024. С. 201–206.
6. Руди П. А., Ефремов А. Г. // XXXI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов–2024». 2024. С. 344.
7. Зайцев К. И., Долганова И. Н., Черномырдин Н. В. и др. // Фотоника. 2019, № 7. С. 680–687.
8. Черкасова О. П., Сердюков Д. С., Ратушняк А. С. и др. // Оптика и спектроскопия. 2020. № 6. С. 852–864.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ KDP
БОЛЬШОЙ АПЕРТУРЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ
ВО ВТОРУЮ ГАРМОНИКУ**

В. М. Рябцев, А. В. Зубков, А. М. Болтаев, В. П. Коваленко, В. С. Файзулин

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Проведены измерения искажений волнового фронта лазерного излучения, вносимых кристаллами KDP большой апертуры и определено их влияние на эффективность преобразования излучения неодимового лазера во вторую гармонику при обеспечении фазового синхронизма 1-ого типа [1, 2]. Для измерения искажений волнового фронта был разработан экспериментальный стенд, на котором проводилась регистрация пространственного распределения излучения He-Ne лазера отраженного и проходящего через кристалл, рассчитывался угловой размер зарегистрированных пятен, по которому определялась величина среднеквадратичного отклонения от направления синхронизма по апертуре кристалла. Полученное значение среднеквадратичного отклонения от направления синхронизма не превышает максимально допустимую величину 50 мкрад [3], что приводит к падению эффективности преобразования не более чем на 2 %.

Литература

1. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика / Изд 2-е., перер. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. С. 512.
2. Гурдазян Г. Г., Дмитриев В. Г., Никогосян Д. Н. Нелинейно-оптические кристаллы. М., 1991.
3. Рябцев В. М., Зубков А. В., Кедров А. И., Коваленко В. П. Измерение углов настройки кристаллов KDP для обеспечения фазового синхронизма 1-го типа при генерации второй гармоники / 20-я научно-техническая конференция «Молодёжь в науке», 2022 // Сборник докладов. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2023. Т. 1. С. 242–246.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТРОНА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ И АКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ В ВИДЕ СТЕРЖНЯ $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$

*В. И. Самойлов, Н. И. Карпов, А. Н. Бойко, И. А. Зуйков, В. А. Островский,
Е. А. Пеганов, К. Н. Макаров
samoylovvi@triniti.ru, nikarpov@triniti.ru*

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, Москва

В сравнении с широко используемыми активными элементами (АЭ) $\text{Nd}:\text{YAG}$, активные элементы на основе иттербия обладают следующими преимуществами в проектах, требующих импульсную генерацию с большой энергией: $\text{Yb}:\text{YAG}$ кристаллы позволяют добиться большего коэффициента усиления, за счет большого времени жизни верхнего лазерного уровня, при этом из-за малого квантового дефекта тепловыделение снижено [1]. Существенным недостатком $\text{Yb}:\text{YAG}$ является высокий температурный контроль, так как усиление в стержневых АЭ происходит только при криогенных температурах [2].

В данной работе исследуется предусилитель лазерного излучения на основе квантрона с АЭ в виде $\text{Yb}:\text{YAG}$ стержня размерами 5 мм в диаметре и 105 мм в длину с диодной накачкой и водяным охлаждением. За счет высокой мощности (25 кВт) и узкой полосы генерации накачки условие на криогенные температуры удалось обойти. Исследуемый предусилитель является частью установки драйвера для лазерного термоядерного синтеза. Для работы установки предусилитель должен стабильно функционировать в импульсном режиме с частотой импульсов 10 Гц. Были проведены исследования характеристик усиленного импульса в различных режимах работы, была исследована устойчивость иттербиевого АЭ к тепловым искажениям и снят его профиль люминесценции.

Проведено вычисление фокусного расстояния наведенной тепловой линзы по измененным значениям диаметра пятна перетяжки He-Ne лазера (табл. 1) и коэффициента усиления излучения квантрона с диодной накачкой и АЭ в виде стержня $\text{Yb}:\text{YAG}$ при комнатной температуре. Проведены измерения коэффициента усиления (КУ) излучения в различных режимах работы: варьировалась энергия задающего генератора и ток диодной накачки стержневого активного элемента; излучение проходило 1 и 2 прохода (рис. 1–3). Снят профиль люминесценции и показано распределение поглощаемой энергии (рис. 4).

На рис. 1–3 видно, что рост энергии в режиме работы 2 Гц почти совпадает с режимом работы разового импульса, когда между импульсами было достаточно времени для охлаждения АЭ и накачки, что говорит об эффективном съеме тепла водяным охлаждением. В режиме работы 10 Гц наблюдается заметное падение роста, связанное с температурным смещением излучения накачки, вызванным нагревом диодных линеек при повышении тока. На 1 проходе падение относительно 2 Гц и разового режима начинается со 140 А, на 2 проходах – со 130 А, ввиду того, что усиленный пучок дополнительно разогревает активный элемент. Максимальный коэффициент усиления – 68,8 – был достигнут при 150 А в режиме работы 2 Гц при 2 проходах через предусилитель. Энергия пучка возросла с 0,8 мДж до 55 мДж.

