

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 16 декабря 2024 г № 75

О присуждении Рупасову Алексею Евгеньевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Формирование двулучепреломляющих микротреков и запись оптических элементов в прозрачных твёрдых диэлектриках ультракороткими лазерными импульсами» по специальности 1.3.19 — Лазерная физика принята к защите 14 октября 2024 года, (протокол заседания № 74) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Рупасов Алексей Евгеньевич, 7 июня 1995 года рождения, в 2019 году с отличием окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет» по направлению «Электроника и наноэлектроника». С 2019 года обучался в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) по направлению «Физика и астрономия» и закончил её в 2023 году. Справка об обучении и сдаче кандидатских экзаменов выдана ФИАН в 2023 году. С 2019 года является сотрудником ФИАН. В настоящее время работает в должности высококвалифицированного младшего научного сотрудника в

Лаборатории лазерной нанофизики и биомедицины Отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова.

Диссертационная работа Рупасова А. Е. выполнена в Лаборатория лазерной нанофизики и биомедицины Центра лазерных и нелинейно-оптических технологий Отделения квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент Кудряшов Сергей Иванович, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией лазерной нанофизики и биомедицины Отделения квантовой радиофизики имени Н.Г. Басова Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Мартынович Евгений Фёдорович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела лазерных и лучевых технологий Иркутского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук;

2. Достовалов Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории волоконной оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук.

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ), город Москва, в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, профессором Кашкаровым Павлом Константиновичем, заведующим кафедрой общей физики и наноэлектроники физического факультета МГУ, и кандидатом

физико-математических наук Заботновым Станиславом Васильевичем, доцентом кафедры общей физики и наноэлектроники физического факультета МГУ, и утвержденном доктором физико-математических наук, профессором Федяниным Андреем Анатольевичем, проректором МГУ, начальником Управления научной политики, указала, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, удовлетворяющей всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а автор диссертации Рупасов А.Е. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Соискатель имеет 40 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 23 работы, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, опубликовано 13 работ.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем А. Е. Рупасовым работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в статьях:

1. Birefringent microstructures in bulk fluorite produced by ultrafast pulsewidth-dependent laser inscription / S. I. Kudryashov, P. A. Danilov, A. E. Rupasov, M. P. Smayev, A. N. Kirichenko, N. A. Smirnov, A. A. Ionin, A. S. Zolot'ko, R. A. Zakoldaev // Applied Surface Science. – 2021. – Vol. 568. – P. 150877.

2. Direct laser writing regimes for bulk inscription of polarization-based spectral microfilters and fabrication of microfluidic bio/chemosensor in bulk fused silica / S. I. Kudryashov, P. A. Danilov, A. E. Rupasov, M. P. Smayev, N. A. Smirnov, V. V. Kesaev, A. N. Putilin, M. S. Kovalev, R. A. Zakoldaev, S. A. Gonchukov // Laser Physics Letters. – 2022. – Vol. 19, No. 6. – P. 065602.

3. Hierarchical Multi-Scale Coupled Periodical Photonic and Plasmonic Nanopatterns Inscribed by Femtosecond Laser Pulses in Lithium Niobate / S. Kudryashov, A. Rupasov, M. Kosobokov, A. Akhmatkhanov, G. Krasin, P. Danilov, B. Lisjikh, A. Abramov, E. Greshnyakov, E. Kuzmin, M. Kovalev, V. Shur // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, No. 23. – P. 4303.

4. Nanohydrodynamic Local Compaction and Nanoplasmonic Form Birefringence Inscription by Ultrashort Laser Pulses in Nanoporous Fused Silica / S. Kudryashov, A. Rupasov, R. Zakoldaev, M. Smayev, A. Kuchmizhak, A. Zolot'ko, M. Kosobokov, A. Akhmatkhanov, V. Shur // *Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 12, No. 20. – P. 3613.

5. Multi-Parametric Birefringence Control in Ultrashort-Pulse Laser Inscribed Nanolattices in Fluorite / S. Kudryashov, A. Rupasov, M. Smayev, P. Danilov, E. Kuzmin, I. Mushkarina, A. Gorevoy, A. Bogatskaya, A. Zolot'ko // *Nanomaterials*. – 2023. – Vol. 13, No. 6. – P. 1133.

6. Прямая фемтосекундная лазерная запись двулучепреломляющих структур с высоким пропусканием в плавленом кварце / Н. И. Буслеев, А. Е. Рупасов, В. В. Кесаев, Н. А. Смирнов, С. И. Кудряшов, Р. А. Заколдаев // *Оптика и спектроскопия*. – 2023. – Т. 131, № 2. – С. 170-173. – DOI 10.21883/OS.2023.02.54999.3-23.

7. Запись двулучепреломляющих микротреков в объёме плавленого кварца / А. Е. Рупасов, И. В. Гриценко, Н. И. Буслеев, Г. К. Красин, Ю. С. Гулина, А. В. Богацкая, С. И. Кудряшов // *Оптика и спектроскопия*. – 2024. – Т. 132, № 1. – С. 83-87.

