

На правах рукописи



СПИРИДОНОВ Дмитрий Михайлович

СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ОПТИЧЕСКИ И ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
В ОБЛУЧЕННЫХ СТРУКТУРАХ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Физические методы и приборы контроля качества» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор
Вайнштейн Илья Александрович

Официальные оппоненты: **Раджабов Евгений Александрович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки «Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской академии наук»,
заведующий лабораторией физики монокристаллов;

Спирина Альфия Виликовна,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт электрофизики Уральского отделения
Российской академии наук, научный сотрудник лабо-
ратории квантовой электроники;

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образова-
тельное учреждение высшего профессионального
образования «Сибирский федеральный университет»

Защита состоится 27 марта 2015 года в 15 ч 00 мин на заседании диссертаци-
онного совета Д 212.285.02 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002,
г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (Зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ
ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина» <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ищенко Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Благодаря сочетанию уникальных электрофизических и оптических характеристик структурные модификации AlN находят широкое применение в качестве различных функциональных сред современной микро-, нано- и оптоэлектроники. Относясь к классу широкозонных полупроводников, нитрид алюминия с вюрцитной кристаллической решеткой обладает запрещенной зоной 6.2 эВ. Данный факт делает его объектом интенсивных исследований в качестве легированной твердотельной матрицы для высокочувствительных детекторов и эффективных эмиттеров когерентного и некогерентного фотонного излучения ультрафиолетового диапазона. При этом разнообразие точечных нарушений анионного и катионного типов в структурах AlN, многообразие механизмов собственного и примесного дефектообразования, неоднозначность идентификации природы оптически активных центров являются серьезным вызовом для исследователей, специализирующихся в решении фундаментальных задач физики конденсированного состояния.

В последние годы актуальной областью применения материалов на основе нитрида алюминия стала твердотельная дозиметрия. В частности, в работах В. Berzina, L. Trinkler (1998–2009) показано, что при воздействии УФ-, β - и γ -излучения керамика AlN–Y₂O₃ демонстрирует характеристики, которые не уступают, а в ряде случаев превосходят показатели хорошо известных термолюминесцентных дозиметрических материалов – LiF:Mg,Ti; LiF:Mg,Cu,P и α -Al₂O₃. В настоящее время изучены люминесцентные свойства AlN в различных структурных состояниях (керамика, пленки, микрокристаллы, порошок, наноструктуры) и при воздействии различных видов корпускулярного и фотонного излучений. В то же время объемные монокристаллы AlN начали синтезировать сравнительно недавно – Е.Н. Мохов, Ю.Н. Макаров и др. (2005) и М. Bickermann et al. (2004). На сегодня некоторые свойства таких систем, включая особенности электронного строения и природу основных точечных дефектов, были исследованы различными теоретическими и экспериментальными методами (П.Г. Баранов, В.А. Солтамов, 2009–2012). В этой связи представляется важным анализ фундаментальных закономерностей люминесцентного отклика нитридных структур на радиационное воздействие в рамках рассмотрения монокристаллов AlN в качестве реальных твердотельных моделей.

Учитывая известные результаты исследований оптических свойств широкого спектра материалов на основе нитрида алюминия различной размерности и примесного состава, можно сформулировать ряд вопросов, которые остаются

нерешенными: недостаточно изучены спектрально-кинетические закономерности процессов оптически и термостимулированной люминесценции (ОСЛ и ТЛ соответственно), необходимые для понимания, формулирования и решения фундаментальных задач твердотельной дозиметрии; окончательно не идентифицированы типы оптически активных центров, которые формируют люминесцентный отклик на воздействие ионизирующих излучений, включая стадии запасаения и высвобождения энергии; необходима формулировка обоснованных зонных моделей для качественного и количественного описания механизмов поведения метастабильных уровней захвата и рекомбинации носителей заряда в процессах оптически и термостимулированного свечения. Изучение указанных проблем является актуальной задачей физики конденсированного состояния, поскольку позволит расширить имеющиеся представления о роли дефектов кристаллической решетки в формировании оптических и люминесцентных свойств облученных нитридных материалов. Полученные данные будут полезны также с точки зрения практического использования, так как предоставят основу для направленной разработки новых ТЛ-детекторов ионизирующих излучений с улучшенными показателями. С учетом состояния научных исследований в области радиационно-стимулированных процессов в AlN были сформулированы цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Цель и задачи исследования

Целью работы является анализ спектрально-кинетических характеристик радиационно-стимулированного поведения и количественная оценка энергетических параметров оптически активных дефектных центров в облученных объемных монокристаллах и микродисперсных порошках AlN.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать оптические и люминесцентные свойства необлученных объемных монокристаллов и микродисперсных порошков AlN.
2. Проанализировать особенности кинетики ТЛ и ОСЛ процессов в нитриде алюминия после воздействия фотонным (УФ-) и корпускулярным (β -) излучением.
3. Установить природу центров свечения, ответственных за люминесценцию в исходных и облученных структурах AlN при оптической и термической стимуляции.
4. Проанализировать дозовые зависимости ТЛ и ОСЛ параметров для объемных монокристаллов и микропорошков AlN, сделать практические рекомендации для возможных дозиметрических применений.

Научная новизна:

1. Впервые для монокристаллов AlN, подвергнутых воздействию УФ- и

β -излучения, получены количественные данные о параметрах кинетики ТЛ и ОСЛ процессов и энергии активации центров захвата носителей заряда.

2. Показано, что активными люминесцирующими центрами в облученных специально нелегированных объемных монокристаллах нитрида алюминия при протекании процессов оптически и термостимулированного свечения являются технологические кислородные примеси и образующиеся на их основе комплексы с участием катионных и анионных вакансий. Предложена зонная диаграмма, описывающая особенности наблюдаемой ТЛ.

3. Впервые на основе анализа компонент затухания оптически стимулированной люминесценции выполнена оценка сечений фотоионизации кислород-связанных центров в структурах нитрида алюминия.

4. Впервые для объемных монокристаллов и микродисперсных порошков AlN установлены количественные характеристики дозовых зависимостей ТЛ и ОСЛ параметров после воздействия β - и УФ-излучением.

Защищаемые положения:

1. В результате β -облучения в объемных монокристаллах AlN при комнатной температуре возникает интенсивное послесвечение с максимумом 3.4 эВ, кинетические особенности которого характеризуются процессами термостимулированного опустошения двух типов ловушек носителей заряда.

2. Кинетика оптически стимулированной люминесценции при комнатной температуре в β -облученных монокристаллах AlN определяется суперпозицией процессов экспоненциального затухания с участием двух активных центров, для которых были выполнены количественные оценки соответствующих сечений фотоионизации.

3. Механизм термолюминесценции в УФ-облученных объемных монокристаллах AlN обусловлен процессами излучательного возврата ионизированных комплексов $(V_{Al}-O_N)^-$ в исходное состояние $(V_{Al}-O_N)^{2-}$ при термическом опустошении ловушек, образованных азотными вакансиями V_N .

4. Дозовые зависимости интенсивности и светосуммы ТЛ в полосе свечения 3.4 эВ монокристаллов AlN при β -облучении изменяются линейно в диапазоне 10^{-5} –4 Гр.

Практическая значимость работы:

1. Продемонстрирована возможность определения поглощенной дозы β -излучения в твердотельном термолюминесцентном детекторе на основе монокристалла нитрида алюминия. По результатам проведенных исследований зарегистрированы 2 патента РФ на изобретение.

