

«Утверждаю»

Директор Института физики
им. Л.В. Киренского СО РАН
– обособленного подразделения
Федерального исследовательского центра
«Красноярский научный центр СО РАН».
доктор физ-мат. наук


« 15 » февраля 2021 г.

Д. А. Балашев



ОТЗЫВ

ведущей организации «Институт физики имени Л. В. Киренского» – обособленного подразделения Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН» на диссертационную работу Дресвянского Владимира Петровича «Дефектообразование при фемтосекундном лазерном возбуждении и свойства индуцированных центров окраски в диэлектрических кристаллах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния.

Работа посвящена исследованию процесса взаимодействия мощного лазерного излучения ближнего инфракрасного диапазона с широкозонными диэлектрическими кристаллами, а также исследованию центров окраски, формирующихся в этих материалах в указанных условиях.

Актуальность работы

Взаимодействие излучения высокой интенсивности, генерируемого мощными фемтосекундными лазерными системами с регенеративным и последующим одно- или многопроходным усилением, с широкозонными диэлектриками, представляет собой весьма сложный предмет исследования. Это обусловлено тем, что энергия кванта лазерного излучения существенно ниже ширины запрещённой зоны материала, и для инициирования взаимодействия требуется использование высоких интенсивностей излучения, вследствие чего физические процессы, сопровождающие указанное взаимодействие, являются

нелинейными. Сочетание нескольких нелинейных процессов требует высокой степени тщательности при анализе результатов взаимодействия излучения. С другой стороны, для успешного анализа требуется знание физических свойств материала, подвергаемого воздействию мощного излучения. В этой связи выполнение данного исследования именно в Иркутском научном центре является весьма логичным благодаря наличию огромного опыта и знаний, накопленных здесь при исследовании свойств монокристаллов фторида лития и их взаимодействия с жёстким рентгеновским излучением и излучением радиоактивных источников. Ограниченное количество исследовательских групп в мире способно выполнять такого рода исследования на достаточно высоком уровне не только в связи с недостатком опыта, но и в связи с необходимостью использования широкого круга научной аппаратуры для диагностики полученных образцов, в том числе, аппаратуры, использующей современные методы, например, конфокальную люминесцентную микроскопию. В исследованиях, выполненных в этой области другими научными группами, имеются нестыковки и, возможно, даже существенные ошибки, необходимость выявления и исправления которых придаёт данной работе дополнительную актуальность.

Задача исследования процесса лазерно-индуцированного дефектообразования в широкозонном диэлектрике под действием излучения с относительно низкой энергией фотона в силу самой своей постановки является чрезвычайно сложной. В указанных условиях следует ожидать, что процесс формирования дефектов будет сильно зависеть от интенсивности оптического излучения, и эта зависимость будет напоминать пороговую. Известно, что самофокусировка мощного излучения имеет хорошо установленный пороговый характер, и, если ограничиться рассуждением в рамках теории возмущений, то наступление самофокусировки и достаточно высокая скорость дефектообразования могут при соответствующем соотношении мнимой и действительной частей нелинейной восприимчивости соответствующего порядка наблюдаться при близких значениях интенсивности оптического излучения.

Если соответствующая нечётная гармоника оптического излучения ещё не попадает в зону проводимости, то следует ожидать, что действительная часть нелинейной восприимчивости будет больше, чем мнимая, и самофокусировка наступит раньше, чем эффективное дефектообразование. Как следует из предшествующих исследований, именно такая ситуация реализуется для исследуемого материала, и большинство исследований указанного явления выполнено в условиях самофокусировки. Ситуация становится ещё более интересной, если характерное время туннелирования электрона из валентной зоны в зону проводимости либо ионизационный континуум сравнимо с длительностью оптического импульса, и, следовательно, приближение теории возмущений не является достаточно точным. Из вышесказанного следует, что проведение исследований по теме диссертации, во-первых, представляет несомненный фундаментальный интерес, и, во-вторых, требует высокой степени тщательности как при планировании и проведении экспериментов, так и при их анализе.

