



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ | SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

ОБЛАГОУ ВО «Сибирский

Федеральный университет»

Ленин Сергей Сергеевич Гуц

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет»
660041, Красноярский край,
г. Красноярск, проспект Свободный, д. 79
телефон: (391) 244-82-13, тел./факс: (391) 244-82-14
http://www.sfu-kras.ru, e-mail: office@sfu-kras.ru

ОКПО 02067876; ОГРН 1022402137460;
ИНН/КПП 2463011853/246301001



MC
16» _____ 2021 г.

№ _____
на № _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Лазаревой Натальи Львовны «Новые люминесцентные методы исследования
образования и свойств дефектов в диэлектрических кристаллах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного
состояния

Диссертация посвящена развитию и применению новых люминесцентных методов, предназначенных для исследования линейного и нелинейного взаимодействия лазерного излучения с диэлектрическими кристаллическими средами.

Актуальность темы исследования анализируется во введении диссертации. Вполне обосновано отмечается, что люминесцентные методы исследования отличаются чрезвычайно высокой чувствительностью, позволяющей исследовать даже единичные квантовые системы. Поэтому такие методы очень широко применяются для исследования различных конденсированных сред: веществ, материалов, минералов, биологических тканей. Эти методы могут быть бесконтактными и дистанционными, позволяют вести исследование внутренних объемов изучаемых сред, обеспечивают

исследование их свойств с высоким пространственным разрешением. Применение люминесцентных методов исследования в физике, химии, науках о жизни, в геологии и минералогии, в медицине, и даже в промышленных технологиях постоянно расширяется, несмотря на длительную историю их развития. Исследования, направленные на развитие и применение подобных методов весьма актуальны.

Цель и задачи работы. Цель диссертационной работы состояла в развитии новых люминесцентных методов исследования линейного и нелинейного взаимодействия лазерного излучения с диэлектрическими кристаллами и применении этих методов для изучения механизмов образования и свойств точечных дефектов, индуцированных в этих кристаллах лазерным излучением и жёсткой радиацией.

Основные разрабатываемые в работе методы были связаны с эффектом пространственной модуляции интенсивности люминесценции оптически одноосных анизотропных кристаллов. В первой части работы представлена информация о такого рода кристаллических средах. Подробно описана среда на основе кристалла сапфира, в которой под действием быстрых нейтронов в исследовательском атомном реакторе ИР-8 (Курчатовский институт) созданы центры окраски с необходимыми свойствами. Исследованы и описаны спектрально-временные характеристики одного типа таких центров.

Одной из задач диссертационного исследования, направленной на достижение поставленной цели, было физическое обоснование нового оригинального пространственно-модуляционного люминесцентного метода определения ориентации квантовых систем в оптически одноосных кристаллических средах. Также ставилась задача определения возможного варианта приборной реализации предложенного метода. При теоретическом решении этой задачи достаточно было ограничиться приближением линейного режима взаимодействия возбуждающего оптического излучения и люминесцирующего вещества, что и было реализовано соискателем. При этом был использован метод парциальных ориентационных восприимчивостей в

полуклассической теории взаимодействия света и вещества, традиционно развиваемый иркутской школой люминесценции. В рамках данной задачи распределение концентраций люминесцирующих квантовых систем (центров люминесценции) было однородным по объему образца. Пространственно-периодические изменения интенсивности возбуждаемой люминесценции вдоль волнового вектора возбуждающего излучения реализовывались при постоянстве продольного распределения интенсивности возбуждающего излучения (в пределе слабого поглощения). Наблюдаемая пространственная модуляция интенсивности люминесценции была вызвана периодическими изменениями состояния поляризации возбуждающего излучения при определенных взаимных ориентациях векторов светового поля, осей парциальных тензоров электрической восприимчивости центров люминесценции и направления регистрации люминесценции. Наличие периодических изменений интенсивности люминесценции при постоянстве интенсивности возбуждающего излучения и постоянстве концентрации центров люминесценции ясно показывает, что в общем случае интенсивность люминесценции отнюдь не пропорциональна концентрации центров.

