

УТВЕРЖДАЮ

Проректор Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный
университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ),
начальник Управления научной политики
доктор физико-математических наук, профессор



А.А. Федянин

«21» ноября 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Рупасова Алексея Евгеньевича

***«Формирование двулучепреломляющих микротреков и запись оптических элементов в прозрачных твёрдых диэлектриках ультракороткими лазерными импульсами»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика***

Диссертационная работа Рупасова Алексея Евгеньевича «Формирование двулучепреломляющих микротреков и запись оптических элементов в прозрачных твёрдых диэлектриках ультракороткими лазерными импульсами» посвящена изучению формирования областей (микротреков) с искусственной анизотропией под действием ультракоротких лазерных импульсов (0.3–10 пс) в объеме прозрачных диэлектриков: плавленого кварца, фторида кальция и ниобата лития; анализу влияния энергии, длительности, частоты следования и числа экспонирующих лазерных импульсов на структурные и оптические свойства формируемых облученных образцов; созданию прототипов элементов поляризационной оптики на основе перечисленных материалов с микротреками.

В настоящее время учеными и инженерами активно проводятся работы по миниатюризации оптических элементов с целью их дальнейшего использования в фотонных интегральных схемах, являющихся основой концепции фотонного компьютера, и компонентах компактных лазерных и оптоинформационных систем. Акцент в данных работах делается не только на уменьшение размеров оптических элементов, но и на воспроизводимость и простоту используемых для этого технологий. Несмотря на то, что различные литографические методы хорошо зарекомендовали себя для создания компонентов интегральной фотоники, включая микро- и наноструктурирование материалов, данные подходы являются многоэтапными и достаточно трудоемкими

технологиями. В этой связи выигрыш дают методы прямой лазерной записи, когда за один этап обработки с помощью сфокусированного лазерного луча удастся локально модифицировать материал за счет лазерно-индуцированных структурных превращений в его объеме или на поверхности. В частности, оказывается возможным формировать упорядоченные структуры – решетки с периодом, сравнимым с длиной волны структурирующего излучения. Периодичность обеспечивает анизотропию формы и, соответственно, двулучепреломление в модифицированных лазерными импульсами областях, что открывает широкие возможности по созданию компактных поляризационных оптических элементов путем подбора подходящих параметров и стратегий лазерного облучения. Значительная часть экспериментов в этом направлении уделяется формированию поверхностных решеток, возникающих преимущественно за счет фотоиндуцированной генерации свободных носителей заряда и возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов. Однако, как правило, глубина модуляции рельефа не обеспечивает необходимые для поляризационной оптики фазовые сдвиги и не всегда удастся изготовить элементы фотоники, работающие в геометрии на пропускание. Решением данной проблемы является формирование двулучепреломляющих областей в объеме материалов. Однако данное направление в настоящее время менее изучено, так как физика протекающих процессов более разнообразна: необходимо дополнительно учитывать ионизацию вещества при сопутствующей филаментации лазерного пучка. В связи со сказанным комплексное решение задач диссертации по формированию двулучепреломляющих лазерно-индуцированных микротрек в объеме прозрачных диэлектриков обуславливает ее актуальность и новизну.

Диссертационная работа написана на 155 страницах, включает 87 рисунков и 147 ссылок на цитируемую литературу. Структура диссертации следующая:

Во Введении сформулирована цель работы, заключающаяся в исследовании процессов формирования и основных характеристик структурного двулучепреломления, индуцируемого в объеме прозрачных твердых диэлектриков ультракороткими лазерными импульсами, и установлении перспективных режимов лазерного изготовления оптических элементов. Излагаются задачи, научная новизна, практическая значимость работы, выносимые на защиту положения, информация о достоверности и апробации на конференциях полученных результатов, личном вкладе автора и количестве публикаций по теме диссертации.

Глава 1 представляет собой обзор литературы. В ней рассмотрены основные особенности взаимодействия лазерных импульсов с прозрачными твердыми диэлектриками: механизмы ионизации и модификации материала, самофокусировка и филаментация излучения, теории возникновения и практические применения двулучепреломляющих микротрек.