Целью диссертационной работы Дресвянского В. П. является изучение процессов лазерно-индуцированного дефектообразования в широкозонных диэлектрических кристаллах в условиях самофокусировки и филаментации возбуждающего фемтосекундного излучения и исследование физических свойств одиночных люминесцирующих дефектов и их ансамблей, индуцированных в объеме кристаллической среды.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, двух приложений и библиографии. Общий объем диссертации 346 страниц, включая 118 рисунков. Библиография включает 366 наименований на 42 страницах. По структуре и объему диссертация В. П. Дресвянского соответствует требованиям Положения ВАК к оформлению диссертаций. Изложение подчинено решению основных задач.

Основные научные результаты работы и их новизна

Прежде всего, следует отметить, что столь многосторонний обширный комплекс исследований по данной тематике, выполненный на высочайшем техническом уровне и высоком уровне анализа результатов, мы встречаем впервые. Большой объём экспериментального материала по лазерному формированию центров окраски позволяет сформировать полную картину процессов в исследуемом кристалле под действием мощных фемтосекундных импульсов ближнего ИК излучения и после этого воздействия, а также установить как корреляцию наблюдаемых процессов с результатами, полученными ранее для исследуемого кристалла при нелазерном дефектообразовании, так и выявить специфику, присущую лазерно-индуцированному дефектообразованию. В частности, убедительно показано, что ключевую роль на начальном этапе взаимодействия излучения с исследуемым кристаллом играет мелкомасштабная самофокусировка излучения.

Примером указанной выше специфики, тщательно изученной в диссертационной работе, является влияние повышения температуры внутри филамента на процессы ассоциации первичных дефектов. Исследование этого влияния позволило детально описать специфику эволюции лазерно-индуцированных дефектов после одиночного лазерного импульса, определить времена существования F_2^+ центров и анионных вакансий в условиях лазерного воздействия, а также эволюцию кристалла при многократном импульсном воздействии. Показано также, что на финальной стадии лазерно-индуцированного дефектообразования в облучённом объёме кристалла формируются довольно крупные коллоидные наночастицы металлического лития.

Другой специфический для лазерно-индуцированного дефектообразования аспект, исследованный в работе, связан с анизотропией оптических и транспортных свойств кристалла. Анизотропия эффективной массы фото-возбуждённых носителей заряда учитывалось ещё акад. Келдышем, однако эксперименты, выполненные в рамках данной работы, выявили существенные

отличия в угловых зависимостях эффективности дефектообразования от угловых зависимостей эффективной массы. Эти отличия нашли убедительное объяснение в результате учёта анизотропии нелинейной восприимчивости третьего порядка кристалла фторида лития, ответственной за динамический эффект Керра и, следовательно, определяющей анизотропию порога самофокусировки. Таким образом, ещё раз подтверждена ключевая роль самофокусировки и показано, что анизотропия керровской нелинейности при лазерном дефектообразовании доминирует над анизотропией эффективной массы.

В процессе исследования свойств центров окраски, сформированных методом лазерно-индуцированного дефектообразования, была использована время-коррелированная пространственно-селективная спектроскопия одиночных люминесцирующих центров. Это, в сочетании с компьютерным моделированием квантовых траекторий центров окраски, позволило поднять на новый уровень знания о свойствах центров окраски в кристаллах фторида лития и фторида магния. В частности, получены данные о свойствах синглет-триплетных переходов в некоторых из этих центров. Данная методика имеет особую ценность в тех случаях, когда в спектрах люминесценции имеются перекрывающиеся линии от люминесцирующих центров с отличающимися частотами мерцания. В таком случае измерение времён жизни традиционным способом крайне затруднено, а с помощью использования время-коррелированной пространственно-селективной спектроскопии становится возможным их определение с высокой точностью.