2. Предложен способ использования ОСЛ-сигнала для корректной оценки поглощенной дозы ультрафиолетового или β -излучения в детекторе на основе

монокристалла AlN с учетом возникающего при облучении послесвечения. По результатам проведенных исследований зарегистрирован 1 патент РФ на изобретение.

3. Проведено сравнение характеристик объемных монокристаллов AlN с техническими параметрами коммерческих ТЛ-детекторов. Показано, что материал не уступает аналогам за счет своих физических и химических свойств, высокой чувствительности к различным видам ионизирующего излучения и линейности дозовых характеристик в широком диапазоне рабочих доз. Высокий суточный фединг ограничивает применение AlN для задач персональной дозиметрии в качестве накопительных детекторных элементов.

Личный вклад автора. Модернизация измерительного комплекса для изучения процессов стимулированной люминесценции в твердых телах осуществлена совместно с доцентом кафедры «Физические методы и приборы контроля качества» ФТИ УрФУ, канд. физ.-мат. наук А.С. Вохминцевым. Аттестация образцов методами Рамановской спектроскопии выполнена старшим научным сотрудником центра коллективного пользования «Состав вещества» Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН, канд. техн. наук Э.Г. Вовкотруб. Рентгеноструктурный анализ проведен доцентом кафедры «Теоретическая физика и прикладная математика» ФТИ УрФУ, канд. физ.-мат. наук А.В. Чукиным. Исследования микродисперсного порошка AlN методом растровой электронной микроскопии выполнены совместно с доцентом кафедры «Термообработка и физика металлов» ИММТ УрФУ, канд. техн. наук М.С. Карабаналовым.

Определение цели и задач диссертационной работы, обоснование природы центров наблюдаемого свечения, формулировка выводов и защищаемых положений выполнены совместно с научным руководителем. Автором проведены измерения оптического поглощения, катодо-, фото-, термо- и оптически стимулированной люминесценции, для которых выполнены обработка и анализ результатов эксперимента, расчет кинетических параметров и интерпретация полученных данных.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены и обсуждены на следующих конференциях: XIV Международная конференция по люминесценции и лазерной физике (Иркутск, 2014); XIII Международная конференция по люминесценции и лазерной физике (Иркутск, 2012); 5-я школа «Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и nanoиндустрии» (Черноголовка, 2012); VIII Международная конференция «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, Казахстан, 2011); 11–14-я Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екате-

ринбург, 2010–2013); 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 2011); 22nd European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes and Nitrides (Germany, Garmisch-Partenkirchen, 2011); III Международный форум по нанотехнологиям Rusnanotech (Москва, 2010); II Международная научная конференция «Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь-Россия-Украина» (Киев, 2010); 16- и 17-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Екатеринбург, 2009 и 2011).

Работа выполнена на кафедре «Физические методы и приборы контроля качества» ФТИ УрФУ при поддержке 2 грантов Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и 3 молодежных грантов Программы развития УрФУ «Проведение научных исследований аспирантами и магистрантами».

Публикации. Результаты исследований изложены в 6 статьях в рецензируемых журналах согласно перечням ВАК разных лет, 3 статьях сборников трудов международных конференций, 15 тезисах докладов международных и российских конференций и 3 патентах РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем – 156 страниц текста, включая 50 рисунков, 28 таблиц и список литературы, содержащий 130 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, определены научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, представлены защищаемые положения и апробация работы.

В первой главе описаны виды изучаемых в мире структур на основе нитрида алюминия, приведены известные параметры кристаллической решетки вюрцита, которая является энергетически более выгодной для рассматриваемого материала, проанализированы основные физико-химические свойства. С использованием независимых научных источников систематизированы данные по основным типам дефектов собственной и примесной природы, ответственных за люминесцентные характеристики AlN. Проанализированы результаты работ, посвященных исследованию оптических свойств методами абсорбционной спектроскопии, катодо-, термо- и фотолюминесценции нитрида алюминия в различных структурных состояниях (керамика, пленки, монокристаллы, порошок, наноструктуры) и при воздействии различными видами корпускулярного и фотонного излучений.

На основе проведенного литературного обзора определены задачи исследований, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

Во второй главе представлены характеристики исследуемых образцов нитрида алюминия. Базовыми объектами являлись номинально чистые объемные монокристаллы AlN (ООО «Нитридные кристаллы», Ю.Н. Макаров) с содержанием примесей кислорода 10^{18} – 10^{19} см⁻³, представляющие собой диски диаметром 15 мм, толщиной 0.25–0.50 мм, массой 0.13–0.18 г, с качеством обработки поверхности epi-ready. Для исследований и оценки параметров оптического поглощения, катодолюминесценции и термолюминесценции было отобрано 13 образцов. Образец S1 как один из наиболее чувствительных к β -излучению был выбран для большей части последующих измерений: спектрально-температурных характеристик, параметров ФЛ и ОСЛ, дозовых зависимостей.

Для сравнительного анализа часть исследований была проведена для микродисперсного порошка AlN (предоставлены кафедрой «Редкие металлы и наноматериалы» ФТИ УрФУ, д-р техн. наук А.Р. Бекетов). Распределение частиц по размеру данных образцов подчиняется логарифмически нормальному закону. При этом максимум распределения характеризуется диаметром 0.76 мкм.

Анализ структуры исследуемых образцов проводился методами Рамановской спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Спектры комбинационного рассеяния были получены на микроскопе-спектрометре Renishaw 1000 (Англия). Рентгеноструктурный анализ был выполнен на дифрактометре XPert PRO MPD фирмы Panalytical (Нидерланды). Анализ дифрактограмм показал, что для обоих типов исследуемых структур AlN характерна пространственная группа $R\bar{3}m$. Параметры кристаллической решетки для монокристаллов $a = 3.1117$ Å и $c = 4.9827$ Å, для порошков – $a = 3.1097$ Å и $c = 4.9769$ Å. Обнаружено, что в порошках AlN присутствует дополнительная фаза Al₂O₃ (3 %).

В главе также приведены технические характеристики и описаны принципы работы используемого экспериментального оборудования. Получены необходимые данные для калибровки возбуждающего тракта измерительного комплекса, представленного лазером 660 нм и дейтериевой лампой ДДС-30. Описаны методики проведенных исследований: измерения оптического поглощения; получения спектрально-температурных зависимостей; регистрации спектров свечения и возбуждения при характеристизации процессов термо- и фотолюминесценции; построения дозовых зависимостей при термической и оптической стимуляции β -облученных образцов AlN в диапазоне доз от 21.5 мкГр до 9.6 Гр.