На профиле люминесценции видно, что поглощение излучения равномерно с максимумом в центре и спадает к краю примерно на 25 %. Есть 5 максимумов, расположенных напротив диодных матриц. КУ максимален при силе тока 200 А и выше значения для полностью легированного стержня примерно в 1,62 раза.

В ходе эксперимента по определению фокусного расстояния наведенной тепловой линзы были определены значения диаметра пучка He-Ne лазера при разных значениях продолжительности накачки АЭ (табл. 1). По ним вычислено фокусное расстояние оказавшееся равным примерно 20 м, что говорит о высокой устойчивости Yb:YAG к тепловым эффектам и эффективности водяного охлаждения.

Таблица 1

Диаметр пятна в зависимости от продолжительности работы накачки

t , мин	d (ось X), мм	d (ось Y), мм
0	0,4958	0,5076
1,5	0,4927	0,4981
5	0,4862	0,4951

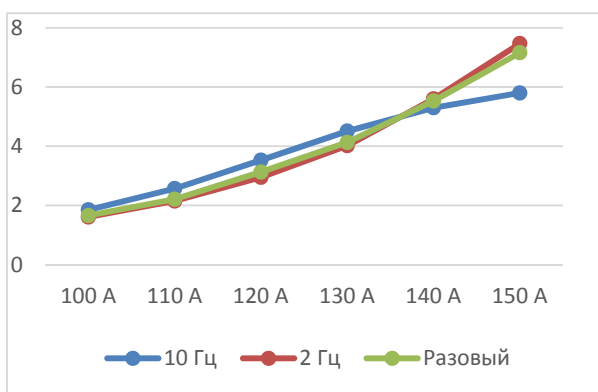


Рис. 1. КУ после 1 прохода

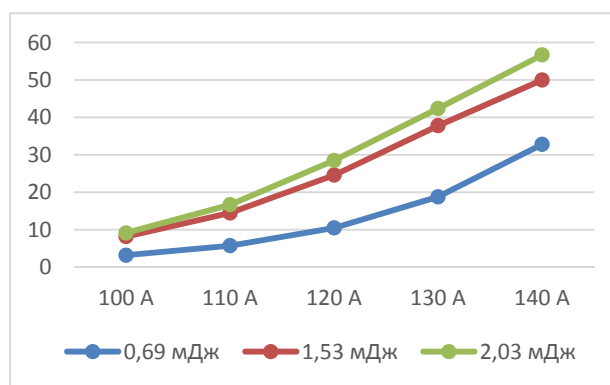


Рис. 2. Энергия (мДж) после двух проходов в зависимости от энергии ЗГ

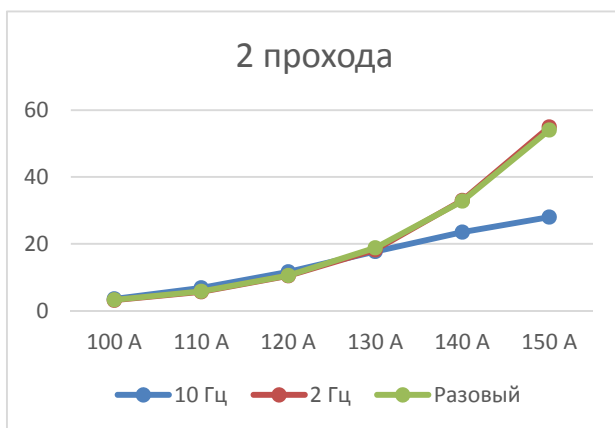


Рис. 3. КУ после 2 проходов

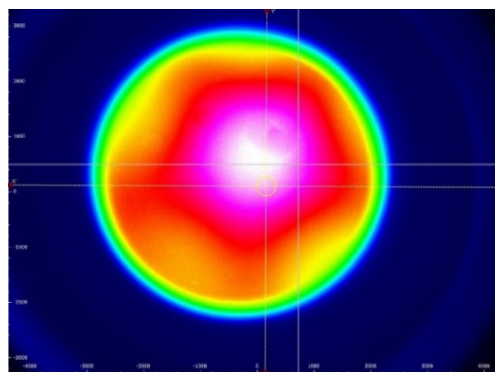


Рис. 4. профиль люминесценции

Литература

1. Снетков И. Л. и др. Исследование генерационных характеристик отечественной лазерной Yb: YAG-керамики // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. №. 7. С. 586–588.
2. Мухин И. Б. и др. Лазерные и тепловые характеристики кристалла Yb: YAG в диапазоне температур 80–300 К // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. №. 11. С. 1045–1050.