Решение данной задачи актуально при разработке люминесцентных методов исследования нелинейного взаимодействия света и вещества. При высоких интенсивностях действующего на кристаллическую среду лазерного излучения само это излучение создаёт в среде новые люминесцирующие квантовые системы. При этом за счет явлений самофокусировки и филаментации лазерного излучения в среде исходное пространственное распределение поля радикально изменяется. Поэтому пространственное распределение концентраций индуцированных центров существенно неоднородно. Вместе с тем, для раскрытия сложных механизмов лазерно-индуцированного дефектообразования большой интерес представляет наличие информации о реализующемся в эксперименте пространственном распределении концентрации дефектов внутри образца. Здесь дистанционные неразрушающие люминесцентные методы становятся незаменимыми. Таким

образом, решаемая задача состояла в том, чтобы найти экспериментальные условия, обеспечивающие прямую пропорциональность между регистрируемой интенсивностью фотолюминесценции центров, индуцированных в режиме филаментации линейно поляризованным фемтосекундным лазерным излучением в оптически одноосной кристаллической среде при ориентации электрического вектора под углом $\pi/4$ к оптической оси и их концентрацией, и разработать метод измерения относительных концентраций центров окраски и их распределения вдоль направления волнового вектора.

В экспериментальной части работы необходимо было индуцировать продольное распределение концентраций центров окраски в анизотропном кристалле фторида магния воздействием когерентных пар интенсивных сдвинутых во времени и в пространстве фемтосекундных лазерных импульсов в режиме самофокусировки и филаментации. При этом важно было обеспечить равенство концентраций образуемых центров различных ориентаций, допускаемых законами симметрии, и измерить распределение относительной концентрации индуцированных центров окраски вдоль направления волнового вектора. Затем по величине глубины пространственно-периодической модуляции концентрации центров окраски в этом распределении сделать заключение о реализующемся механизме нелинейной межзонной фотоионизации кристаллического вещества.

Последняя поставленная задача состояла в разработке и применении радиационно-люминесцентного метода исследования механизма, обнаруженного в экспериментах роста наноразмерных зёрен в тонких плёнках фторида лития, нанесённых на стеклянную подложку методом термовакuumного напыления, при их последующей термообработке.

Анализируя цель исследования и совокупность решаемых задач, можно заключить, что диссертационная работа обладает необходимым внутренним единством. Все части работы направлены на разработку и применение оригинальных люминесцентных методов исследования в физике конденсированного состояния.

Структура и объем диссертации

Работа включает следующие разделы: введение, три главы, заключение. Полный объем диссертации составляет 109 страниц. Список цитируемой литературы – 131 наименование, список иллюстративного материала – 38 рисунков и одна таблица. Список сокращений и условных обозначений – 5 наименований.

В первой главе представлено теоретическое обоснование пространственно-модуляционного люминесцентного метода исследования ориентаций квантовых систем в кристаллах, основанного на измерении глубины пространственной модуляции интенсивности люминесценции изучаемых квантовых систем. Описан эффект пространственной модуляции интенсивности люминесценции, приведен пример реализации этого явления в кристаллах сапфира на центрах окраски, созданных нейтронным облучением. Подробно описаны свойства одного из центров окраски в сапфире, на котором может быть реализован данный эффект. Приведены общие литературные данные о механизмах радиационного дефектообразования.