В таблице 1 представлена обобщенная схема режимов измерений, проведенных для порошка и объемных монокристаллов AlN после различных видов

Таблица 1 – Режимы измерений облученных образцов АІN

Образец	Вид излучения	Источник излучения	Доза D	Время хранения в темноте τ	Регистрация свечения	Режим стимуляции
Монокристаллы	β -облучение	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 32 мГр/мин	$D = \text{const}$	$\tau = 5$ мин	ТЛ после ОСЛ	$r = 2$ К/с
				$\tau = 5$ мин – 3 сут	ОСЛ	СW
		$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 43 мкГр/мин	$D = f(t)$	$\tau = 0$ с	ТЛ	$r = 2$ К/с
Микропорошок	УФ-облучение	ДДС-30	$D = \text{const}$	$\tau = 30$ с – 14 ч	ОСЛ	$T = 300$ К
						$T = 300$ К
	β -облучение	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 32 мГр/мин	$D = f(t)$	$\tau = 0$ с	ТЛ после ОСЛ	СW
						$r = 2$ К/с
				$\tau = 5$ мин	ОСЛ	СW

радиационного воздействия. Показано, какие параметры эксперимента варьировались. Кроме того, в главе 2 представлены расчетные способы оценки геометрических параметров экспериментальных кривых на основе существующих модельных представлений. Рассмотрен формализм для вычисления параметров послесвечения, возникающего при облучении образцов. Представлены функции для аппроксимации экспериментальных данных ТЛ, ФЛ, КЛ и ОСЛ. Приведен формализм для количественного анализа характеристик наблюдаемых термоактивационных процессов в рамках уравнения кинетики общего порядка:

$$I(T) = s'' \cdot n_o \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \cdot \left[1 + (b-1) \cdot \frac{s''}{r} \cdot \int_{T_o}^T \exp\left(-\frac{E_a}{k\theta}\right) \cdot d\theta\right]^{\frac{b}{b-1}}, \quad (1)$$

где s'' – эффективный частотный фактор, с^{-1} ; n_o – начальная концентрация захваченных носителей заряда на ловушках, м^{-3} ; E_a – энергия активации, эВ; k – постоянная Больцмана, эВ/К; b – порядок кинетики; r – скорость линейного нагрева, К/с; T_o – начальная температура, К.

Представлена формула для оценки сечений фотоионизации соответствующих центров захвата носителей заряда с учетом анализа кривых затухания интенсивности ОСЛ-сигнала в облученных материалах:

$$\sigma = \frac{1}{\tau_{\text{ОСЛ}} \cdot \Phi}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{ОСЛ}}$ – постоянная времени затухания ОСЛ-сигнала, с; Φ – интенсивность стимулирующего излучения, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

В завершении по итогам выполненных работ сформулированы основные выводы по главе 2.

Третья глава посвящена исследованию оптических и люминесцентных свойств объемных монокристаллов AlN в исходном (до облучения) состоянии. Анализируются параметры спектров оптического поглощения, катодо- и фотолюминесценции образцов. Проводится сравнение результатов с известными данными для различных структурных модификаций исследуемого материала.

На рисунке 1, а приведены примеры спектров КЛ в объемных монокристаллах AlN. Зависимости в диапазоне энергий 1.65–3.54 эВ аппроксимированы тремя компонентами гауссовой формы с максимумами свечения при энергиях 2.15, 2.71 и 3.19 эВ. Полоса 2.15 эВ возникает за счет переходов электронов из валентной зоны на акцепторные уровни дефектов, образованных вакансиями алюминия V_{Al} . Соотношение между интенсивностями полос доминирующих пиков меняется от образца к образцу $I_{2.7}/I_{3.2} = 0.6 \div 22$. Полученные данные характеризуют зависимость катодолюминесцентных свойств монокристаллов AlN от условий синтеза.

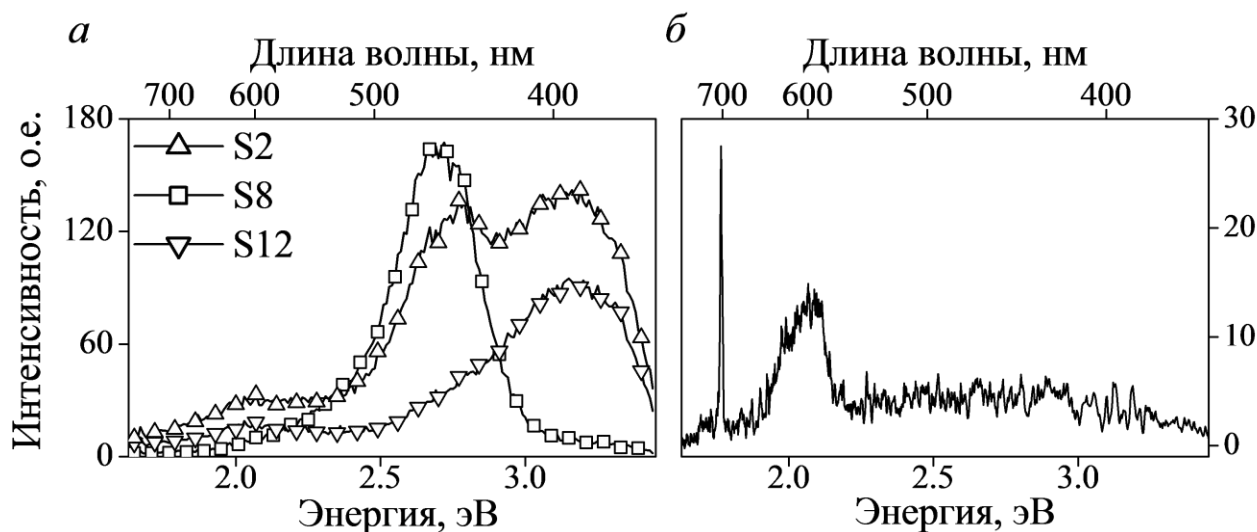


Рисунок 1 – Спектры катодоллюминесценции:

a – в монокристаллах AlN (номера образцов указаны); *б* – в порошке AlN

На рисунке 1, *б* представлен спектр катодоллюминесценция, зарегистрированный в порошке AlN в аналогичных условиях, что и для монокристаллов. В полученной зависимости четко выделяются две полосы с максимумами 1.77 и 2.06 эВ. При этом, в отличие от монокристаллов, в порошке компонента 2.06 эВ является доминирующей. Узкий интенсивный пик 1.77 эВ может быть отнесен к внутрицентровым переходам ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ (R-линии) дефектов Cr^{3+} .

На рисунке 2 показана трехмерная ФЛ зависимость для объемных монокристаллов нитрида алюминия в координатах «длина волны возбуждения $\lambda_{\text{возб}}$ – длина волны эмиссии $\lambda_{\text{эм}}$ – интенсивность». Видно, что полученная характеристика состоит из нескольких неэлементарных пиков. В рассматриваемом спектральном диапазоне максимальная интенсивность свечения достигается в полосе 2.76 эВ (450 нм) при возбуждении светом 4.49 эВ (276 нм). Два менее интенсивных пика наблюдаются при воздействии светом с энергией 5.39 эВ (230 нм) и 5.85 эВ (212 нм). При этом максимум люминесценции и в том и в другом случае регистрируется в области 3.44 эВ (360 нм).

Анализ показал (рисунок 3), что в спектре ФЛ в диапазоне 300–600 нм могут быть выделены 4 гауссовы компоненты: 2.61, 2.76, 3.18 и 3.44 эВ. Видно, что полосы 2.76 и 3.18 эВ аналогичны полученным КЛ полосам 2.71 и 3.19 эВ соответственно. Согласно литературным источникам, наблюдаемые процессы обусловлены рекомбинацией донорно-акцепторных пар, уровни которых образованы кислородом и связанным с ним комплексами. Полосы 2.61 и 2.76 эВ относят к сложным дефектам типа $V_{Al}-2O_N$. При этом свечение 2.61 эВ возникает тогда, когда один атом кислорода находится в первой координационной сфере относительно вакансии алюминия, а другой – во второй. В то же время эмиссия 2.76 эВ характерна для случая, когда оба атома кислорода находятся в