**СТРЕТЧИРОВАНИЕ УЗКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНОМ
РЕГЕНЕРАТИВНОМ УСИЛИТЕЛЕ**

И. А. Самсонов, И. Б. Мухин, С. В. Луконькин
samsonov_i19@mail.ru

Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород

Усиление узкополосных оптически синхронизованных с фемтосекундным излучением импульсов в таких лазерных материалах как Nd:YLF или Nd:YAG является одной из важных задач при создании высокомоощных фемтосекундных лазеров на основе параметрического усиления. В работе предложен новый способ стретчирования таких узкополосных лазерных импульсов в твердотельном регенеративном усилителе, включающем чирпирующую объемную брэгговскую решетку (CVBG). Установка CVBG с отражением под небольшим углом позволяет дополнительно регулировать спектральную полосу усиления регенеративного усилителя, что отличает данный подход от похожих решений в волоконных лазерах [1]. Предложенный способ экспериментально реализован на примере регенеративного Nd:YLF усилителя, что позволило сформировать оптически синхронизованные с фемтосекундным излучением узкополосные (~0.1 нм) импульсы с перестраиваемой длительностью в диапазоне 1.6-2.2 нс. Сформированные и усиленные до 70 мДж импульсы будут использоваться в качестве накачки параметрического усилителя [2]. Важным результатом является то, что реализованный способ позволяет сформировать аналогичные импульсы для усиления в Nd:YAG. Этот кристалл обладает лучшими лазерными характеристиками, но имеет очень узкую полосу усиления, что затрудняет использование классических схем стретчера на основе дифракционной решетки. Возможность применения Nd:YAG лазеров в качестве накачки параметрических усилителей позволит значительно увеличить среднюю мощность высокоинтенсивных фемтосекундных лазеров.

Поддержано НЦМУ «Центр фотоники», при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2022-316.

Литература

1. Chengtao Zhang , Xiaochao Wang, Wei Fan, Daxing Rao, and Zunqi Lin, 1 053-nm all-fiber pulse multi-pass stretcher using a linear chirped fiber Bragg grating // CHINESE OPTICS LETTERS. 2013. 11(7). 070606.
2. I. B. Mukhin, K. A. Glushkov, A. A. Soloviev et al, Upgrading the front end of the petawatt-class PEARL laser facility // Applied Optics. 2023. Vol. 62, N 10. P. 2554–2559.

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СТРУКТУРУ
И СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ Ta₂O₅/SiO₂ и Nb₂O₅/SiO₂**

Г. П. Санников, А. В. Добиков, Д. С. Тимаев, И. А. Юрлов

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

В настоящее время остается актуальной проблема лазерного разрушения покрытий оптических элементов в установках, где используются мощные непрерывные лазеры. Разрушение покрытий в лазерах непрерывного типа определяется тепловым действием поглощенного лазерного излучения.

Для повышения надежности эксплуатации оптических покрытий необходима информация о воздействии температуры на их свойства и структуру. Понимание процессов инициирования разрушения позволит скорректировать технологию нанесения покрытий и улучшить их характеристики. Знание температурных порогов изменения / разрушения покрытий позволит использовать оптические детали с минимальными рисками повреждения.

В работе приведены результаты исследований воздействия высокой температуры на структуру и свойства оптических покрытий. Температурным испытаниям были подвергнуты многослойные покрытия Ta₂O₅/SiO₂, Nb₂O₅/SiO₂ и монослой Ta₂O₅, нанесенные на кремниевые подложки. Температура нагрева кремниевых образцов в испытаниях достигала 800 °С. В ходе испытаний отслеживался процесс образования поверхностных дефектов, а также регистрировалось изменение шероховатости и отражательной способности покрытий. Определены температурные пороги деградации покрытий.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСТАНОВКЕ «ЛУЧ» С ДВУМЯ
ПЕРЕСЕКАЮЩИМИСЯ В ПЛАЗМЕ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ**

*И. Р. Смагин, С. В. Бондаренко, Л. П. Выломов, С. Ю. Головкин, В. Н. Деркач,
Л. А. Душина, В. Н. Пугачева*

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Эффект перераспределения мощности лазерного излучения между пересекающимися в докритической плазме лазерными пучками (Cross-Beam Energy Transfer или СВЕТ) может снижать эффективность сжатия мишени в экспериментах по инерциальному термоядерному синтезу. В экспериментах по схеме прямого облучения мишеней, он приводит к существенным потерям энергии лазерного драйвера [1]. При этом эффект СВЕТ успешно используется для управления симметрией облучения стенок цилиндрического бокса на установке NIF за счет введения отстройки длин волн между пересекающимися под разными углами группами пучков. В этом случае эффект СВЕТ возникает в разреженной плазме вблизи отверстий для ввода лазерного излучения [2, 3].

В работе представлены результаты моделирования экспериментов на установке «Луч» по исследованию эффекта СВЕТ. Два лазерных пучка наносекундной длительности пересекались в слое плазмы, образовавшейся после испарения тонкой пластиковой пленки. Направление перекачки энергии из пучка 0 с интенсивностью $I \sim 10^{14}$ Вт/см² в пучок 1 ($I \sim 4 \cdot 10^{13}$ Вт/см²) определялось путем задания отстройки длины волны пучка 1. Моделирование экспериментов проводилось в квазистационарном приближении в режиме линейного усиления [4] с учетом потерь на обратное тормозное поглощение.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023–2025»).