Во второй главе рассчитана и визуализирована пространственно-временная динамика изменения состояния поляризации суммарного излучения когерентной пары фемтосекундных лазерных импульсов, индуцирующих центры окраски в кристаллической среде. Описаны схемы экспериментов. Показаны взаимные ориентации векторов поля и характерных направлений кристалла при фемтосекундном облучении, т.е. при образовании центров окраски в кристаллах и при возбуждении люминесценции индуцированных центров окраски после облучения при измерении их концентрации разработанным люминесцентным методом. Представлены картины пространственных изменений интенсивности люминесценции треков, образованных лазерными филаментами в кристалле. С помощью сканирующего люминесцентного конфокального микроскопа измерены пространственно-периодические изменения концентрации центров окраски, индуцированных филаментами. Измерена глубина модуляции концентрации центров вдоль

направления распространения лазерного излучения. Значительная величина глубины пространственной модуляции концентрации центров, зарегистрированная в экспериментах, говорит о реализации промежуточного механизма межзонной ионизации с существенной ролью туннелирования. Проведена интерпретация экспериментальных данных на основе теории Келдыша-Попова. Сопоставлены механизмы пространственно-периодических изменений интенсивности люминесценции квантовых систем под действием фемтосекундного излучения в диссертационной работе и в работах Чекалина-Кандидова, Блонского с соавторами и в ранее опубликованных работах Мартыновича. Показано, что описанный в диссертации механизм является новым.

В третьей главе описаны экспериментальные результаты, демонстрирующие укрупнение зёрен тонких плёнок фторида лития на стеклянных подложках при последующем отжиге. Описан радиационно-люминесцентный метод исследования механизма укрупнения зерен. Показано, что при нагреве рост зерен происходит вследствие твердофазной химической реакции пленки фторида лития с материалом подложки. Контрольные эксперименты рентгено-фазового анализа подтвердили данный механизм.

Основные научные результаты и их новизна

Основные научные результаты диссертационной работы изложены автором в форме защищаемых научных положений следующим образом:

1. *Величины углов, задающих ориентацию люминесцирующих электродипольных квантовых систем в оптически одноосных конденсированных средах, однозначно связаны с величинами глубины пространственной модуляции интенсивности фотолюминесценции этих квантовых систем. Данный факт служит обоснованием нового пространственно-модуляционного люминесцентного метода определения ориентации квантовых систем в кристаллической среде.*

2. *Пространственная модуляция концентрации центров окраски, индуцированных в оптически одноосном анизотропном кристалле*

когерентными парами интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов, обусловлена реализацией промежуточного механизма многофотонно-туннельной фотоионизации кристаллического вещества.

3. Прямая пропорциональность между интенсивностью фотолюминесценции центров, индуцированных в режиме филаментации линейно поляризованным лазерным излучением в оптически одноосном кристалле при ориентации электрического вектора под углом $\pi/4$ к оптической оси, и их концентрацией может быть обеспечена при ориентации электрического вектора линейно поляризованного излучения, возбуждающего фотолюминесценцию, а также направления регистрации люминесценции вдоль оптической оси кристаллической среды.

4. Механизм зарегистрированного в экспериментах увеличения при термическом отжиге размера зёрен фторида лития, образующих тонкую плёнку, нанесённую на стеклянную подложку методом термовакуумного напыления, включает изменение их химического состава и кристаллической структуры за счёт реакции взаимодействия нано- и микрочастиц фторида лития с материалом стеклянной подложки.

Данные научные положения являются обоснованными, доказанными, они сформулированы впервые и являются новыми.

Практическая значимость работы

Можно согласиться с заключением автора о том, что научные результаты, полученные в диссертации, имеют практическое значение для развития приложений в области фемтосекундных лазерных технологий, в том числе, для записи информации на люминесцентных оптических носителях в виде монохромных и цветных изображений или в цифровых форматах, а также для применения и разработки новых методов исследований.

Новизна и практическая значимость результатов диссертации подтверждены государственной патентной экспертизой при выдаче патента РФ на изобретение и свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, которые были использованы в диссертационной работе.

Результаты работы целесообразно использовать в Физическом институте им. П.Н. Лебедева, в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, в Институте спектроскопии РАН, в Институте физики им. Л.В. Кириенского, в Институте физики полупроводников им. Ржанова СО РАН, в Томском государственном университете, в Томском политехническом университете, в Уральском федеральном университете, в Институте сильноточной электроники СО РАН и в других организациях.