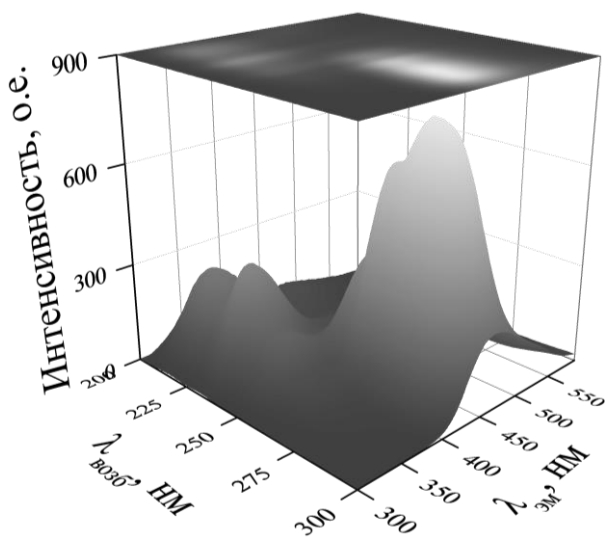


Рисунок 2 – Фотолюминесценция в объемном монокристалле AlN

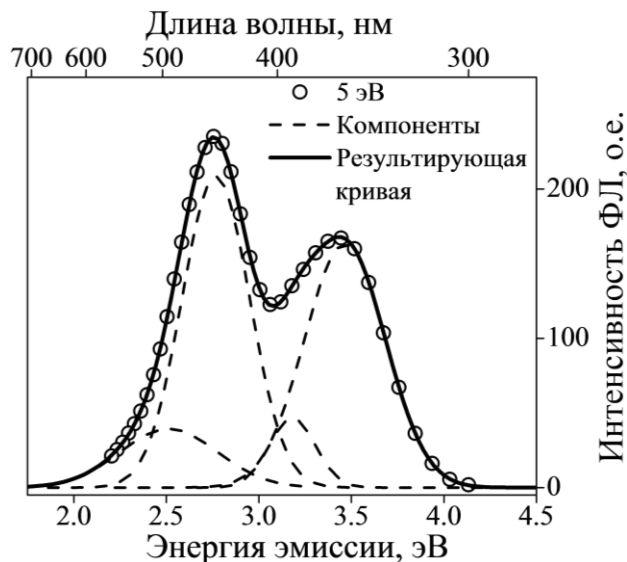


Рисунок 3 – Разложение на компоненты спектра свечения ФЛ

ближайшей координационной сфере к V_{Al} . Компоненты 3.18 и 3.44 эВ могут быть связаны с комплексами типа $(V_{Al}-O_N)$. В данном случае свечение 3.18 эВ обусловлено наличием примесного атома кислорода в первой координационной сфере относительно вакансии алюминия, полоса 3.44 эВ – наличием O_N во второй координационной сфере.

По итогам проведенных работ в конце главы 3 сформулированы выводы.

Четвертая глава посвящена анализу и количественной оценке спектрально-кинетических параметров процессов, протекающих в объемных монокристаллах и порошках нитрида алюминия после β -облучения, а также воздействия фотонами УФ-диапазона.

На рисунке 4 представлена кривая регистрируемого в монокристаллах AlN послесвечения (ПС), полученная сразу после β -облучения дозой 16 мГр. Обнаружено, что интенсивность сигнала в течение первой минуты уменьшается на 40 %, за 60 мин – на 95 %. Установлено, что кривая ПС является суперпозицией двух экспоненциальных компонент $C_{ПС}^1$ и $C_{ПС}^2$. Пунктирными линиями на рисунке 4 приведены результаты разложения. Рассчитаны постоянные времени затухания – $\tau_{ПС}^1 = 59$ с и $\tau_{ПС}^2 = 606$ с.

На примере полученных при комнатной температуре спектров ПС (вставка на рисунке 4) видно, что люминесценция регистрируется в спектральном диапазоне 3.0–4.0 эВ. В отличие от КЛ и ФЛ в данном случае можно выделить лишь одну гауссову компоненту, максимум свечения которой наблюдается при энергии (3.43 ± 0.01) эВ.

При дополнительной лазерной стимуляции ($\lambda = 660$ нм, $\Phi = 6.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) β -облученных образцов AlN наблюдается затухающий ОСЛ сигнал, который

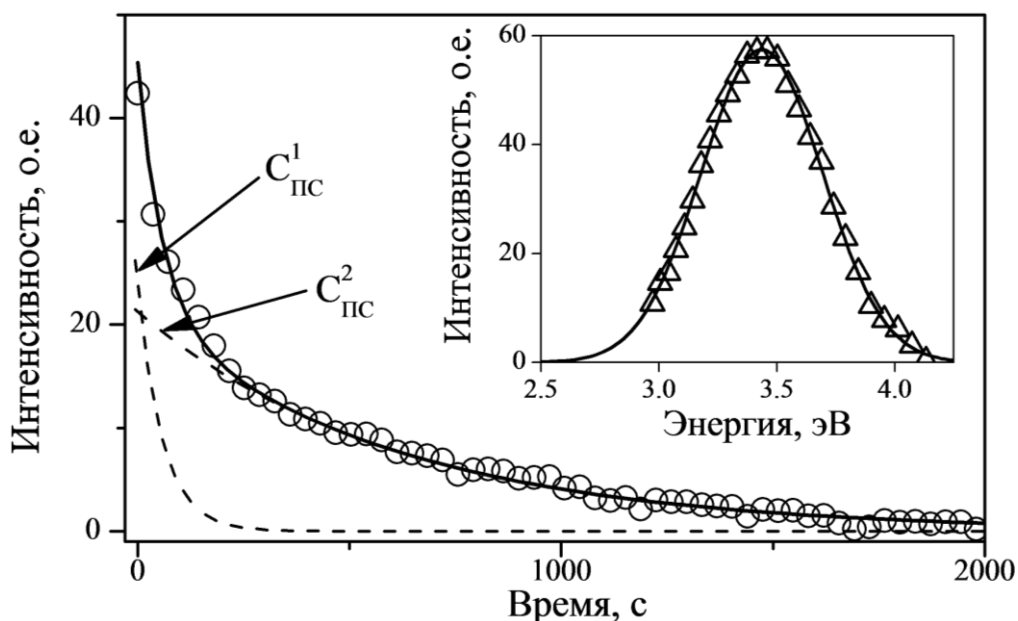


Рисунок 4 – Послесвечение в AlN после β -облучения: вставка – спектр ПС; символы – экспериментальные данные; сплошная линия – аппроксимирующая кривая; пунктирные линии – расчетные экспоненциальные компоненты ($C_{\text{ПС}}^1$ и $C_{\text{ПС}}^2$)

имеет комплексный характер (рисунок 5). Определены значения постоянных времени затухания быстрой ($\tau_{\text{ОСЛ}}^1 \approx 28.4$ с) и медленной ($\tau_{\text{ОСЛ}}^2 \approx 234$ с) компонент. На основе предположения, что каждая из обнаруженных компонент затухания ОСЛ-сигнала независима и связана с определенным типом центров захвата, по формуле (2) выполнена оценка значений для сечений фотоионизации ловушек носителей заряда – $\sigma_1 = 5.3 \cdot 10^{-19}$ и $\sigma_2 = 6.3 \cdot 10^{-20}$ см².