Литература

1. Igumenshchev I. V. et al. Crossed-Beam Energy Transfer in implosion experiments on OMEGA // *Physics of Plasmas*. 2010. Vol. 17. 122708.
2. Michel P. et al. Saturation of multi-laser beams laser-plasma instabilities from stochastic ion heating // *Physics of Plasmas*. 2013. Vol. 20. 056308.
3. Michel P. et al. Symmetry tuning via controlled crossed-beam energy transfer on the National Ignition Facility // *Physics of Plasmas*. 2010. Vol. 17. 056305.
4. Marion D. J. Y. et al. Modeling crossed-beam energy transfer for inertial confinement fusion // *Physics of Plasmas*. 2016. Vol. 23. 052705.

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В НАПРЯЖЕННЫХ ДИРАКОВКИХ
МАТЕРИАЛАХ**

А. В. Снегирев
komrad.snegirev2017@gmail.com

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск

Данная работа посвящена теоретическому исследованию оптоэлектронных свойств дираковских двумерных материалов: дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) и графена под действием одноосной деформации.

При приложении одноосной деформации к образцу, изменяется симметрия его кристаллической решетки, что приводит к изменению его зонной структуры. Это приводит к сдвигу долин в К-пространстве для ДПМ и к наклону дираковского конуса для графена. С учетом этих эффектов были вычислены фототоки, возникающие при облучении образцов циркулярно-поляризованным светом.

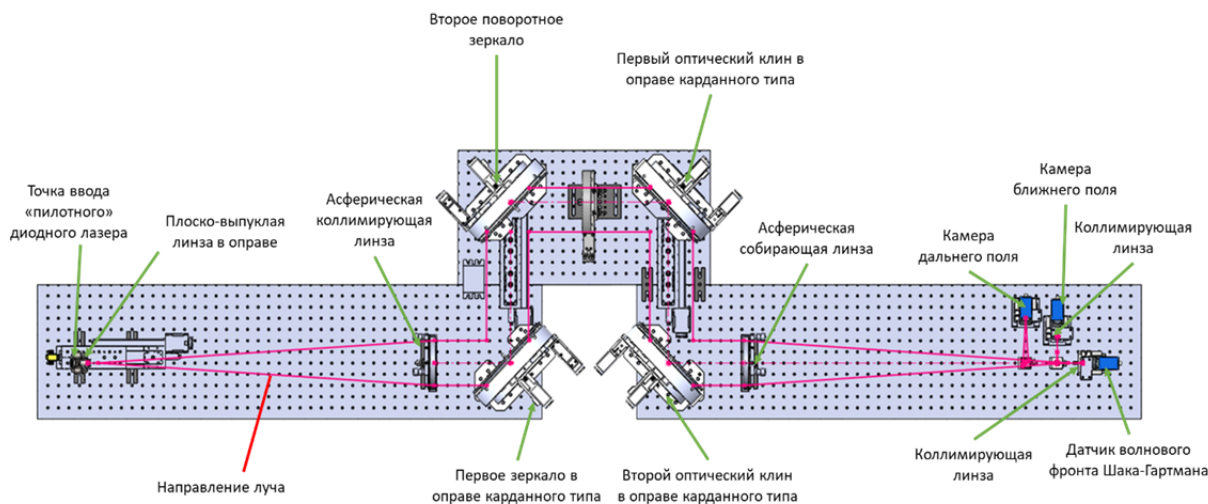
Данные эффекты в перспективе позволяют относительно легко контролировать направление тока с помощью поляризации лазерного излучения, поэтому результаты данной работы могут быть полезны при проектировании различных фотодатчиков.

СНИЖЕНИЕ ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ ПЕТА- И ТЕРАВАТТНОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

В. В. Топоровский, И. В. Галактионов, А. Л. Рукосуев, А. В. Кудряшов
topor@actopticsive.ru

Институт Динамики Геосфер Российской академии наук им. М. А. Садовского, Москва

При разработке и создании высокомо мощных лазерных комплексов возникает проблема юстировки и корректной установки оптических элементов [1]. Излучение должно проходить по заранее определенному тракту в камеру взаимодействия, которая находится на расстоянии более 40 метров от лазерного источника. Использование основного пучка для юстировочных целей невозможно ввиду возможности повреждения дорогостоящего оборудования. Данная проблема зачастую решается использованием вторичного источника излучения, который должен воспроизводить ключевые параметры основного мощного пучка (длина волны, кривизна волнового фронта, распределение интенсивности и т. д.) [2, 3]. При этом данный лазерный пучок должен идти по тому же оптическому тракту (с определенной точностью), который соответствует и основному пучку. В качестве юстировочного лазера применялся полупроводниковый лазер с характеристиками излучения, совпадающими с параметрами основного пучка. Минимизация отклонения позиций пучков производилась при помощи зеркал в оправках с шаговыми двигателями на моторизованных подвижках. Принципиальная схема представлена на рисунке. Для минимизации отклонения пучков использовался алгоритм последовательных приближений. В качестве основного лазера использовался диодный лазер длиной волны 808 нм. Точность позиционирования и совпадения пучков анализировались на датчике ближнего поля и составили: 28,6 мкм по оси X и 26,4 по оси Y . Точность наведения анализировалась на датчике ближнего поля и равнялась 15,34 мкрад по оси X и 12,03 мкрад по оси Y . Кривизна волнового фронта составила 0,06 мкм.