8. Взаимосвязь параметров двулучепреломления и иерархической пространственной структуры микротреков, записанных в объёме плавленого кварца ультракороткими лазерными импульсами / Ю. С. Гулина, А. Е. Рупасов, Г. К. Красин, Н. И. Буслеев, И. В. Гриценко, А. В. Богацкая, С. И. Кудряшов // *Письма в ЖЭТФ*. – 2024. Т. 119, № 9. – С. 638-644.

На автореферат диссертации поступили отзывы от доктора физико-математических наук Бутова Олега Владиславовича, заместителя директора по

научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук», и доктора физико-математических наук, профессора Криштопа Виктора Владимировича, главного научного сотрудника НИИ Радиофотоники и оптоэлектроники Публичного акционерного общества «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

В отзыве доктора физико-математических наук Бутова О. В. отмечено, что в работе достигнуты результаты, обладающие новизной и практической значимостью. Указаны замечания к работе: (1) неудачная формулировка первого защищаемого положения и (2) индуцированные фемтосекундным излучением дефекты являются скорее рассеивающими центрами, а не центрами окраски. Данные замечания, как отмечено в отзыве, не влияют на общую положительную оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне.

В отзыве доктора физико-математических наук Криштопа В.В. отмечено, что результаты диссертационного исследования являются обоснованными и достоверными. В качестве недостатка указано отсутствие физической интерпретации и модели, которые необходимы для приведенной на стр. 19 связи между направлением напряженности индуцирующего поля и направлением медленной оси в полученной двулучепреломляющей структуре. Это замечание, как отмечено в отзыве, не является принципиальным и не снижает общего высокого уровня выполненной работы.

В отзывах Бутова О.В. и Криштопа В.В. указано, что автор диссертации Рупасов А.Е. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Выбор оппонентов обусловлен их высокой квалификацией и достижениями мирового уровня в сфере изучения взаимодействия лазерного излучения с прозрачными твёрдыми диэлектриками, а также применения лазерно-индуцированных структур в различных областях. Выбор ведущей организации

обусловлен её репутацией признанного научного центра, который проводит исследования в области оптики, плазмоники и физики взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Диссертационное исследование Рупасова А.Е. посвящено изучению процесса формирования двулучепреломляющих структур в объёме прозрачных твёрдых диэлектриков под воздействием ультракоротких лазерных импульсов. В работе проводится анализ влияния параметров лазерного излучения на данный процесс, а также рассматривается возможность использования созданных структур в качестве оптических элементов. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в последние годы в области лазерной обработки плавленого кварца (даже на уровне одного дефекта), фундаментальные процессы, происходящие при таком воздействии в широкозонных диэлектриках, остаются недостаточно изученными. Это обусловлено сложностью и многообразием сверхбыстрых и пространственно неоднородных оптических, электронных, тепловых и структурных элементарных процессов, происходящих при взаимодействии лазерного излучения с веществом. В результате исследований были обнаружены физические эффекты, которые проявляются при изменении параметров ультракоротких лазерных импульсов и позволяют осуществлять запись двулучепреломляющих микротреков: эффект накопления тепла который ограничивает формирование микротреков; пороговый эффект светимости фотолюминесценции немостиковых кислородных дырочных центров связанный с частотой следования импульсов; трансформация структуры микротреков обусловленная пороговой плотностью энергии импульса.

В результате проведённых исследований соискатель получил следующие значимые основные результаты:

1. Применён и апробирован метод измерения параметров двулучепреломляющих микротреков в прозрачных твёрдых диэлектриках с использованием сканирующей конфокальной фотолюминесцентной

микроспектроскопии. Данный метод позволяет определять пространственные параметры микротреков без повреждения образца.

2. В результате воздействия сфокусированных ультракоротких импульсов в объёме плавленного кварца формируются двулучепреломляющие микротреки, содержащие немостиковые кислородные дырочные центры. Фазовый сдвиг увеличивается пропорционально интенсивности фотолюминесценции центров до достижения пороговой плотности энергии импульса, равной приблизительно 15 Дж/см^2 . При достижении пороговой плотности энергии происходит трансформация структуры микротреков.

3. При увеличении частоты следования сфокусированных ультракоротких импульсов ближнего инфракрасного диапазона (1030 нм, 0,3 пс, $NA=0,25$) от 25 кГц до 2 МГц с фиксированной энергией импульса в процессе формирования двулучепреломляющих микротреков в плавленном кварце наблюдается усиление теплового накопительного эффекта. При превышении определённой пороговой частоты ($\geq 560 \text{ кГц}$) наблюдается уменьшение величины фазового сдвига, связанного с локальным тепловым разрушением материала.