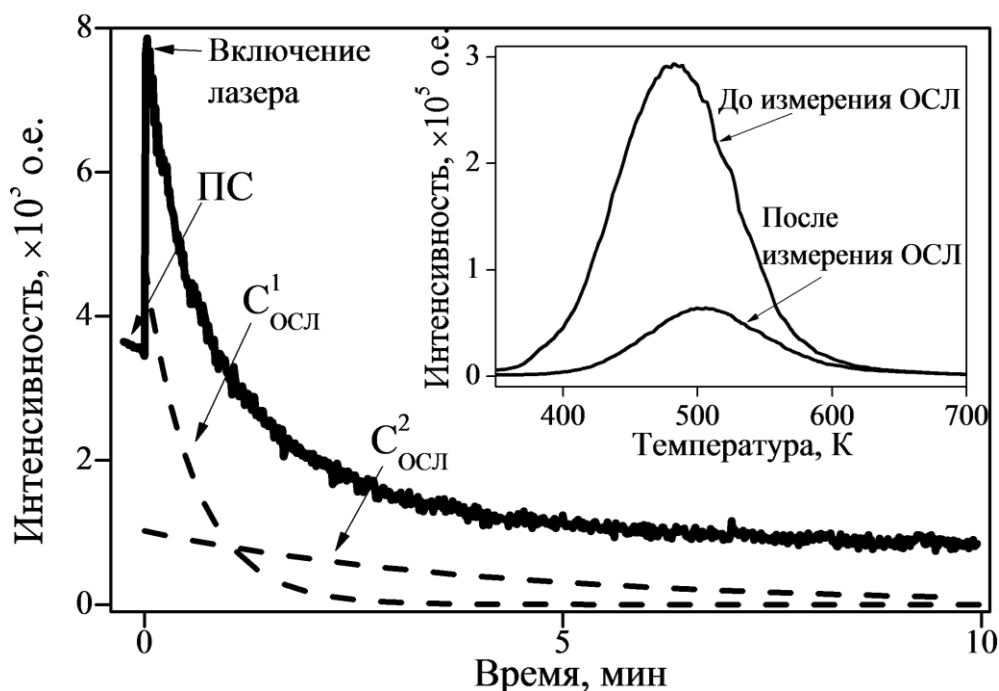


Рисунок 5 – Аппроксимация ОСЛ кривой для β -облученного монокристалла AlN при $D = 42.7$ мГр: сплошная линия – экспериментальные данные; пунктирные линии – расчетные экспоненциальные компоненты; вставка – кривые ТЛ до и после измерения ОСЛ для $D = 64$ мГр

Результаты измерения ТЛ отклика до и после регистрации ОСЛ представлены во вставке на рисунке 5. Обнаружено, что при оптической стимуляции у полученных кривых светосумма (S) различается в 4.3 раза, максимальная интенсивность ($I_{\text{макс}}$) – в 4.6 раз и положение максимума ($T_{\text{макс}}$) смещается в высокотемпературную область на 23 К. Полуширина (ω_T) и форм-фактор (μ_g) пиков не меняются. Сделан вывод, что при лазерной стимуляции облученных образцов доминирующим является оптическое опустошение ловушек, ответственных за формирование низкотемпературной части ТЛ пика.

Далее в рамках настоящей работы были исследованы спектрально-температурные зависимости интенсивности ТЛ после облучения фотонами ультрафиолетового диапазона. Результаты приведены на рисунке 6. Показано, что максимальная интенсивность свечения в исследуемых образцах наблюдается при температуре 470–480 К. На рисунке 6, *а* представлена зависимость ТЛ от длины волны возбуждения (4.13–6.20 эВ). Видно, что наиболее эффективное заполнение ловушек происходит при энергии ≈ 5 эВ. На рисунке 6, *б* продемонстрирован спектральный состав термостимулированного свечения в монокристаллах AlN после облучения нефилтрованным светом дейтериевой лампы ДДС-30 в течение 2 мин. Показано, что в исследуемом спектральном диапазоне регистрируются два пика свечения. Максимальная интенсивность наблюдается для $E_{\text{макс}} = 3.44$ эВ. Менее интенсивный пик возникает при $E < 2.48$ эВ.

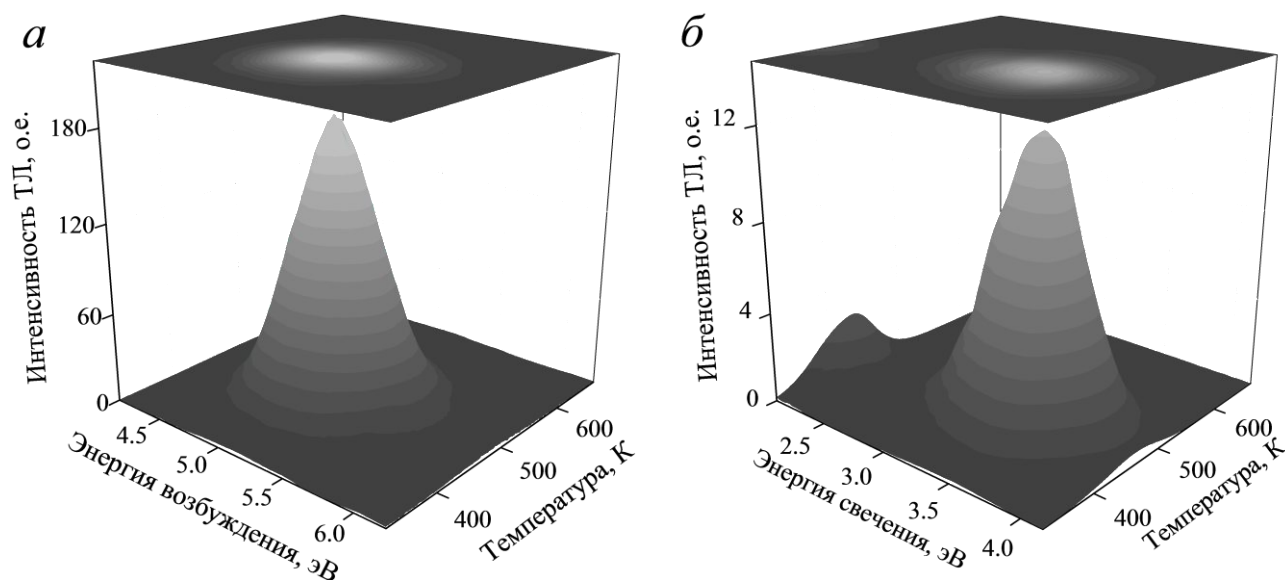


Рисунок 6 – Спектрально-температурные зависимости для спектров возбуждения (*а*) и свечения (*б*) ТЛ монокристаллов AlN

На рисунке 7 представлены сечения полученных спектрально-температурных зависимостей для $T = 474$ К. Обнаружено, что рассматриваемые характеристики с высокой точностью ($R^2 = 0.998$) могут быть описаны суперпо-

зицией трех гауссовых компонент (пунктирные линии). Установлено, что в эмиссионном составе ТЛ доминирует полоса 3.44 эВ с полушириной 0.64 эВ, а также присутствуют полосы 2.91 и 2.0 эВ. При этом наиболее эффективное запасание энергии и дальнейшее термостимулированное высвечивание обеспечивается при облучении исследуемых кристаллов светом с энергией 5.04 эВ.