Принципиальная схема автоматической системы сведения лазерных пучков

Литература

1. Cheriaux G. Monomorph large aperture adaptive optics for high peak-power femtosecond lasers / G. Cheriaux, J.-P. Rousseau, F. Burgy, J.-C. Siquin, J.-M. Lurçon, C. Guillemard // Proc. of SPIE. 2007. V. 6584. 658405.

2. Toporovsky V. Investigation of PZT Materials for Reliable Piezostack Deformable Mirror with Modular Design / V. Toporovsky, V. Samarkin, A. Kudryashov, I. Galaktionov, A. Panich, A. Malykhin // Micromachines. 2023. V. 14. P. 2004.

3. Galaktionov I. Atmospheric Turbulence with Kolmogorov Spectra: Software Simulation, Real-Time Reconstruction and Compensation by Means of Adaptive Optical System with Bimorph and Stacked-Actuator Deformable Mirrors / I. Galaktionov, J. Sheldakova, V. Samarkin, V. Toporovsky, A. Kudryashov // Photonics. 2023. V. 10. P. 1147.

УТОЧНЕНИЕ БАЛАНСНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ИНВЕРСИИ И УСИЛЕНИЯ В ИТТЕРБИЕВЫХ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ В УСЛОВИЯХ МНОГОПРОХОДНОЙ НАКАЧКИ И СИГНАЛА

И. Р. Хайрулин, И. Б. Мухин
khairulinir@ipfran.ru

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород

Одним из перспективных лазерных источников с высокой средней мощностью и высоким качеством пучка является дисковый лазер $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$, совмещающий в себе преимущества диодной накачки и эффективного отвода тепла [1]. Однако из-за малой длины взаимодействия между активным элементом и лазерным излучением эффективности как усиления, так и поглощения накачки на одном проходе оказываются малыми. Для их увеличения используют многопроходные схемы, при которых лазерное излучение многократно проходит через активный элемент [2]. При этом для теоретического описания усиления излучения в этом случае, как правило, используют модель Франца-Нодвига [3]. В ней подразумевается, что в активном элементе в любой момент времени существует только одна распространяющаяся волна излучения. Таким образом, данная модель справедлива только для коротких импульсов с продольным размером много меньшим как расстояния между активным элементом и возвращающей системой зеркал, так и толщины активного элемента. Так для активного дискового элемента с характерной толщиной порядка 1 мм соответствующая длительность импульса должна быть меньше 1 пс.

В настоящей работе предложена модель, которая позволяет более корректно описать многократное прохождение импульсов излучения накачки и усиливаемого излучения через активный дисковый элемент $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ с учётом перекрытия разных частей каждого импульса внутри активной среды. Это позволяет более корректно рассчитать интенсивность излучения внутри активного элемента, что позволяет выбрать оптимальную многопроходную оптическую схему. Модель дополнена уравнением теплопроводности для учёта тепловых эффектов, существенных в дисковых лазерах [4]. Проанализированы случаи импульсов миллисекундной длительности для излучения накачки, а также микро- и наносекундной длительности для усиливаемого излучения. Показано, что использование большого количества проходов при накачке активного дискового элемента является предпочтительным для создания высокой степени возбуждения в среде, так как позволяет существенно уменьшить необходимую для этого интенсивность накачки. В тоже время, в случае небольшой степени возбуждения достаточно использовать малое количество проходов через активный элемент, что может значительно упростить оптическую схему системы зеркал, которая перенаправляет на активный элемент излучение накачки.

Более важное уточнение предложенная модель демонстрирует при расчете усиления сигнала. Модель Франца-Нодвига корректна только для случая усиления слабого сигнала, когда прямые и обратные волны в инвертированной области усиливаются независимо друг от друга. При насыщении наблюдаются значительные отличия, связанные с тем, что суммарная интенсивность сигнала в инвертированной области значительно выше, чем предполагается в модели Франца-Нодвига. При этом, чем длиннее импульс, тем большее количе-

ство волн излучения от разных проходов перекрываются друг с другом, и тем значительнее оказываются отличия. В частности, показано, что многопроходный режим усиления в активном дисковом элементе является более эффективным для коротких, наносекундных импульсов, чем для длинных, микросекундных импульсов как с точки зрения эффективности усиления, так и с точки зрения возникающих при этом искажений.

