

**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**

Рецензируемая диссертация посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию процессов дефектообразования в широкозонных диэлектрических кристаллах под действием фемтосекундного лазерного излучения в условиях самофокусировки и филаментации, и исследованию физических свойств образованных дефектов. Не смотря на то, что дефектообразование в твердом теле под действием мощного лазерного излучения вот уже более пятидесяти лет является предметом интенсивных исследований теоретиков и экспериментаторов во всем мире, интерес к нему продолжает поддерживаться на чрезвычайно высоком уровне. Растет число публикаций по этой тематике, организуются конференции и издаются новые журналы, специально посвященные дефектообразованию в широкозонных кристаллах. Причины этого совершенно очевидны: с одной стороны, изучение дефектообразования под действием фемтосекундного лазерного излучения позволило открыть множество качественно новых физических явлений, представляющих общенаучный интерес, а с другой стороны, оно генерирует идеи для создания принципиально новых типов твердотельных приборов для лазерной генерации, фотохромных запоминающих устройств, дозиметрических детекторов ионизирующего излучения и стимулирует развитие новых технологий. Из сказанного ясно, что тема диссертации, избранная соискателем, безусловно является **актуальной**, а поскольку процессы дефектообразования

под действием лазерного излучения и физические свойства формирующихся в этих процессах дефектов изучены еще отнюдь не исчерпывающе. То **новизна** полученных в работе результатов также не вызывает сомнений.

В оригинальной части диссертации рассматриваются **три основные задачи**.

**Первая из них** — изучение механизмов возбуждения электронной подсистемы диэлектрических кристаллов интенсивным лазерным фемтосекундным излучением при его самофокусировке и филаментации. Определено влияние на эти процессы структурной симметрии кристаллов и поляризации возбуждающего светового поля. В кристаллах фторида лития экспериментально установлено антифазное поведение угловых зависимостей эффективности межзонной нелинейной фотоионизации и эффективности самофокусировки. Проведенные исследования поляризационных зависимостей эффективности образования дефектов позволили сделать вывод о том, что основным механизмом нелинейной генерации электронно-дырочных пар в условиях проводимых экспериментов является процесс многофотонно-туннельной ионизации.

**Вторая задача диссертации** заключается в теоретическом и экспериментальном изучении механизмов дефектообразования в диэлектрических кристаллах, под действием интенсивного фемтосекундного лазерного излучения. В ходе решения этой задачи были исследованы спектрально-кинетические характеристики люминесценции центров окраски и их пространственно-селективной термолюминесценции. Выявлено влияние возрастания плотности мощности облучения при самофокусировке лазерного излучения на процессы локальной лавинной генерации плотной электронно-дырочной плазмы. Экспериментально изучено явление локального нагрева вещества и его влияние на процессы агрегации и коагуляции дефектов в

условиях филаментации возбуждающего лазерного излучения. Развита и обоснована физическая модель образования центров окраски в кристалле фторида лития.

**И, наконец, третья из упомянутых задач состоит в исследовании** рекомбинационных свойств одиночных радиационных дефектов и их ансамблей, которые могут быть созданы при облучении диэлектрических кристаллов интенсивным лазерным излучением или другими видами радиации. В частности, в рамках проведенного исследования решалась крайне актуальная задача идентификации центров с широкими и сильно перекрывающимися спектральными полосами в спектрах оптического поглощения и излучения, и близкими временами затухания люминесценции. Автором разработан метод надежной идентификации таких дефектов, работающий при условии регистрации свечения от отдельных центров, основанный на измерении аperiodической последовательности гашения и последующего восстановления излучения центра с течением времени при непрерывном возбуждении фотолюминесценции (по классификации автора «квантовая траектория»). В рамках этого метода для характеристики дефекта анализируются времена нахождения связанного с ним центра рекомбинации в излучающем и неизлучающем состояниях и частота переходов между этими состояниями. Использование метода позволило определить преимущественный механизм фотопреобразования  $F_2$  центров окраски в кристаллах LiF, под действием интенсивного лазерного излучения в полосе оптического поглощения этих центров. Было показано, что доминирующим механизмом распада центров является диссоциация на два F центра, а вероятность фотоионизации  $F_2$  центров с образованием электрона и  $F_2^+$  центров не превышает 10%. Анализ «квантовых траекторий» для поляризованного излучения позволил автору

разработать новый метод определения мультипольности и ориентации квантовых систем в широкозонных кристаллах.

