

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации

Дресвянского Владимира Петровича

**«ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ
ВОЗБУЖДЕНИИ И СВОЙСТВА ИНДУЦИРОВАННЫХ ЦЕНТРОВ
ОКРАСКИ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ»,**

представленной на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Дресвянского В.П. посвящена исследованию процессов импульсного лазерно-стимулированного формирования дефектов в широкозонных диэлектрических кристаллах и детальному изучению их спектрально-люминесцентных свойств. Стабильные (долгоживущие) центры окраски в твердых средах представляют значительный интерес как с точки зрения фундаментальной оптики и спектроскопии в части определения механизмов взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом, так и для разнообразных практических приложений в области квантовой электроники и фотоники. Традиционно, кристаллы с центрами окраски находят широкое применение в лазерной физике, оптоэлектронике, в твердотельной индивидуальной дозиметрии, а также в качестве запоминающих сред и люминесцентных материалов. В самые последние годы лавинообразно растет интерес к фотонике одиночных люминесцирующих центров, являющихся идеальной основой элементной базы квантовой информатики и наносенсорики. И фундаментальные, и прикладные задачи требуют систематической разработки экспериментальной базы для синтеза и спектромикроскопии дефектов в диэлектрических кристаллах. Так, принципиально важной является проблема спектроскопической дифференциации (идентификации) квантовых систем, созданных различными видами ионизирующего излучения в подобных средах, систематизации их

спектров, определения схем энергетических уровней и типов квантовых переходов. Все вышеизложенные факты определяют высокую **актуальность**, фундаментальную и практическую значимость диссертационного исследования Дресвянского В.П.

Цель диссертационной работы была определена автором как систематическое изучение процессов лазерно-стимулированного дефектообразования в широкозонных диэлектрических кристаллах в условиях самофокусировки и филаментации возбуждающего фемтосекундного излучения и исследование оптико-спектральных свойств образованных в результате такого воздействия люминесцирующих дефектов. Для достижения заявленной цели автором решался комплекс задач с применением совокупности расчетно-теоретических и экспериментальных методов, включающих как классические методы оптической спектроскопии, так и ультрасовременные методики спектромикроскопии, обеспечивающие доступ к единичным центрам окраски в твердотельной среде.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Общий объем работы составляет 346 страницы, иллюстрируется 118 рисунками, включает 13 таблиц и 366 библиографические ссылки.

В первой главе представлен литературный обзор, посвященный рассмотрению вопросов и проблем современной физики диэлектрических кристаллов с центрами окраски. А именно, рассмотрены вопросы радиационного образования центров окраски; нелинейные фотофизические процессы в широкозонных диэлектриках; лазерно-индуцированное первичное дефектообразование в щелочно-галоидных кристаллах. Особое внимание уделено задаче исследования пространственного распределения центров окраски, индуцированных в кристаллах фторида лития интенсивным фемтосекундным лазерным излучением. Автором проведена детальная систематизация данных в выбранной для исследования области науки. Обсуждение современного состояния данной области науки, детальный анализ методологии и современной инструментальной базы лазерной физики

и спектроскопии, систематизации полученных различными группами результатов убедительно демонстрирует актуальность диссертационного исследования, востребованность ожидаемых результатов в различных областях современной фотоники и физики конденсированного состояния.

Во второй главе обсуждаются экспериментальные и теоретические основы физики лазерного дефектообразования в диэлектрических кристаллах. Представлены результаты исследований спектрально-кинетических характеристик центров окраски, образующихся при фемтосекундном лазерном возбуждении в кристаллах фторида лития, а также данные исследований термостимулированной люминесценции и пространственно-селективной термолюминесцентной спектроскопии дефектов, индуцированных фемтосекундным лазерным излучением в кристаллах фторида лития. На основе полученных результатов обоснована физическая модель образования центров окраски в кристалле фторида лития при его облучении последовательностью фемтосекундных лазерных импульсов. Исследовано влияние локального нагрева вещества на процессы агрегации и коагуляции при лазерном дефектообразовании в условиях филаментации возбуждающего излучения. По результатам проведенных исследований обоснована методика фемтосекундной лазерной записи трехцветных объемных изображений в кристаллах фторида лития. В этой части необходимо отметить обдуманый выбор методов и инструментов исследования, а также использование самого высококлассного оборудования для проведения исследований. Так, в работе был использован сканирующий конфокальный люминесцентный микроскоп с пикосекундным временным разрешением PicoQuant MicroTime 200, позволяющий реализовать технику спектромикроскопии одиночных центров окраски с время-коррелированным счетом одиночных фотонов люминесценции квантовых излучателей.