Литература

1. Giesen A., Hugel H., Voss A. et al. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers // *Appl. Phys.* 1994. В 58(5), 365.
2. Negel J.-P., Voss A., Ahmed M. A. et al. 1.1 kW average output power from a thin-disk multipass amplifier for ultrashort laser pulses // *Optics Letters.* 2013. 38(24), 5442.
3. Frantz L. M., Nodvik J. S. Theory of Pulse Propagation in a Laser Amplifier // *J. Appl. Phys.* 1963. 34(8). 2346.
4. Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Silin D. E. et al. Thermal Effects in End-Pumped Yb:YAG Thin-Disk and Yb:YAG/YAG Composite Active Element // *IEEE Journal of Quantum Electronics.* 2014. 50(3), 133.

СПОСОБ НАВЕДЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНЬ МНОГОЦЕЛЕВОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

А. В. Андраманов, Д. В. Бакайкин, В. Е. Гаганов, С. Ф. Попов, Д. Д. Халхаров

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Лазерная установка нового поколения на основе неодимового стекла рассчитана на облучение мишеней излучением второй гармоники. Многоцелевой исследовательский комплекс является составной частью установки и предназначен для проведения экспериментов по моделированию различных физических явлений с использованием лазерного излучения шестнадцати лазерных каналов [1]. Генерация и накопление энергии лазерного луча происходит на длине волны 1054 нм, а воздействие на мишень происходит при помощи излучения второй гармоники на длине волны 527 нм. Кристалл преобразователь частоты находится рядом с пятым поворотным зеркалом системы транспортировки лазерного излучения, а само зеркало применяется непосредственно для наведения лазерного излучения на мишень. Сразу за пятым поворотным зеркалом находится линза финального оптического модуля (ФОМ), которая фокусирует силовое лазерное излучение на мишень. Лучи первой и второй гармоники в фокальной плоскости второй гармоники линзы ФОМ пространственно разведены. Поэтому точное наведение на мишень силового излучения второй гармоники $\lambda = 527$ нм можно провести, только если есть юстировочный пучок с $\lambda = 527$ нм, который должен падать на линзу ФОМ в точности по направлению силового излучения. Данный юстировочный источник располагается в датчике силового усилителя перед выходной линзой транспортного пространственного фильтра и перед диагностическим клином. Трудности в совмещении направлений лазерного излучения основной гармоники и настроечного излучения второй гармоники связаны с расположением клина под углом 41° к направлению распространения излучения.

В данной работе описаны принципы совмещения излучения основной и второй гармоник после диагностического клина при помощи телескопа, а также приведены результаты экспериментов.

Литература

1. Александров В. А., Андраманов А. В., Бельков С. А. и др. Система автоматической юстировки многопроходного восьмиканального силового модуля мегаджоульного лазера // Оптический журнал. 2018. Т. 85, № 11. С. 39–49.
2. Андраманов А. В., Гаганов В. Е., Глушков М. С., Соломатин И. И. Способ наведения частотно преобразованного излучения канала лазерной установки на мишень // Патент РФ на изобретение № 2758944 от 03.11.2021 г.

**ПОЛУЧЕНИЕ МАЛОПЛОТНЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МИШЕНЯХ ДЛЯ ЛТС**

А. В. Царева, А. В. Илюшечкина, С. М. Прохоров, Е. Ю. Соломатина, И. А. Чугров
AVKlitina@vniief.ru

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Малоплотные пористые материалы в настоящее время широко исследуются в связи с возможностью их применения во многих отраслях науки. В частности, они представляют интерес для использования в качестве элементов конструкции мишеней при проведении исследований в рамках работ по лазерному термоядерному синтезу. Применение таких материалов в конструкции мишеней приводит к повышению абляционного давления, по сравнению со случаем использования твердого аблятора, и наиболее эффективному поглощению лазерного излучения. Еще одной немаловажной особенностью малоплотного пористого материала является процесс гомогенизации высокотемпературной плазмы, образующейся при взаимодействии лазерного излучения с объемом материала. Важной задачей является внедрение в объем малоплотного материала равномерно распределенных наноразмерных частиц тяжелых элементов для получения максимальной конверсии лазерного излучения в рентгеновское.

В данной работе описаны методы получения и результаты исследования четырех типов малоплотных пористых материалов и приведены примеры их использования в качестве функциональных элементов мишенных конструкций. Также приведены результаты исследований по внедрению в объем малоплотного материала равномерно распределенных наноразмерных частиц тяжелых элементов.

**ГЕНЕРАЦИЯ В СРЕДЕ Ar-Ne НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 912 НМ
С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ**

В. А. Шайдулина, Ю. А. Адаменков, М. А. Горбунов, Е. В. Кабак, А. А. Калачева, А. В. Юрьев

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Лазер с оптической накачкой на инертных газах (ЛОНИГ) – это новый тип газовых лазеров с оптической накачкой и высокой квантовой эффективностью, позволяющий преобразовать высокую выходную мощность диодного лазера в выходную мощность газового лазера с хорошим качеством волнового фронта луча. В [1] было продемонстрировано первое поколение лазеров на инертных газах. Согласно опубликованным открытым источникам, в мире произошел серьезный шаг в изучении свойств активной среды на модели лазерного источника на основе смеси инертных газов с оптической накачкой. Генерация была получена при атмосферном давлении [2, 3].

