

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

*доктора физико-математических наук, профессора отделения материаловедения ТПУ Полисадовой Елены Федоровны на диссертацию Ананченко Дарьи Владимировны «Радиационно-индуцированные дефекты и люминесценция монокристаллов оксида алюминия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.*

### ***Актуальность темы диссертации***

Работа Д.В. Ананченко посвящена исследованию процессов образования радиационных дефектов в кристаллах оксида алюминия при облучении  $\beta$ -,  $\gamma$ -, УФ-излучением, потоками электронов, и установлению роли создаваемых дефектов в формировании парамагнитных и люминесцентных свойств исследуемых объектов. Актуальность исследования обусловлена как высокой практической значимостью выбранного объекта в области фотоники, в отраслях, где используется ионизирующее излучение, так и необходимостью развития представлений о процессах дефектообразования. Понимание таких процессов необходимо для прогнозирования и управления свойствами оптических материалов в условиях воздействия высокоэнергетического излучения, а также оптимизации их радиационно-оптических характеристик. Не смотря на то, что  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (корунд) находится под пристальным вниманием исследователей длительное время, на настоящий момент не сложилось однозначного представления о процессах переноса заряда с участием центров F-типа в монокристаллах оксида алюминия, не ясны модели протекания процессов термической ионизации возбужденных состояний F-центров. Необходимо углублять представления о создании агрегатных центров в монокристаллах  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , не только с помощью методов оптической спектроскопии, но и с использованием методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), что позволит получить достоверную информацию о природе радиационных дефектов, в том числе в термохимически окрашенных кристаллах. Исследование процессов, происходящих в оксиде алюминия перспективно для установления новых радиационных эффектов, с одной стороны, представляющих общенаучный интерес, с другой, практической стороны, будет полезно для совершенствования и создания новых типов приборов для детектирования ионизирующего излучения, генерации и преобразования электромагнитного излучения, будет являться стимулом развития новых технологий.

Таким образом, разрабатываемая Д.В. Ананченко тема диссертации, является актуальной, нацеленной на решение важных научных и практических

задач в области в области радиационной физики, фотоники и оптического материаловедения.

### ***Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации***

Положения и выводы диссертации базируются на основе массива экспериментальных данных, полученных на аттестованных образцах, посредством использования комплекса апробированных методик позволяющих исследовать оптико-люминесцентные, структурные свойства материалов. В обосновании научных положений используется системный подход, объединяющий расчётные и экспериментальные методы, анализ данных.

**Теоретическая значимость** результатов работы состоит в установлении связи образования парамагнитных радиационно-индуцированных центров, образуемых в термохимически окрашенном  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  после облучения высокими дозами ионизирующей радиации, с люминесценцией собственных дефектов в кристалле оксида алюминия. Установленные закономерности по термической стабильности радиационных дефектов в облученных монокристаллах  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  могут использоваться **в практике** для разработки физических принципов управления дефектной структурой и люминесцентными свойствами исследуемых кристаллов. Полученные результаты по корреляционным зависимостям поглощенной дозы излучения с люминесцентными и парамагнитными свойствами могут использоваться в люминесцентной и ЭПР-дозиметрии ионизирующих излучений. Данные о термической устойчивости и механизме отжига радиационных дефектов, образуемых в стехиометрических монокристаллах  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  под воздействием мощных импульсных ионных пучков с разной плотностью энергии, могут быть полезны при разработке радиационно-стойких диэлектрических материалов микроэлектроники.

### ***Достоверность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации***

Достоверность выводов и рекомендаций, приведенных в диссертации определяется аргументированностью, использованием взаимодополняющих методик исследований, корректным анализом погрешностей, соответствием результатов основным представлениям в области физики радиационно-стимулированных процессов.

Результаты диссертационного исследования хорошо апробированы. Основные результаты исследований изложены в 18 научных публикациях, из



них 8 статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и входящих в международные наукометрические базы Scopus и Web of science. Результаты были представлены и обсуждены на 10 Международных и всероссийских конференциях: Международная молодежная научная конференция "Физика. Технологии. Инновации" (г. Екатеринбург, 2016, 2017 гг.), Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС (г. Екатеринбург, 2017 г.), XV Международная конференция по люминесценции и лазерной физике (Иркутская обл., п. Аршан, 2016 г.), 18th International Conference on Solid State Dosimetry SSD 18 (Германия, г. Мюнхен, 2016 г.), Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials EURODIM'18 (Польша, г. Быдгощ, 2018 г.), 10th International Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionized Radiation (LUMDETR-2018) (Прага, 2018 г.), 20th International Conference on Radiation Effects in Insulators (REI-20) (Казахстан, г. Нур-Султан, 2019 г.), International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (Россия, г. Томск, 2018, 2020 гг.).