В третьей главе исследованы механизмы взаимодействия интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с веществом. Для этого автор реализует оригинальную методику характеристики дефектообразования в диэлектрических средах с различной симметрией с учетом поляризации

возбуждающего светового поля. Показано, что высоконелинейная генерация электронно-дырочных пар происходит вследствие комбинированного процесса многофотонно-туннельной ионизации. В результате проведенных работ автор установил, что в кристаллах фторида лития азимутальные зависимости эффективности межзонной нелинейной фотоионизации и эффективности самофокусировки находятся в противофазе. В диссертации экспериментально показано, что в анизотропных кристаллах с центрами свечения аксиальное пространственное распределение интенсивности люминесценции, возбуждаемой лазерными импульсами с фемтосекундной длительностью носит периодический характер. Полученные результаты были положены автором в основу новой оригинальной методики люминесцентного контроля пьедестала фемтосекундных лазерных импульсов.

Четвертая глава содержит результаты исследования свойств одиночных радиационных дефектов и их ансамблей, которые могут быть созданы при облучении диэлектрических кристаллов интенсивным лазерным излучением или другими видами радиации. На мой взгляд, именно в этой части работы авторами достигнут наиболее значимый прогресс в области люминесцентной спектроскопии центров окраски в неорганических кристаллах. Впервые в мире методом конфокальной сканирующей люминесцентной микроскопии с ультравысоким пространственным и временным разрешением экспериментально исследован характер люминесценции одиночных дефектов - F_2 и F_3^+ центров окраски в кристалле фторида лития. Представлены результаты исследований фотофизических процессов на одиночных центрах окраски в кристаллах фторида лития. На основе полученных экспериментальных результатов обоснованы новые спектроскопические методы идентификации и дифференциации различных типов радиационных дефектов, для чего предложены методы анализа квантовых траекторий интенсивности фотолюминесценции.

В пятой главе на основе совокупности полученных экспериментальных результатов разработаны оригинальные динамические модели фотолюминесценции одиночных F_2 и F_3^+ центров окраски, обоснована

универсальность поляризационного метода определения типов и мультипольности квантовых систем в диэлектрических кристаллах. Представлены результаты лазерной люминесцентной поляризационной микроскопии дефектов в кристаллах фторида лития, исследован и объяснен мерцающий характер фотолюминесценции одиночных центров окраски. На основе полученных данных обоснована пространственная статистическая модель распределения агрегатных центров и других конечных продуктов реакций в профиле поперечного сечения единичного трека, индуцированного фемтосекундным лазерным излучением в кристалле фторида лития.

В заключении сформулированы общие выводы диссертации.

В рамках диссертационного исследования автор получил целый ряд интересных научных результатов, некоторые из которых получены впервые:

1. Впервые в ходе прямого эксперимента установлено, что азимутальные зависимости эффективности межзонной высоконелинейной фотоионизации и эффективности самофокусировки находятся в противофазе. Экспериментально показано, что эффективность образования простых и агрегатных центров окраски в кубических кристаллах LiF при нормальном падении лазерного луча на плоскость грани куба периодически зависит от азимутального угла θ между электрическим вектором E и ребром куба на этой грани с периодом $\pi/2$. Обнаружено, что азимутальные зависимости, для дефектообразования (максимум при $\theta=\pi/4$) и для фотогенерации носителей (максимум при $\theta=0$) находятся в противофазе.

2. Впервые методом конфокальной сканирующей люминесцентной микроскопии, реализующий принцип время-коррелированного пространственно-селективного счета одиночных фотонов экспериментально изучен мерцающий характер флуоресценции единичных радиационных дефектов, а именно, F_2 и F_3^+ центров окраски в кристалле фторида лития. Разработана математическая модель и выполнено компьютерное моделирование квантовых траекторий интенсивности люминесценции одиночных центров окраски. Реализованная математическая модель, задающая статистику *on* и *off* - интервалов, даёт возможность определить по

экспериментально полученной квантовой траектории статистические свойства ансамбля центров окраски (время жизни в триплетном состоянии, вероятность синглет-триплетного перехода и др.). В частности, вероятность синглет-триплетного перехода для F_2 центров окраски определена в эксперименте как 10^4 с^{-1} .

На основе полученных научных результатов теоретических и экспериментальных исследований, на примере кристаллов фторида лития, автором предложена физическая модель процессов фемтосекундного лазерного дефектообразования в диэлектрических кристаллах, включающая самофокусировку и филаментацию возбуждающего оптического излучения, многофотонно-туннельную ионизацию вещества с генерацией электронно-дырочных пар и экситонов, распад экситонов на первичные френкелевские дефекты, их перезарядку, миграцию, агрегацию и нуклеацию, с учетом азимутальной анизотропии взаимодействия интенсивного лазерного излучения с кубическими кристаллами и локальным нагревом материала в областях прохождения световых филаментов.