4. При увеличении частоты следования лазерных импульсов от 25 кГц до 2 МГц с фиксированной плотностью энергии (1030 нм, 0,3 пс, $NA=0,25$) интенсивность фотолюминесценции немостиковых кислородных дырочных центров в двулучепреломляющих микротреках уменьшается. При частоте следования импульсов 1 МГц и более тепловой накопительный эффект приводит к разрушению материала и снижению светимости фотолюминесценции точечных дефектов.

5. На основе экспериментально определённых эффективных параметров записи двулучепреломляющих микротреков в объёме плавленного кварца сфокусированными ультракороткими импульсами (515 нм, 0,3 пс, $NA=0,25$) были созданы оптические элементы: хроматическая полуволновая пластинка, дисперсионные поляризационные фильтры Шольца и Лио, поляризационная дифракционная решётка, диэлектрическое зеркало и брэгговский отражатель.

Научная новизна представленных результатов обусловлена следующим:

1. Впервые в объёме фторида кальция и нанопористого плавленого кварца с помощью ультракоротких импульсов были получены двулучепреломляющие микротреки, а также исследованы зависимости величины двулучепреломления микротреков от параметров индуцирующего лазерного излучения.

2. Впервые была выявлена зависимость светимости фотолюминесценции немостикового кислородного дырочного центра в объёме плавленого кварца от плотности энергии импульса, и эти данные были сопоставлены с изменениями подструктуры двулучепреломляющего микротрека.

3. Впервые для измерения пространственных размеров двулучепреломляющих микротреков в объёме прозрачных твёрдых диэлектриков был использован метод конфокальной фотолюминесцентной сканирующей микроскопии.

4. Впервые установлен тепловой накопительный эффект при превышении пороговой частоты следования лазерных импульсов, он приводит к локальному разрушению материала и ограничивает процесс формирования двулучепреломляющих микротреков.

5. Впервые на основе двулучепреломляющих микротреков в объёме плавленого кварца были созданы дисперсионные поляризационные фильтры Шольца и Лио и диэлектрическое зеркало.

Практическая значимость исследования состоит в применении и апробировании неразрушающего метода измерения продольных размеров двулучепреломляющих микротреков, созданных с использованием ультракоротких лазерных импульсов. Научные результаты, полученные в рамках данной работы, предоставляют возможность физического обоснования перспективных методик записи оптических элементов в объёме прозрачных твёрдых диэлектрических материалов под воздействием ультракоротких лазерных импульсов.

Полученные результаты исследования могут быть использованы в работе таких организаций, как Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова, Пермская научно-производственная приборостроительная компания и других учреждений, занимающихся созданием и применением поляризационно-чувствительных оптических элементов.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается повторяемостью экспериментальных данных, полученных с помощью надёжных и проверенных методов. Исследования проводились на современном оборудовании. Теоретические модели хорошо согласуются как с полученными экспериментальными данными, так и с результатами исследований других авторов.

Все основные результаты, включенные в диссертацию Рупасова А.Е., получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Личный вклад автора заключается в развитии метода структурирования прозрачных твёрдых диэлектриков под воздействием ультракоротких лазерных импульсов. Данный метод основан на физических эффектах, возникающих при взаимодействии ультракоротких импульсов с исследуемыми материалами. Автор активно участвовал в разработке и создании экспериментальной установки, позволяющей записывать оптические элементы в объёме прозрачных твёрдых диэлектриков с тремя степенями свободы и возможностью варьировать параметры фазового сдвига и направления оптической оси. В рамках исследования автором были созданы оптические элементы — диэлектрическое зеркало, брэгговский отражатель, полуволновая пластинка, поляризационная дифракционная решётка и дисперсионные поляризационные фильтры — путём формирования двулучепреломляющих микротреков с использованием различных параметров индуцирующего лазерного излучения и установленных режимов записи. Автором разработан неразрушающий метод измерения продольного размера двулучепреломляющих микротреков, сформированных ультракороткими лазерными импульсами, основанный на регистрации сигнала фотолюминесценции в области их формирования и позволяющий оценить величину

двулучепреломления непосредственно внутри микротрека, зная значения фазового сдвига. Цели работы были определены научным руководителем, доктором физико-математических наук Кудряшовым Сергеем Ивановичем. Автор совместно с научным руководителем работал над реализацией этих целей.

В ходе защиты соискатель Рупасов А.Е. аргументированно ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 16 декабря 2024 года диссертационный совет принял решение присудить А. Е. Рупасову учёную степень кандидата физико-математических наук за решение научной задачи по записи двулучепреломляющих микротреков на основе физических эффектов, возникающих при взаимодействии лазерного излучения с прозрачными твёрдыми диэлектриками.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 23 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.19 — Лазерная физика), участвовавшие в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение учёной степени — 22,

против присуждения учёной степени — 0,

недействительных бюллетеней — 1.

Председатель диссертационного совета

член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

Колачевский Николай Николаевич

Учёный секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н.

Золотько Александр Степанович

16 декабря 2024 г.