В главе 2 обосновывается выбор для исследований образцов из объемного и нанопористого плавленого кварца, фторида кальция и ниобата лития. Описываются субпикосекундная лазерная система и схема лазерной записи микротрек. Уделено внимание используемым экспериментальным методам анализа оптических и структурных

свойств облученных областей: оптической микроскопии с поляризационным микроанализом двулучепреломления, сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской и фотолюминесцентной спектроскопии, непосредственной визуализации микротреков с помощью ПЗС-камеры.

В главе 3 представлены результаты по изучению двулучепреломления и структуры двулучепреломляющих микротреков, записанных в объеме прозрачных диэлектриков. Делается всесторонний анализ зависимостей наблюдаемого фазового сдвига между обыкновенной и необыкновенной волнами и длин микротреков от энергии, длительности, частоты следования и числа лазерных импульсов при использовании различных фокусирующих объективов. Чтобы избежать необходимости каждый раз делать механические срезы для определения длины сформированного микротрека в плавленном кварце, автор диссертации предлагает и успешно апробирует новую методику нахождения данной величины по длине светимости фотолюминесцентного отклика от кислородно-дырочных центров, возникающих в результате лазерной модификации материала. Делаются важные выводы, что при формировании двулучепреломляющих микротреков в плавленом кварце увеличение частоты следования лазерных импульсов приводит к пропорциональному росту величины фазового сдвига в зависимости от светимости точечных дефектов, а само формирование дефектов дает вклад в величину оптической разности хода между обыкновенной и необыкновенной волнами.

Лазерная модификация нанопористого кварца, в свою очередь, характеризуется уплотнением материала. При этом увеличивается концентрация кислорода и кремния. В результате нанопористый плавленый кварц превращается в обычный плавленый кварц.

Изучение двулучепреломления, вызванного наличием лазерно-индуцированных микротреков в объеме фторида кальция и ниобата лития, также выявило явные тенденции зависимости величин фазового сдвига от энергии лазерных импульсов, что является несомненно важным результатом с практической точки зрения, позволяя проектировать поляризационно-чувствительные структуры с требуемыми характеристиками путем подбора соответствующих энергетических параметров лазерных импульсов.

В конце главы предлагаются механизмы формирования наблюдаемых продольной и поперечной подструктур двулучепреломляющих микротреков. В первом случае при отражении лазерных импульсов вблизи фокальной области от объёмной околоскритической плазмы происходит формирование стоячей электромагнитной волны перед плазмой вдоль оптической оси, что отражается в последующей записи в материале массивов плоскостей с ориентацией штрихов локальной модификации материала и его показателя преломления вдоль волнового вектора. Во втором случае при образовании стоячей волны формируется продольный массив листов плазмы, в которых тем же самым лазерным импульсом могут возбуждаться плазмон-поляритоны, что приводит к наноразмерной модификации материала в поперечном волновому вектору направлении. Выполненные расчеты и сравнение с экспериментом подтверждают реалистичность предложенных механизмов.

Глава 4 посвящена созданию и апробации поляризационно-чувствительных оптических элементов с микротреками. Методом прямой лазерной записи в объёме

плавленого кварца были созданы дисперсионные поляризационные фильтры Шольца и Лио, предназначенные для работы в диапазоне длин волн от 500 до 1000 нм. Можно изменять количество слоёв и параметры лазерной записи, чтобы создавать фильтры для работы в определённой спектральной области. Также на основе плавленого кварца с микротреками путем подбора соответствующей энергии облучения лазерными импульсами создана фазовая полуволновая пластина для длины волны 633 нм. Продемонстрирована возможность создания полуволновой пластинки как за один слой, так и с помощью многослойной записи. Следующим шагом по лазерному микроstructuring стало изготовление поляризационной дифракционной решетки Фуко, где расстояние между «тёмной» и «светлой» частями решетки разное. Благодаря этому происходит перераспределение интенсивности в порядках дифракции для света с левой и правой циркулярной поляризации. Величина фазового сдвига составляет около 100° для длины волны 633 нм. Автор диссертации также обращает внимание, что слоистая структура микротрека обеспечивает брэгговское отражение, зависящее от угла падения света, что показывает дополнительную возможность использования исследуемых оптических элементов в качестве диэлектрических зеркал.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации. Далее оформлены список используемых сокращений, благодарности, списки публикаций автора по теме диссертации и цитируемой литературы.