В работе предложена и апробирована совокупность экспериментальных методов, определяющих практическую значимость диссертационного исследования. В частности, предложено два оригинальных метода контроля пьедестала фемтосекундных лазерных импульсов. Разработан и экспериментально обоснован метод записи объемных полноцветных изображений. **Практическая значимость работы** не вызывает сомнений и подтверждена патентами на полезную модель и на изобретение. На мой взгляд, именно такие квантовые излучающие системы на основе центров окраски в неорганических кристаллах могут стать основой нового поколения устройств квантовой оптики и сенсорных технологий. Высокие конкурентные преимущества таких материалов (по сравнению с органическими молекулами красителей, коллоидными нанокристаллами - квантовыми точками) определяются высокой стабильностью и временем жизни таких квантовых излучателей, высокий уровень контроля при синтезе и возможность управления спектрально-люминесцентными свойствами.

Достоверность полученных результатов диссертационного исследования подтверждена совокупностью применяемых в работе апробированных физических методов, выбором адекватных теоретических моделей, систематическим характером экспериментальных исследований с применением современного научного оборудования и поверенных средств измерений, воспроизводимостью полученных результатов и анализом погрешностей измерений. Необходимо отметить также, что автор провел детальный сравнительный анализ имеющихся работ по данному направлению науки, систематизировал полученные другими научными группами результаты.

При общем положительном впечатлении от диссертационной работы Дресвянского В.П. необходимо отметить ряд вопросов и комментариев.

1. Одним из принципиальных достоинств лазерно-индуцированных центров окраски в неорганических кристаллах является их высокая стабильность и долговечность. Автор в диссертации интерпретирует исчезновение люминесценции центров без ее последующего восстановления в течение времени наблюдения как фоторазрушение в результате процессов ионизации, сопровождающихся отрывом электрона и образованием F_2^+ центров и/или фотодиссоциации с образованием пары F центров. Не ясно, является ли данное объяснение единственно возможным. На мой взгляд, стоило больше внимания уделить вопросу о возможных способах фотообесцвечивания уже сформированных квантовых излучателей, возможности управляемого переключения излучателя между «светлыми» и «темными» состояниями.

2. Во второй главе (п.2.6, стр. 144 и далее) автор рассматривает задачу о перераспределении нагрева в пространстве. Для получения аналитического решения при этом вносятся некоторые предположения, в частности, приближение филамента бесконечной длины (предположение, основанное на экспериментальном факте высокого значения отношения длины филамента к его толщине). При этом автор не рассматривает микроскопическую природу среды в филаменте. В этой связи возникает вопрос, насколько сильно

пространственное распределение и плотность возникающих дефектов внутри филамента может исказить полученное решение?

3. При рассмотрении поляризационных зависимостей квантовых траекторий фотолюминесценции одиночных центров окраски было бы интересно обсудить вопрос взаимодействия со световыми полями, в которых присутствует аксиальная компонента поляризации. Во-первых, современная адаптивная оптика позволяет синтезировать световые поля (напр., спиральные пучки) с заданными поляризационными характеристиками, тем самым существенно расширяя возможности спектроскопии одиночных квантовых излучателей. Во-вторых, при использовании высокоапертурных объективов соответствующие компоненты могут привести к дополнительным эффектам. Проводилась ли оценка последнего эффекта в диссертационной работе?

Диссертационная работа Дресвянского В.П. представляет собой целостное фундаментальное исследование, в рамках которого исследованы структурные и динамические характеристики дефектов в диэлектрических кристаллах, индуцированных фемтосекундным лазерным излучением, установлены закономерности и построена физическая модель процессов дефектообразования. Всю совокупность полученных в рамках диссертационного исследования результатов можно рассматривать как основу научного направления ***фотоники лазерно-индуцированных центров окраски в диэлектрических кристаллах.***

Результаты работы в должной мере опубликованы в реферируемых научных журналах и апробированы на представительных конференциях. Выводы диссертационного исследования полностью соответствуют поставленным задачам. Автореферат полностью отражает содержание работы. Тексты диссертации и автореферата написаны ясным языком, хорошо структурированы и соответствуют всем предъявляемым к подобным работам требованиям.

Диссертационная работа «Дефектообразование при фемтосекундном лазерном возбуждении и свойства индуцированных центров окраски в диэлектрических кристаллах» по своей актуальности, содержанию, объему, новизне, научной и практической значимости результатов, полученных в работе, отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020), предъявляемым к докторским диссертациям. Название и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности, а её автор В.П. Дресвянский, **заслуживает присуждения** ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,

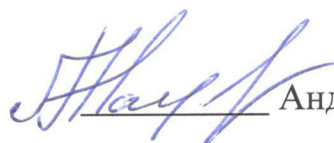
Заведующий отделом спектроскопии конденсированных сред,
главный научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН),

д.ф.-м.н. (01.04.05 – «Оптика»), доцент (01.04.05 – «Оптика»)

профессор РАН,



Андрей Витальевич Наумов

«30» марта 2021 г.

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5.

Тел. 8 (910) 470-6703, Факс: 8 (495) 851-0886.

Эл. почта: a_v_naumov@mail.ru, сайт: www.single-molecule.ru.

Подпись и фамилию сотрудника ИСАН А.В. Наумова удостоверяю

Ученый секретарь ИСАН

к.ф.-м.н.



Р.Р. Кильдиярова