С помощью методики регистрации квантовых траекторий в кристаллах фторида лития была также зарегистрирована фотопереориентация одиночных центров окраски некоторых типов. В частности установлено, что F_2 центр переориентируется только в триплетном состоянии, тогда как F_3^+ – в основном состоянии.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

Практическая значимость работы

В процессе выполнения диссертационной работы автором существенно развит ряд известных современных методов исследования, а также разработаны новые методы, эффективность которых продемонстрирована при изучении центров окраски во фториде лития, но также применимые для исследования весьма широкого круга объектов, прежде всего, содержащих одиночные центры люминесценции. Прежде всего это относится к сканирующей конфокальной люминесцентной микроскопии, сопряжённой с аналитическим аппаратом для квантовых траекторий в кубических кристаллах.

Кроме того, в процессе выполнения работы предложены и реализованы новые методики контроля пьедестала лазерного импульса, а также метод измерения пространственного распределения энергии, запасённой в кристалле в виде населённости термовысвечивающихся ловушек.

Весьма интересна также отработанная автором методика записи полноцветных изображений, основанная на лазерно-индуцированном дефектообразовании с последующей термообработкой.

Результаты работы целесообразно использовать в Институте спектроскопии РАН, Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова, Институте физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Институте сильноточной электроники СО РАН, Институте лазерной физики СО РАН и других институтах Российской академии наук в рамках проводимых там исследований, посвященных оптике центров окраски, а также оптике широкого класса твердотельных люминесцентных материалов.

Несмотря на общую положительную оценку работы, можно указать на некоторые недостатки, или, точнее, поставить вопросы по содержанию диссертации.

1) В некоторых фторидах, например, CaF_2 , при сопоставимых плотностях мощности фемтосекундных импульсов генерация суперконтинуума (ГСК) возможна в условиях фокусировки в объёмный образец. Наблюдались ли ГСК в условиях экспериментов, выполненных автором?

2) Утверждение о том, что толщина отдельных филаментов, а также оставляемых ими шпуров, много меньше длины волны накачки, требует объяснения и не является бесспорным, так как высокий показатель многофотонности n возбуждения среды предполагает преодоление дифракционного предела минимум в корень из n , а пороговый характер самофокусировки в сочетании с коагуляционными процессами способны обеспечить дополнительное уменьшение размера результирующего филамента (шпура).

3) Несмотря на непререкаемый авторитет акад. Келдыша, его теория содержит определённые приближения, и особую ценность имело бы обнаружение отклонений от неё, до сих пор, по большому счёту, не найденных. Возможно, вклады туннельного и многофотонного механизмов имеют разную зависимость от длины волны. В частности, для туннельного механизма вклад промежуточного резонанса может быть не столь существенным. Таким образом, интерес представляли бы: 1) вариации поведения облучаемого образца по мере накопления в нём центров окраски; 2) более подробный сравнительный анализ экспериментальных результатов по дефектообразованию, полученных на длинах волн 950 и 800 нм. Первая из этих длин волн попадает в точный 10-фотонный резонанс с экситонным состоянием, в то время как вторая отстроена от 8-фотонного резонанса на 0.6 эВ.

4) Имеется ограниченное количество замечаний к грамматике и стилистике текста.

Заключение

Отмеченные недостатки и сделанные замечания являются частными и не затрагивают основных результатов работы. Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, вносящую заметный вклад в развитие актуальных научных направлений, связанных с исследованием взаимодействия мощного излучения с твердотельными средами и спектроскопии твёрдого тела.

Автореферат и публикации по теме диссертации полностью отражают ее содержание.

Диссертация отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Владимир Петрович Дресвянский, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв обсужден на семинаре отдела оптики ИФ СО РАН (протокол № 8 от 10 февраля 2021 г.).

Руководитель семинара,
доктор физ.-мат. наук, академик РАН

В. Ф. Шабанов

Секретарь,
кандидат физ.-мат. наук

А. С. Александровский

Ведущая организация:

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИФ СО РАН).

660036, Российская федерация, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38.

Телефон: +7(391) 243-26-35

Адрес электронной почты: dir@iph.krasn.ru.

Руководитель семинара:

Шабанов Василий Филиппович, научный руководитель ФИЦ КНЦ СО РАН, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 — Оптика, академик РАН.