К основным результатам работы можно отнести следующие:

1. На основе метода сканирующей конфокальной фотолюминесцентной микроспектроскопии предложен способ измерения пространственных размеров двулучепреломляющих микротреков, сформированных под действием ультракоротких лазерных импульсов (0.3–3.8 пс) видимого (515 нм) и ближнего ИК-диапазона (1030 нм) в объёме прозрачных твёрдых диэлектриков. Длина области (10–60 мкм), люминесцирующей при возбуждении лазером на длине волны 532 нм, количественно соотносится с размерами изображений двулучепреломляющих микротреков, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии.
2. Под действием сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов ближнего ИК-диапазона в объёме плавленого кварца формируются двулучепреломляющие микротреки, содержащие немостиновые кислородно-дырочные центры с полосой фотолюминесценции в диапазоне 500–850 нм при возбуждении излучением с длиной волны 532 нм. Показано, что величина фазового сдвига в микротреках увеличивается соразмерно светимости фотолюминесценции до достижения структурирующими лазерными импульсами пороговой плотности энергии 15 ± 1 Дж/см², связанной с трансформацией структуры микротреков.
3. С ростом частоты следования сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов ближнего ИК-диапазона от 25 кГц до 2 МГц с фиксированной энергией импульса 1 мкДж при формировании двулучепреломляющих микротреков в плавленом кварце усиливается кумулятивный тепловой эффект, приводящий к локальному разрушению материала и уменьшению светимости фотолюминесценции.

4. С использованием установленных перспективных режимов записи двулучепреломляющих микротреков в объёме плавленого кварца сфокусированными ультракороткими лазерными импульсами с длиной волны 515 нм и длительностью импульса 0.3 пс изготовлены перспективные поляризационно-чувствительные оптические элементы: хроматическая полуволновая пластинка, дисперсионные поляризационные фильтры Шольца и Лио, поляризационная дифракционная решётка, брэгговский отражатель.

Результаты диссертационной работы А.Е. Рупасова имеют высокую практическую значимость и могут быть рекомендованы к использованию в Физическом институте имени П.Н. Лебедева РАН, Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургском государственном университете, Институте общей физики РАН имени А.М. Прохорова, Национальном исследовательском Томском государственном университете и других научных организациях и наукоемких производствах, связанных с изготовлением и использованием поляризационно-чувствительных оптических элементов.

Полученные результаты прошли серьезную апробацию на 11 международных и всероссийских конференциях, научных семинарах Физического института имени П.Н. Лебедева РАН, опубликованы в 13 статьях, удовлетворяющих требованиям ВАК РФ для защиты диссертаций на соискание ученой степени. Работы по теме диссертации поддержаны 2 грантами Российского научного фонда и отмечены премией Н.Г. Басова.

Несмотря на общее позитивное впечатление диссертационная работа А.Е. Рупасова не лишена ряда недостатков. В этой связи следует сделать ряд замечаний по оформлению и сути:

1. Местами работа оформлена небрежно и не совсем корректно:

- Фразы «интенсивность лазера», «воздействия на них лазера» и «поляризации лазера» выглядят жаргонными. В этих случаях правильно писать не про лазер, а излучение лазера.
- Текст диссертации написан на русском языке, но фрагменты рисунков везде обозначаются латинскими буквами а), b), с) и т. д., что формально неправильно.
- Список цитируемой литературы оформлялся согласно ГОСТ, когда сначала пишется первый автор, а после названия статьи перечисляются все авторы. Однако неоднократно автор диссертации забывал писать первого автора в начале библиографической ссылки.
- Вывод 4 хотя и понятен, но грамматически плохо сформулирован: «С ростом частоты следования сфокусированных УКИ ближнего ИК-диапазона (1030 нм, 0,3 пс, NA=0,25) лазерных импульсов от 25 кГц до 2 МГц с фиксированной плотностью энергии величина светимости немоستиковых кислородных дырочных центров в двулучепреломляющих микротреках, формируемых в объёме плавленого кварца, при возбуждении лазером на длине волны 532 нм уменьшается, а при частоте следования импульсов 1 МГц и более светимость точечных дефектов резко уменьшается вследствие кумулятивного теплового эффекта, приводящего к локальному разрушению материала.» Во-первых, УКИ – это ультракороткие импульсы, и писать лазерных импульсов после этого не нужно. Во-вторых,

уменьшение светимости в диапазоне частот от 25 кГц до 2 МГц не противоречит резкому уменьшению светимости при частотах свыше 1 МГц. Данное сложносочиненное предложение выглядит странно, особенно с союзом «а».

- Автор разделяет многослойные структуры внутри микротрека на диэлектрическое зеркало и брэгговский отражатель в зависимости от угла падения излучения. На самом деле в контексте данной работы – это синонимы. И то, и другое является зеркалом на основе фотонного кристалла, а угол – это лишь параметр, от которого зависит спектр отражения такой структуры.

2. В разделе 3.1.2 и первом выводе говорится о количественной корреляции между длиной микротреков, измеренной с помощью сканирующего электронного микроскопа, и протяжённостью фотолуминесцирующей области вдоль каждого микротрека. Однако на рисунке 3.9с результаты измерения длин обоими методами не пересекаются в пределах обозначенных погрешностей. Следовало бы либо увеличить значения погрешностей, либо объяснить в тексте наблюдаемое расхождение.

3. В конце главы 3 автор предлагает теоретическую модель, описывающую формирование наблюдаемых в эксперименте микротреков с определенными периодами и ориентацией. Модель представляется разумной, однако была бы еще более убедительной, если бы было сделано следующее:

- Проведено сравнение расчетов не только для ниобата лития, но и для плавленного кварца, в котором сформированные периодические структуры высокого качества обеспечивают двулучепреломление в поляризационно-чувствительных оптических элементах, исследуемых в диссертации.

- Выполнен расчет концентрации свободных носителей заряда в электрон-дырочной плазме, исходя из реальной энергии лазерных импульсов, поглощенной веществом. В представленных расчетах значения концентрации никак не привязаны к эксперименту.

4. При описании экспериментов по созданию полуволновой пластины на основе плавленного кварца с микротреками автор лишь пишет о достижении фазового сдвига 180° в образце и показывает соответствующие снимки в параллельных и скрещенных поляризаторах. Однако работоспособность полуволновой пластины должна непосредственно подтверждаться поворотом вектора поляризации линейно-поляризованного излучения при повороте пластины. Соответствующих измерений ориентационной зависимости в тексте диссертации не представлено.

5. В диссертации делается вывод о возможности изготовления поляризационно-чувствительных оптических элементов путем записи микротреков ультракороткими лазерными импульсами в объеме плавленного кварца. Глава 4 целиком посвящена решению данной задачи. Однако в положения на защиту данный весомый результат работы не выносится, что имело смысл сделать для подчеркивания практической значимости выполненного исследования.

Тем не менее, приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости ее вклада в лазерные технологии получения поляризационно-чувствительных оптических элементов. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты.

Таким образом, диссертационная работа Рупасова Алексея Евгеньевича «Формирование двулучепреломляющих микротреков и запись оптических элементов в прозрачных твёрдых диэлектриках ультракороткими лазерными импульсами» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Рупасов Алексей Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Доклад по материалам диссертации был сделан на научно-исследовательском семинаре кафедры общей физики и наноэлектроники 30 октября 2024 года. Отзыв на диссертацию одобрен на заседании семинара.