Соответствие научной специальности

Тематика и содержание диссертационной работы соответствуют направлениям исследований 1, 4 и 6 паспорта научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Замечания к работе

1. В Главе 1 дается теоретическое обоснование люминесцентного метода исследования ориентаций квантовых систем в кристаллах, основанного на угловой зависимости глубины пространственной модуляции интенсивности. В этой же главе подробно описывается схема эксперимента, реализующего эту угловую зависимость, и приводятся экспериментальные результаты для образца $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Смысловый разрыв заключается в отсутствии сравнения результатов моделирования и эксперимента. На основании такого сравнения можно было бы сделать вывод о выполнимости ряда ограничений, диктуемых моделью, в частности условия равномерного распределения излучателей в кристалле и линейного режима взаимодействия возбуждающего оптического излучения и люминесцирующего вещества.

2. В Главе 3 на основании результатов исследования пленок фторида лития на подложке из силикатного стекла выявлена важная корреляция между размером зерен (метод микроскопии) и проникновением химических элементов из подложки в пленку (метод рентгеноструктурного анализа) для необлученных рентгеновским излучением образцов. Люминесцентный метод оказался неинформативен для такого типа образцов. Насколько уместно результаты люминесцентного исследования предварительно модифицированных

рентгеновским излучением образцов фторида лития привлекать для объяснения механизмов процессов в немодифицированных образцах?

3. Основной вывод Главы 3 посвящен процессам при отжиге. Определена величина температуры отжига ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$), при которой процессы укрупнения зерен, проникновения материала подложки в пленку и люминесцентные свойства проявляются наиболее ярко. Не ясно, почему именно на этой температуре был установлен предел отжига.

4. Диссертация содержит три оригинальные главы, посвященные разным объектам и задачам исследования. При этом литературный обзор дан только в первой главе, в остальных двух автор ограничивается коротким введением, не позволяющим в полной мере оценить степень проработанности научной проблемы.

5. В работе обнаружены следующие оформительские неточности. В тексте автореферата дублируется пункт «Достоверность полученных результатов», оформление списка литературы не следует принятым правилам и меняется у самого автора от ссылки к ссылке, под номерами 54 и 55 в списке литературы процитирована одна и та же публикация.

Заключение

Отмеченные замечания не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Представленная диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, которая содержит решение актуальных научных задач в области физики конденсированного состояния. Новизна, практическая значимость и достоверность научно-практических результатов не вызывает сомнения. Автореферат и опубликованные по теме диссертации статьи отражают основное содержание диссертации. Статьи по теме диссертации опубликованы в профильных рецензируемых научных журналах, в том числе, первого и второго квартилей. Количество публикаций соответствует требованиям. Результаты работы хорошо апробированы на научных конференциях, симпозиумах и конгрессах.

Диссертация Лазаревой Натальи Львовны «Новые люминесцентные методы исследования образования и свойств дефектов в диэлектрических кристаллах» удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, ред. от 11.09.2021), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сама Лазарева Н. Л. заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

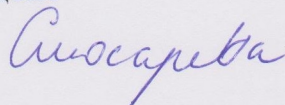
Доклад Н.Л. Лазаревой заслушан на расширенном заседании базовой кафедры фотоники и лазерных технологий. На заседании присутствовало 17 чел., из них докторов физ.-мат. наук – 6, кандидатов физ.-мат. наук – 8. Отзыв рассмотрен на заседании базовой кафедры фотоники и лазерных технологий 06.12.2021 года, протокол № 4.

Отзыв подготовили:

профессор базовой кафедры фотоники и лазерных технологий

д-р физ.-мат. наук (01.04.05 «Оптика»), доцент

Слюсарева Евгения Алексеевна



профессор кафедры теоретической физики и волновых явлений

д-р физ.-мат. наук (01.04.07 «Физика конденсированного состояния»),

профессор

Ветров Степан Яковлевич