Представлены результаты измерения выходной мощности лазера на смеси инертных газов с оптической накачкой. В качестве активной среды использовали экспериментальную газовую смесь, состоящую из 98 % Ne (буферный газ) и 2 % Ar.

Основным зарегистрированным параметром экспериментов была мощность генерации, измеренная оптическим калориметром. Переменными параметрами в экспериментах были: давление и расход газовой смеси в разрядной камере, коэффициент отражения выходного зеркала (плоского) оптического резонатора, частота повторения разрядных импульсов. Была получена генерация лазера на длине волны 912 нм и исследован уровень мощности генерации в зависимости от параметров экспериментальной установки. Максимальное значение полученной мощности генерации составляло 110 мВт.

Литература

1. Han J., Heaven M. C. Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms // Optics Letters. 2012. Vol. 37, N 11. P. 2157–2159.
2. Emmons D. J., Weeks D. E. Kinetics of high pressure argon-helium pulsed gas discharge// Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 121, N 20.
3. Han J., Glebov L., Venus G., Heaven M.C.. Demonstration of diode-pumped metastable Ar laser // Optics Letters. 2013. Vol. 38, N 24. P. 5458–5461.

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РЕСУРС ГАЗОВЫХ
ЛАЗЕРОВ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**

А. С. Шулаев¹, Р. Ф. Имамов¹, Г. Н. Качалин^{1,2}, Л. М. Виноградский¹, Д. С. Назаров¹

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

²Филиал Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Саров

Газовые лазеры замкнутого цикла в настоящее время являются одним из наиболее перспективных направлений лазерной техники. Это связано с их основными преимуществами: высокий КПД, низкий квантовый дефект уровней, значительные уровни мощности при малой теплоемкости активной среды. Для перекачивания среды и направления потоков в данном типе лазера применяются нагнетатели, затворы и другие элементы, в состав которых входят пары трения, требующих применения смазочных материалов, позволяющих сохранять работоспособность данных узлов, а также не загрязняющих рабочую смесь и внутреннюю поверхность лазерной камеры продуктами, выделяющихся при воздействии на смазку таких факторов, как повышенные температуры и вакуумметрическое давление.

В работе представлены результаты исследований различных смазочных материалов. Определено их влияние на ресурс лазеров. Получены экспериментальные данные по работоспособности смазок при высоких температурах.

**ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ РАССЕЯННОГО ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ
ИЗЛУЧЕНИЯ НА МНОГОКАНАЛЬНОЙ МОЩНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ**

Л. М. Лавров, В. М. Ямщиков

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

Впервые поперечное рассеяние лазерного излучения (ЛИ) из плазмы экспериментально наблюдалось в работе [1]. Поперечное рассеяние (в области углов 70–90 градусов) исследовали в экспериментах с прямым облучением плоской мишени с использованием одного пучка, либо нескольких пучков [2, 3].

В последние годы было установлено [4], что эксперименты на NIF склонны к возникновению бокового рассеяния из-за больших размеров фокального пятна лазера и высокой лазерной интенсивности. Поэтому необходимо полное понимание этого процесса, приводящего к дополнительным потерям энергии накачки. В настоящее время в исследовательский арсенал внедряются принципиально новые методы диагностики, позволяющие проводить измерения под различными углами наблюдения вплоть до 90 градусов. Однако в полной мере получить диаграмму направленности рассеянного излучения до сих пор не удалось.

Роль поляризации ЛИ в формировании диаграммы направленности рассеянного излучения в литературе практически не обсуждается. В работе [5] наблюдалось, что боковое рассеяние направлено перпендикулярно плоскости поляризации, однако целенаправленных исследований по выяснению роли поляризации в процессе рассеяния ЛИ не проводились. Известна работа [6], где экспериментально исследовалось взаимное влияние направления векторов поляризации двух лазерных пучков, сфокусированных в общее пятно на мишени, на величину рассеянной энергии в фокусирующую оптику.

Целью данной работы является определение диаграммы направленности рассеянного из лазерной плазмы излучения, оценка энергетических потерь на рассеяние с помощью методики, изложенной в работе [7]. В ходе работы получена диаграмма направленности в диапазоне углов 2-90 градусов от вектора нормали к поверхности плоской мишени. Показано, что при интенсивности $2 \cdot 10^{14}$ Вт/см² боковое рассеяние отсутствует, а регистрируется рассеяние назад в виде двойного конуса. При интенсивности $\geq 3,4 \cdot 10^{14}$ Вт/см² появляется сильное боковое рассеяние, направленное перпендикулярно плоскости поляризации.