Отзыв на диссертацию составлен:

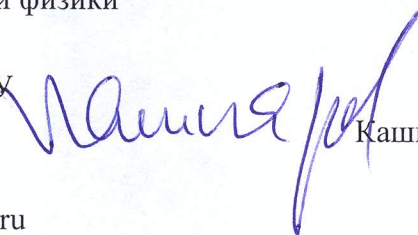
Заведующий кафедрой общей физики
и наноэлектроники

физического факультета МГУ

д.ф.-м.н., профессор

тел.: +7 495 939 2193,

e-mail: Kashkarov_PK@nrcki.ru



Кашкаров Павел Константинович

Доцент кафедры общей физики

и наноэлектроники

физического факультета МГУ

к.ф.-м.н.

тел.: +7 495 939 4657,

e-mail: zabotnov@physics.msu.ru



Заботнов Станислав Васильевич

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», физический факультет, 119991, ГСП-1, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Список основных работ сотрудников ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ), по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет:

1. D.V. Shuleiko, M.N. Martyshov, D.V. Orlov, D.E. Presnov, S.V. Zaboltnov, A.G. Kazanskii, P.K. Kashkarov "Fabrication of anisotropic structures on the surface of amorphous silicon by femtosecond laser pulses" // Solid State Phenomena, 2020, vol. 312, pp. 192–199.
2. D. Shuleiko, M. Martyshov, D. Amasev, D. Presnov, S. Zaboltnov, L. Golovan, A. Kazanskii, P. Kashkarov "Fabricating femtosecond laser-induced periodic surface structures with electrophysical anisotropy on amorphous silicon" // Nanomaterials, 2021, vol. 11, 42.
3. S. Zaboltnov, A. Kolchin, D. Shuleiko, D. Presnov, T. Kaminskaya, P. Lazarenko, V. Glukhenkaya, T. Kunkel, S. Kozyukhin, P. Kashkarov "Periodic relief fabrication and reversible phase transitions in amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films upon multi-pulse femtosecond irradiation" // Micro, 2022, vol. 2, pp. 88–99.
4. A. Kolchin, D. Shuleiko, M. Martyshov, A. Efimova, L. Golovan, D. Presnov, T. Kunkel, V. Glukhenkaya, P. Lazarenko, P. Kashkarov, S. Zaboltnov, S. Kozyukhin "Artificial anisotropy in $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films after femtosecond laser irradiation" // Materials, 2022, vol. 15, 3499.
5. D. Shuleiko, S. Zaboltnov, M. Martyshov, D. Amasev, D. Presnov, V. Nesterov, L. Golovan, P. Kashkarov "Femtosecond laser fabrication of anisotropic structures in phosphorus- and boron-doped amorphous silicon films" // Materials, 2022, vol. 15, 7612.
6. D. Shuleiko, S. Zaboltnov, O. Sokolovskaya, M. Poliakov, L. Volkova, T. Kunkel, E. Kuzmin, P. Danilov, S. Kudryashov, D. Pepelayev, S. Kozyukhin, L. Golovan, P. Kashkarov "Hierarchical surface structures and large-area nanoscale gratings in As_2S_3 and As_2Se_3 films irradiated with femtosecond laser pulses" // Materials, 2023, vol. 16, 4524.
7. С.В. Заботнов, П.К. Кашкаров, А.В. Колобов, С.А. Козюхин "Структурные превращения и формирование микро- и наноструктур в тонких пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников" // Российские нанотехнологии, 2023, т. 18, № 6, с. 723–736.

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Сокращенное название: Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, МГУ имени М.В.Ломоносова или МГУ

Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

Адрес официального сайта в сети Интернет: www.msu.ru

Телефон: +7 (495) 939-10-00 Факс: +7 (495) 939-01-26

Электронная почта: info@rector.msu.ru