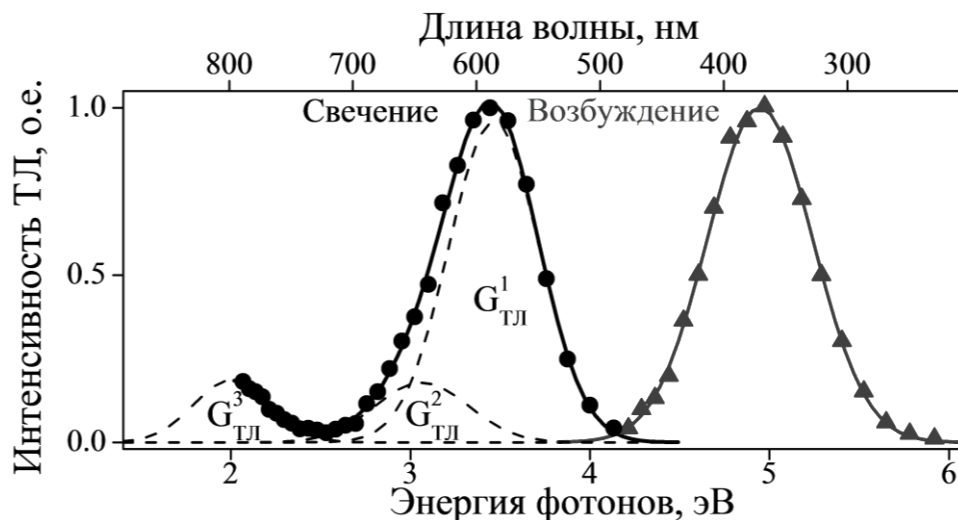


Рисунок 7 – Спектральные зависимости отклика ТЛ при $T = 474$ К: символы – эксперимент; пунктирные линии – гауссовы компоненты; сплошные линии – аппроксимирующие кривые

В рамках формальной кинетики общего порядка (1) проанализированы кривые ТЛ в диапазоне температур $RT-673$ К. Данные представлены в таблице 2. Показано, что наблюдаемый ТЛ-отклик с максимумом в области 470–480 К формируется за счет опустошения активной ловушки с энергией активации $E_a = 0.49$ эВ. При этом порядок кинетики указанных процессов принимает значения $b = 1.35 \pm 0.10$.

Таблица 2– Кинетические параметры термолюминесценции

Параметр	Значение
Положение максимума $T_{\text{макс}}, \pm 5$ К	467 (свечение) 482 (возбуждение)
Полуширина пика $\omega_T, \pm 2$ К	100
Фактор формы $\mu_g, \pm 0.01$	0.48
Энергия активации $E_a, \pm 0.03$ эВ	0.49
Эффективный частотный фактор s'', c^{-1}	$(0.8 \div 8) \cdot 10^4$
Порядок кинетики $b, \pm 0.10$	1.35
Точность описания R^2	0.997

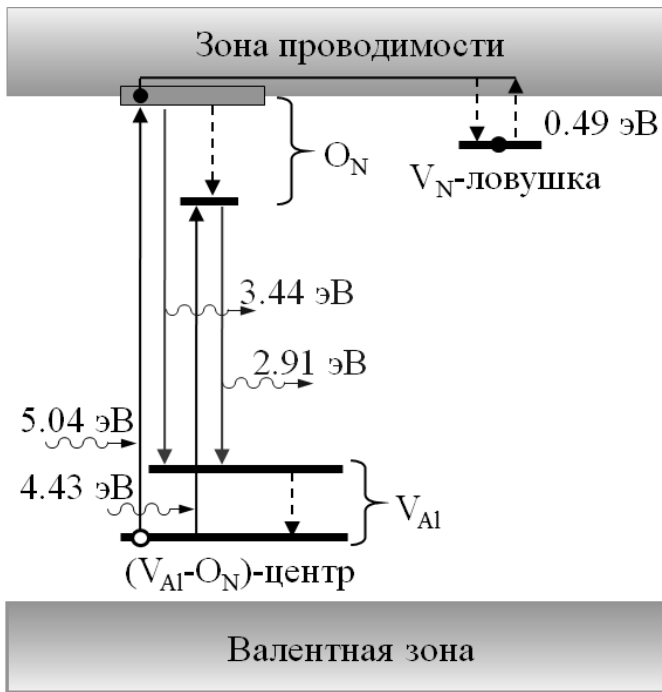
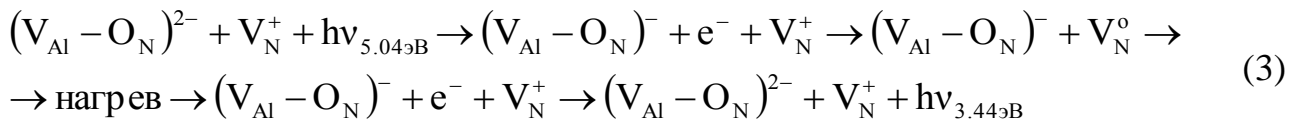


Рисунок 8 – Зонная диаграмма ТЛ в объемных монокристаллах AlN после УФ-облучения

На основе полученных результатов и анализа литературных источников предложена зонная модель исследуемого ТЛ-свечения (рисунок 8). В основе механизма лежит ионизация $(V_{Al} - O_N)^{2-}$ центров при УФ-облучении, которая приводит к захвату электронов на глубокие уровни, сформированные азотной вакансией. Дальнейший нагрев ведет к опустошению $V_N^0 \rightarrow V_N^+$ и излучательному возврату комплексов в исходное состояние $(V_{Al} - O_N)^- \rightarrow (V_{Al} - O_N)^{2-}$. Представлено возможное уравнение для реакции фототермического преобразования кислород-связанных центров в процессе УФ-облучения и дальнейшей термостимуляции:

ров в процессе УФ-облучения и дальнейшей термостимуляции:



Анализ данных, полученных в главах 3 и 4, позволил установить, что при различных видах стимуляции и возбуждения люминесценции в облученных и исходных объемных монокристаллах AlN наблюдаются аналогичные полосы свечения с близкими значениями спектральных параметров (рисунок 9). Компонента G1 проявляется в спектрах КЛ и ТЛ. Полоса G6 наблюдается при реги-

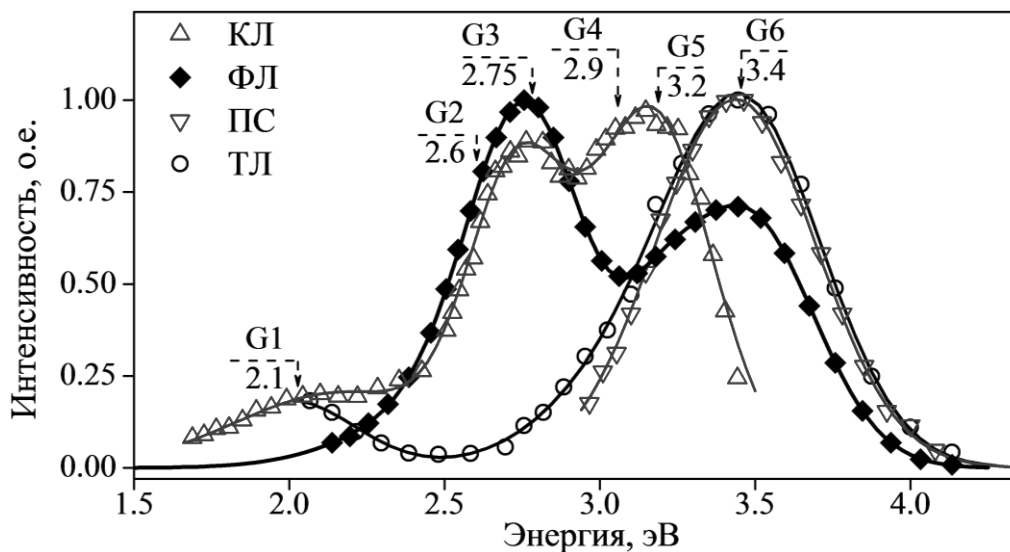


Рисунок 9 – Сравнение спектров свечения в монокристаллах AlN: символы – экспериментальные данные; сплошные линии – аппроксимирующие кривые

страции послесвечения, термо- и фотолюминесценции. В спектрах КЛ и ФЛ определены также полосы G3 и G5. При аппроксимации кривых свечения ФЛ и ТЛ были получены компоненты G2 и G4 соответственно.