Все изложенное позволяет сделать заключение о достоверности положений, выносимых на защиту.

### *Характеристика структуры и содержания диссертации*

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и обозначений и списка литературы. Работа изложена на 157 страницах текста, содержит 8 таблиц, 73 рисунка. Список литературы включает 286 источников.

**Во введении** обоснована актуальность и проанализирована степень разработанности темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов работы, личном вкладе автора, публикациях, структуре и объеме диссертации. **В первой главе** рассмотрены физические основы эффектов, возникающие в диэлектриках при облучении ионизирующим излучением, механизмы образования в них точечных радиационных дефектов. Выявлена недостаточность сведений о процессах образования, природе и термической стабильности радиационно-индуцированных дефектов, образующихся в  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  при облучении ионными пучками. Приводятся сведения о структуре дефектов в анионной и катионной подрешетке монокристаллического  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , их оптико-люминесцентные свойства. Освещены способы формирования дефектов F- и F<sub>2</sub>- типа и методы их идентификации. Проанализированы имеющиеся сведения о результатах

исследований радиационно-индуцированных дефектов методом ЭПР в кристаллах  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Установлены некоторые пробелы в представлениях о парамагнитных свойствах термохимически окрашенных кристаллов  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  с высокой концентрацией кислородных вакансий. Рассмотрены имеющиеся представления о роли центров свечения F-типа в процессах термолюминесценции в монокристаллах  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . На основе проведенного обзора литературы сформулирована цель и поставлены задачи исследования. **Во второй главе** приведено описание исследуемых образцов, источников излучения, используемых для создания в них радиационно-индуцированных дефектов. Отдельно рассмотрены инструменты и расчетные методы, используемые для моделирования пробега ионов и температурных полей в  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  при облучении мощным импульсными ионными пучками  $\text{C}^+/\text{H}^+$ . **В третьей главе** представлены результаты комплексного экспериментального исследования спектров ЭПР, оптического поглощения и люминесцентных свойств термохимически окрашенных анион-дефектных монокристаллов  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , подвергнутых воздействию гамма-, бета-излучения, облучению импульсным электронным пучком и термооптической обработке. **Четвертая глава** посвящена исследованию радиационно-индуцированных дефектов, образующихся в стехиометрических монокристаллах  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  при воздействии мощного импульсного пучка ионов  $\text{C}^+/\text{H}^+$  (300 кэВ) с плотностью энергии от 0,4 до 2,0 Дж/см<sup>2</sup>. В **пятой главе** изложены результаты получения новых экспериментальных доказательств существования процесса термической ионизации возбужденных состояний F-центров путем исследования эффекта разгорания термолюминесценции.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы исследований.

Структура диссертации целостна и логична, поставленные задачи в работе полностью решены.

Следует отметить наиболее важные результаты, полученные в работе:

- Доказано, что при облучении бета-, гамма-источником, импульсным электронным пучком (130 кэВ) и термооптической обработке при 573–773 К в кристаллах  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  образуются идентичные парамагнитные центры с  $g=2,008$ .

- Установлено, что с ростом дозы облучения концентрация центров с  $g=2,008$  растет, отжиг происходит в интервале температур 773–973 К.

- Уменьшение интегральной интенсивности линии ЭПР с  $g = 2,008$  в диапазоне температур 773–973 К. сопровождается ростом интенсивности фотолюминесценции одиночных F- и  $\text{F}^+$  -центров, с одновременным уменьшением фотолюминесценции агрегатных центров  $\text{F}_2$ -типа, что связано с разрушением агрегатного дефекта  $\text{F}_2$ -типа и с конверсией зарядового



состояния парамагнитного центра в результате высвобождения носителей заряда из глубоких ловушек.

- Облучение импульсным ионным пучком  $C^+/H^+$  с энергией 300 кэВ приводит к образованию в монокристаллах  $\alpha-Al_2O_3$  одиночных F- и  $F^+$  - центров, и агрегатных центров  $F_2$ -типа. Обнаружено появление полосы свечения при 2,85 эВ неуставленной природы с максимумом возбуждения при 4,3 эВ. Ее происхождение может быть связано с образованием агрегатных  $F_2^{2+}$ -центров, либо более сложных вакансионно-примесных комплексов.

- Доказано, что эффект разгорания термолюминесценции в термохимически окрашенном  $\alpha-Al_2O_3$  в пике при 573 К связано с термической ионизацией возбужденных состояний F-центров.