Литература

1. Лавров Л. М., Андреев А. А., Бессараб А. В., Марцовенко Д. И., Стариков Ф. А. Поперечное рассеяние излучения при фокусировке лазерного пучка накачки в линию в экспериментах по рентгеновскому лазеру // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. III, № 2.
2. Michel P., Rosenberg M. J., Seka W. et al. Theory and measurements of convective Raman side scatter in inertial confinement fusion experiments // PHYSICAL REVIEW. 2019. E 99, 033203.
3. M. J. Rosenberg, A. A. Solodov, Seka W. et al. Stimulated Raman scattering mechanisms and scaling behavior in planar direct-drive experiments at the National Ignition Facility // Physics of Plasmas. 2020. 1, 27 (4): 042705.

4. Rosenberg M. J., Solodov A. A., Myatt J. F. et al. *Physics of Plasmas* 30, 042710 (2023).
5. K. Glize, X. Zhao et al. Measurement of Stimulated Raman Side-Scattering Predominance in Directly Driven Experiment // *Physics Plasma-ph.* 2023. V. 11.
6. Barth, N. J. Fisch. Reducing parametric backscattering by polarization rotation // *Physics Plasma-ph.* 2020. V. 20.
7. Лавров Л. М., Поздняков Е. В., Ульмов Е. А., Ямщиков В. М., Ямщикова М. А. Метод измерения диаграммы направленности рассеянного излучения из лазерной плазмы с использованием засвеченной фотобумаги // *Приборы и техника эксперимента.* 2023. № 6. С. 35–45.

МОДЕРНИЗАЦИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛ НА ОСНОВЕ РУБИДИЯ ДЛЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М. А. Ямщикова^{1,2}, В. М. Ямщиков¹

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Саров

²Филиал Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Саров

Многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) представляют собой периодические структуры, состоящие из слоёв материалов с различными оптическими константами, по аналогии с интерференционными зеркалами для оптического диапазона. Спецификой рентгеновских зеркал являются предельно малые (до 1 нм) периоды (в соответствии с условием Брэгга), а также большое число (до 300) периодов и сильное поглощение практически всеми материалами. Необходимость большого числа периодов вызвана низкими коэффициентами отражения от одной границы [1].

Новые задачи требуют постоянного совершенствования рентгенооптических характеристик МРЗ. В частности, для развития литографии нового поколения с источником излучения на основе ионов инертных газов критически важными задачами являются оптимизации существующей многослойной оптики и поиск новых составов многослойных зеркал, обеспечивающих высокие коэффициенты отражения в более коротковолновом диапазоне $\lambda = 11\text{--}12$ нм [2–4]. Ввиду значительного объема рынка микроэлектроники, а также большого количества зеркал в оптической системе литографа увеличение коэффициента отражения МРЗ всего на несколько процентов может приводить к существенному экономическому эффекту [4].

Целью настоящей работы являлась оптимизация конструкции многослойных рентгеновских зеркал (толщина слоев, угол падения излучения) для достижения максимального коэффициента отражения и поиск новых составов многослойных зеркал для решения задач современной литографии.

Впервые проведено теоретическое исследование построения рентгеновских многослойных зеркал на основе рубидия для диапазона длин волн $\lambda = 11,4\text{--}17$ нм. С помощью генетического алгоритма решена задача оптимизации многослойной конфигурации таких зеркал. Приведены результаты расчетов отражательной способности рубидий-содержащих зеркал. Представлено сравнение полученных теоретических пределов отражения зеркал предложенной конфигурации с современными разработками многослойных рентгеновских зеркал в областях $\lambda = 11,4$ нм; $\lambda = 13,5$ нм; $\lambda = 17,04$ нм.

Литература

1. Виноградов А. В., Кожевников И. В., Пустовалов В. В. и др. Вогнутые поворотные зеркала рентгеновского диапазона. I // ЖТФ. 1985. Т. 55, № 2. С. 244–250.
2. Полковников В. Н., Шапошников Р. А., Чхало Н. И. и др. Многослойные зеркала на основе Y для спектрального диапазона 8–12 нм // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2021. № 12, С. 58–65.
3. Шапошников Р. А., Зуев С. Ю., Полковников В. Н. и др. Многослойные зеркала Ru/Sr для спектрального диапазона 9–12 нм // Журнал технической физики, 2022. Т. 92, № 8. С. 1179–1184.
4. Полковников В. Н., Салашенко Н. Н., Свечников М. В. и др. Многослойная рентгеновская оптика на основе бериллия // Успехи физических наук, сер. «Конференции и симпозиумы». 2020. Т. 190, № 1. С. 92–106.

**XV ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА
НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ
И ИНСТИТУТА ЛАЗЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РФЯЦ-ВНИИЭФ
ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ, МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ
ПО ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ И ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

ТЕЗИСЫ

8–10 октября 2024 года

г. Саров

Печатается с оригинальных макетов авторов

Компьютерная подготовка оригинала-макета: *Моисеева Е. В.*

Подписано в печать10.2024. Формат 60×84/8
Печать электрографическая. Усл. печ. л. ~11,39 Уч. изд. л. ~8,33
Тираж 90 экз. Зак. тип. 1686-2024

Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, д. 23