Идентификация центров, ответственных за компоненты G1–G3, G5 и G6, была проведена ранее в главе 3. Согласно литературным источникам наблюдаемая нами в спектрах ТЛ полоса свечения G4 также присутствует в спектрах ФЛ керамики, тонких пленок и наночастиц AlN. Установлено, что во всех случаях она также ассоциируется с рекомбинационными процессами на кислород-связанных центрах.

По итогам проведенных работ в конце главы 4 сформулированы выводы.

В пятой главе приведены результаты исследования процессов люминесцентного считывания запасенной дозиметрической информации в порошках и монокристаллах AlN при различных видах стимуляции.

На основе повторных измерений показано, что погрешность определения параметров ТЛ в случае β -облучения объемных монокристаллов AlN не превышает 5 %. Данные удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 8.509-2001, предъявляемым к термолюминесцентным дозиметрическим системам для индивидуального контроля и мониторинга окружающей среды.

При исследовании зависимостей интенсивности ТЛ от дозы предварительного β -облучения монокристаллического AlN обнаружено, что в заданных условиях эксперимента положение максимума и полуширина пиков изменяются в пределах $T_{\text{макс}} = 458 \div 511$ К, $\omega_T = 86 \div 120$ К соответственно. Согласно выражению (1) каждая из полученных ТЛ кривых была описана одним пиком ($R^2 = 0.995$). Установлено, что при увеличении дозы энергия активации и частотный фактор увеличиваются в пределах от 0.39 до 0.61 эВ и от $4.06 \cdot 10^2$ до $2.97 \cdot 10^5$ с⁻¹ соответственно. Показано, что величины E_a и s'' подчиняются компенсационному соотношению с изокинетической температурой $T_i = 509 \pm 10$ К.

На рисунке 10 представлены дозовые зависимости для максимальной интенсивности и светосуммы ТЛ. Обнаружено, что указанные характеристики в диапазоне от 10 мкГр до 4 Гр в двойных логарифмических координатах являются линейными с тангенсами углов наклона $k_I = 0.994 \pm 0.007$ и $k_S = 0.993 \pm 0.007$. Полученный результат сопоставим с рабочим диапазоном доз $10^{-5} \div 10$ Гр для большинства коммерческих детекторов, в том числе ТЛД-500 и ТЛД-100.

При исследовании ОСЛ кривых, измеренных при варьировании дозы β -облучения, показано, что с ростом D от 2.7 до 960 мГр интенсивность в начальный момент времени и светосумма увеличиваются. Численное описание экспериментальных ОСЛ кривых с учетом ПС проводилось двумя экспоненциальными компонентами в рамках формализма первого порядка. Для данных

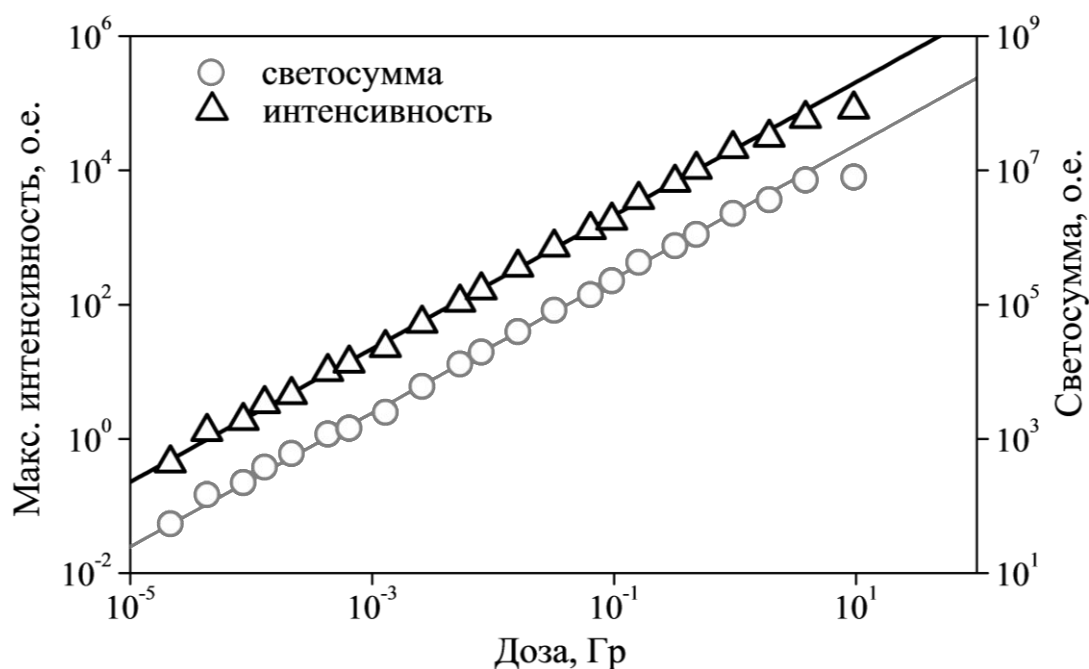


Рисунок 10 – Дозовая зависимость монокристаллов AlN при β -облучении

компонент $C_{\text{осл}}^1$ и $C_{\text{осл}}^2$ постоянные затухания и сечения фотоионизации при варьировании D в диапазоне $42.7 \div 960.0$ мГр принимают средние значения $\tau_{\text{осл}} = 32 \pm 5$ и 212 ± 43 с и $\sigma = (4.8 \pm 0.7) \cdot 10^{-19}$ и $(7.3 \pm 1.5) \cdot 10^{-20}$ см².

Анализ дозовых характеристик для светосуммы (S) и максимальной интенсивности (I) ОСЛ сигнала проводился без учета и с учетом послесвечения. Обнаружено, что при учете процессов ПС зависимость $S(D)$ в двойных логарифмических координатах является линейной с тангенсом угла наклона $k_S = 1.02 \pm 0.01$. В другом случае она проявляет существенно сублинейный характер – $k_S = 0.87 \pm 0.01$. В то же время для зависимостей $I(D)$ параметр $k_I = 0.97 \pm 0.03$ для обоих случаев. На основании полученных данных сделано заключение, что исследуемый ОСЛ сигнал для β -облученных монокристаллов AlN также может быть использован для оценки поглощенной дозы.

Методика получения дозовых зависимостей для порошка AlN заключалась в предварительном облучении образцов УФ-светом с последующей регистрацией при комнатной температуре ПС или ОСЛ в течение 10 мин. Далее проводилась регистрация остаточной ТЛ. Обнаружено, что при учете ПС в образцах дозовые зависимости максимальной интенсивности и светосуммы ОСЛ в двойных логарифмических координатах близки к линейным с тангенсами углов наклона $k_I = 1.10 \pm 0.05$ и $k_S = 1.03 \pm 0.09$, соответственно. Без выделения полезного сигнала для зависимости светосуммы ОСЛ $k_S = 0.71 \pm 0.03$. Данный факт подтверждает необходимость учета послесвечения при использовании порошка AlN в качестве материала для УФ-дозиметрии.