### *Научная новизна исследования*

1. Впервые обнаружено, что облучение бета-источником  $^{90}Sr/^{90}Y$ , импульсным электронным пучком (130 кэВ), а также термооптическая обработка при температурах 573–773 К термохимически окрашенных кристаллов  $\alpha-Al_2O_3$  приводят к образованию в них парамагнитных центров идентичной природы с  $g = 2,008$ . (п.4 Паспорта специальности ВАК).

2. В облученных термохимически окрашенных монокристаллах  $\alpha-Al_2O_3$  впервые обнаружена прямая корреляция интенсивности линии ЭПР с  $g = 2,008$  и полос оптического поглощения и фотолуминесценции агрегатных центров  $F_2$ -типа, а также обратная корреляция интенсивности указанной линии ЭПР с фотолуминесценцией и оптическим поглощением одиночных центров F-типа. (п.4 Паспорта специальности ВАК).

3. В термохимически окрашенных монокристаллах  $\alpha-Al_2O_3$  впервые исследована термическая стабильность радиационно-индуцированных парамагнитных центров с  $g = 2,008$ . Установлено, что отжиг данных дефектов происходит в интервале температур 773–973 К. (п.4 Паспорта специальности ВАК).

4. На основе комплексного исследования оптических и люминесцентных свойств впервые доказано, что облучение импульсными пучками ионов  $C^+/H^+$  (энергия 300 кэВ) приводит к образованию в монокристаллах  $\alpha-Al_2O_3$  одиночных F- и  $F^+$  -центров, агрегатных центров  $F_2$ -типа, а также дефектов неуставленной природы, ответственных за полосу фотолуминесценции при 2,85 эВ с максимумом возбуждения при 4,3 эВ. (п.4 Паспорта специальности ВАК).

5. Впервые установлено, что  $F^+$  -центры в монокристаллах оксида алюминия, облученных ионными пучками  $C^+/H^+$ , теряют стабильность при

$T=723-1123$  К в результате их рекомбинации с подвижными межузельными атомами кислорода  $O_i$ . (п.7 Паспорта специальности ВАК).

6. На основе результатов измерений спектрально-разрешенной термолюминесценции доказана взаимосвязь эффекта разгорания ТЛ в пике при 573 К с термической ионизацией возбужденных состояний F-центров в термохимически окрашенном  $\alpha$ -  $Al_2O_3$ . (п.4 Паспорта специальности ВАК).

### *Замечания по диссертации*

1. Не ясно, при каких условиях происходила термооптическая обработка кристаллов при облучении УФ-излучением. Приведена лишь мощность используемого источника. На какую спектральную область приходится максимум спектра излучения УФ-лампы, использовались ли фильтры? Какова была облученность кристаллов в процессе эксперимента и как она контролировалась?
2. При облучении электронным пучком с использованием ускорителя РАДАН-ЭКСПЕРТ взят небольшой диапазон доз (15 и 20 кГр), что не позволяет сопоставить результаты с другими условиями облучения исследуемых кристаллов.
3. В тексте диссертации используются неопределенные термины «заметное разгорание», «менее выраженное разгорание».

### *Заключение*

Диссертация Ананченко Дарьи Владимировны на тему «Радиационно-индуцированные дефекты и люминесценция монокристаллов оксида алюминия», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной в рамках актуального направления физики конденсированного состояния. В работе получены новые научные результаты, имеющие высокую научную и практическую значимость для радиационной физики, фотоники и оптического материаловедения.

Диссертация и автореферат соответствуют пунктам Паспорта специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния (отрасль науки – физико-математические науки): 4. Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ.; 7. Теоретические расчеты и экспериментальные измерения электронной зонной структуры, динамики решётки и кристаллической структуры твердых тел.



Автореферат диссертации Д. В. Ананченко полностью соответствует тексту диссертации, отражает ее основное содержание, имеет логически грамотное построение и последовательность изложения результатов исследования.

По результатам диссертационного исследования автором опубликовано достаточное количество научных работ. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Ананченко Дарья Владимировна, заслуживает присуждения степени соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

**Официальный оппонент**

профессор отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»

Полисадова Елена Федоровна

**Контактная информация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,

Адрес организации: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30

Тел: +7(3822)606310

Адрес электронной почты: [elp@tpu.ru](mailto:elp@tpu.ru),

«16» сентября 2024 г.

Подпись Полисадовой Елены Федоровны заверяю

И.о. Ученого секретаря ТПУ

\_\_\_\_ В.Д. Новикова