Переходя к оценке диссертации в целом, необходимо отметить, что соискателю в своей диссертационной работе удалось получить совокупность принципиально новых результатов, которые, с одной стороны, дают ясную физическую картину исследовавшихся явлений, а с другой стороны инициируют проведение последующих экспериментальных и теоретических работ, направленных на обнаружение новых эффектов. Таким образом, можно утверждать, что совокупность полученных в работе результатов и сделанные на их основе выводы значительно расширяют существующие представления о механизмах возбуждения электронной подсистемы и механизмах дефектообразования в широкозонных диэлектрических кристаллах под действием фемтосекундного лазерного излучения в условиях самофокусировки и филаментации и являются новым, существенным вкладом в физику конденсированного состояния. По результатам проводимых исследований разработаны методы однозначной идентификации центров рекомбинации в диэлектрических кристаллах и методы определения мультипольности и пространственной ориентации таких центров в кристаллической решетке, а также технология записи объемных полноцветных изображений на оптическом носителе на основе кристаллов фторида лития, что, безусловно, имеет важное **прикладное значение**.

Говоря о недостатках работы, необходимо отметить следующее:

1. При рассмотрении в третьей главе диссертации анизотропии лазерного дефектообразования в оптически изотропных кристаллах фторида лития автор пользуется понятием эффективной массы электрона и его анизотропией. Поскольку само понятие эффективной массы носителя заряда привязано к экстремуму зон, было бы не плохо обсудить

применимость этого приближения и происходящую при этом модификацию эффективной массы электрона и ее анизотропию, при (1) разогреве электронов, когда их энергия становится на несколько электронвольт больше, чем на дне зоны, при (2) сильной локализации электронов (когда энергия локализации сравнима, по порядку величины, с шириной запрещенной зоны) и при (3) учете поляронного эффекта при движении электрона вблизи дна зоны проводимости.

2. Анализируя эволюцию первичных Френкелевских дефектов, образовавшихся в процессе фемтосекундного лазерного облучения кристаллов, т.е. их последующую перезарядку, миграцию, агрегацию и нуклеацию, автор плодотворно учитывает температурные зависимости этих процессов. Однако в рамках работы рассматривались только температуры, превышающие температуру формирования первичных дефектов. Между тем, понижение температуры образцов сразу же после окончания лазерного облучения (вплоть до легко достижимых температур жидкого азота - 77 К), могло бы дать дополнительную информацию при выявлении важности той или иной цепочки промежуточных процессов, приводящих к образованию конечных дефектных комплексов.
3. В четвертой главе при рассмотрении люминесценции от одиночных центров окраски автором при непрерывном возбуждении наблюдалась апериодическая последовательность гашения и последующего восстановления излучения центра с течением времени, названная квантовой траекторией. Для объяснения этого явления центр, обосновано описывался как многоуровневая система с несколькими конкурирующими каналами излучательной и безызлучательной рекомбинации электронного возбуждения. Аналогичное поведение динамики интенсивности люминесценции при непрерывном возбуждении имеет место для

одиноким полупроводниковых квантовых точек, и получило название «blinking». Вероятностное распределение off-интервалов для различных систем полупроводниковых квантовых точек хорошо изучено и описывается степенной функцией, в отличие от приведенного на рис.4.8 экспоненциального распределения, найденного в диссертационной работе для  $F_2$  центра в кристалле LiF. На мой взгляд, сравнение поведения временной динамики люминесценции одиночных квантовых излучателей в различных твердотельных системах и обсуждение причин их сходства и различий было бы украшением диссертации.

Текст диссертации написан ясным научным языком, однако, во второй главе наблюдается досадный сбой в нумерации рисунков и отсылок в тексте к этим рисункам. Так, после рисунка 2.10 снова появляются рисунки с номерами от 2.6 и далее.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Из проведенного анализа работы следует, что диссертация В. П. Дресвянского представляет собой полное и квалифицированно выполненное исследование в важной и актуальной области физики конденсированного состояния. Принимая во внимание, что основные результаты диссертации являются принципиально новыми, данную работу можно охарактеризовать как существенный вклад в развитие физики конденсированного состояния. **Достоверность и обоснованность** результатов определяется тщательно проработанной методикой изучения исследуемых процессов, согласием теоретических расчетов с результатами экспериментальных измерений, корреляцией результатов исследований, полученных различными экспериментальными методами. Основные результаты диссертации опубликованы в российских и международных научных журналах, доложены на ведущих российских и международных

научных конференциях, хорошо известны специалистам. Автореферат правильно передает содержание диссертации. По содержанию, объему, новизне, научной и практической значимости результатов, полученных в работе, диссертация 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, а В. П. Дресвянский, безусловно, **заслуживает присуждения** искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,  
ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии гетероструктур  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт  
физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН,  
д.ф.-м.н. (01.04.10 – физика полупроводников),  
старший научный сотрудник,

  
Тимур Сезгирович Шамирзаев

« 01 » марта 2021 г.

Тел. (383) 330-44-75, e-mail: tim@isp.nsc.ru

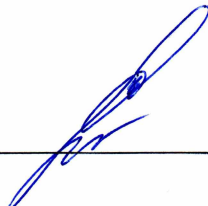
630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Подпись и фамилию сотрудника ИФП СО РАН  
Т.С. Шамирзаева удостоверяю

Ученый секретарь ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.



  
С.А. Аржанникова