Для изучения взаимосвязи между процессами послесвечения, протекающими при комнатной температуре, и термоактивационным свечением были

исследованы ТЛ кривые, полученные для различного времени хранения в темноте τ облученных образцов (рисунок 11). Анализ показал, что в случае монокристаллов накопленная светосумма за 5 мин хранения уменьшается на 15 %, за 1 сут (1440 мин) – на 75 %. Полученные значения оказались близки к данным по суточному федингу в 66 % для керамики $\text{AlN}-\text{Y}_2\text{O}_3$ при β -облучении.

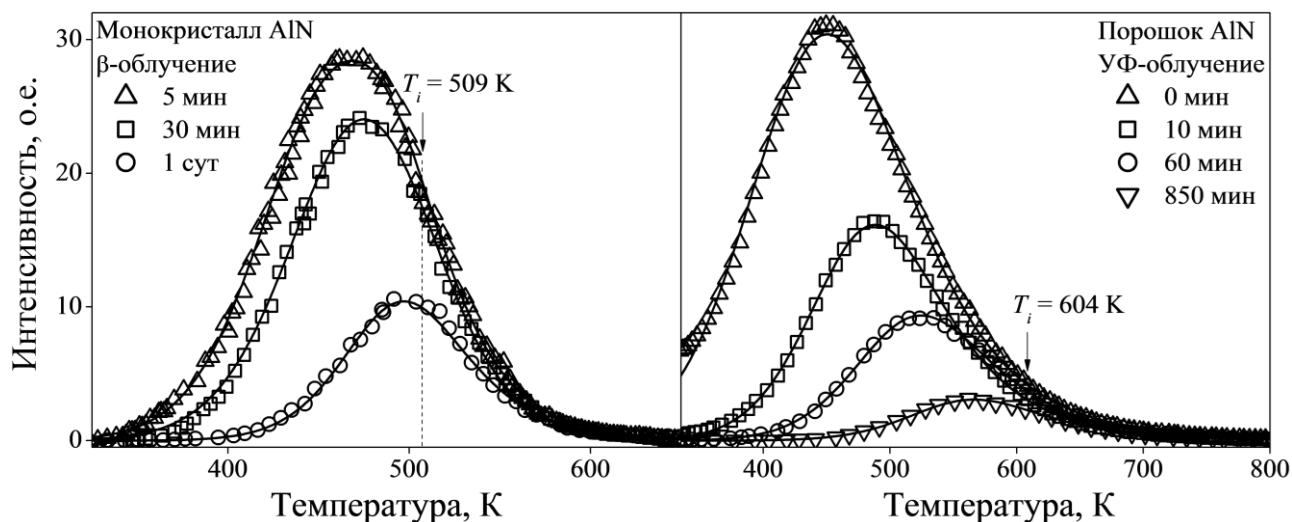


Рисунок 11 – Кривые ТЛ в монокристаллах и порошках AlN , измеренные после различного времени хранения в темноте:

символы – эксперимент; линия – аппроксимация экспериментальных данных.

Для порошков AlN аналогичные исследования были проведены после облучения УФ-светом (рисунок 11). Как и в случае объемных монокристаллов, при увеличении времени τ положение максимума смещается от 450 до 566 К, а полуширина уменьшается от 151 до 127 К. Обнаружено, что в порошках уже спустя 5 мин после облучения накопленная светосумма уменьшается на 50 %, за 14 ч – на 91 %. Очевидно, что в связи с высоким суточным федингом применение указанных структур AlN в качестве запоминающих детекторных элементов ограничено. Однако высокая чувствительность AlN к ионизирующим излучениям делает его перспективным материалом для использования в системах и приборах экспресс-мониторинга дозовых нагрузок.

По итогам проведенных работ в конце главы 5 сформулированы выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс исследований, проведенных в диссертационной работе, позволил получить следующие основные результаты.

1. Исследованы спектры ОП объемных монокристаллов AlN в области энергий 1.1–5.0 эВ. Установлено, что край поглощения искажен дефектами как собственной, так и примесной природы. Показано, что за полосу 2.8 эВ ответственны вакансии азота V_N . Компоненты с максимумами 3.5 и 4.0 эВ связаны с

вакансиями алюминия V_{Al} . При этом полосы ОП 1.8 и 4.5 эВ могут быть связаны с примесными атомами углерода и кислорода соответственно.

2. При исследовании процессов люминесценции в объемных монокристаллах AlN обнаружено, что для различных режимов стимуляции наблюдаются полосы свечения с близкими значениями спектральных параметров. В спектрах КЛ и ТЛ регистрируется компонента 2.1 эВ. Полоса 3.4 эВ наблюдается в послесвечении облученных образцов, а также в эмиссии термо- и фотолюминесценции. В спектрах КЛ и ФЛ присутствуют полосы 2.75 и 3.2 эВ.

3. Показано, что наблюдаемая в образцах AlN люминесценция в основном характеризуется рекомбинационными процессами с участием донорно-акцепторных пар, уровни которых образованы примесными атомами кислорода и связанными с ними комплексами. За счет дефектов типа $(V_{Al}-2O_N)$ могут возникать полосы 2.75 и 2.6 эВ. Компоненты 3.2 и 3.4 эВ обусловлены наличием в образцах $(V_{Al}-O_N)$ -комплексов.

4. Обнаружено, что при оптической стимуляции облученных монокристаллов AlN люминесцентный процесс характеризуется двумя экспоненциальными составляющими, времена затухания которых равны $\tau_{ОСЛ}^1 \approx 28.4$ с и $\tau_{ОСЛ}^2 \approx 234$ с. В предположении независимости компонент затухания ОСЛ-сигнала получены значения сечений фотоионизации $\sigma_1 = 5.3 \cdot 10^{-19}$ и $\sigma_2 = 6.3 \cdot 10^{-20}$ см².

5. Предложена зонная модель исследуемого ТЛ-свечения. В основе механизма лежит ионизация $(V_{Al}-O_N)^{2-}$ -центров при УФ-облучении, которая приводит к захвату электронов на глубокие донорные уровни, сформированные азотной вакансией V_N^0 . Дальнейший нагрев ведет к опустошению $V_N^0 \rightarrow V_N^+$ и излучательному возврату комплексов в исходное состояние $(V_{Al}-O_N)^- \rightarrow (V_{Al}-O_N)^{2-}$. Предложенная модель согласуется с независимыми данными других авторов по термофотостимулированным процессам в материалах на основе AlN.

6. Обнаружено, что для образцов AlN характерен высокий фединг: в облученных объемных монокристаллах накопленная светосумма уменьшается за 24 часа хранения на 75 %, в порошках – на 91 %.

7. Продемонстрировано, что для порошков AlN дозовая зависимость светосуммы ОСЛ-сигнала после соответствующего учета послесвечения является линейной. Данный факт позволяет говорить о возможности использования данных образцов в качестве надежного детекторного материала и достоверной оценки дозовых воздействий УФ-излучения, несмотря на наблюдаемый фединг. При этом показано, что измерение ТЛ-выхода после регистрации ОСЛ-отклика может служить дополнительным способом оценки и контроля достоверности поглощенной дозы ионизирующего излучения.

8. При сравнении характеристик объемных монокристаллов AlN с пара-

метрами коммерческих ТЛ-детекторов установлено, что исследуемый материал не уступает аналогам по большинству параметров. Механическая прочность, инертность к химическому воздействию, высокая чувствительность к различным видам ионизирующего излучения и линейность дозовых характеристик в диапазоне от 10 мкГр до 4 Гр делают нитрид алюминия весьма перспективным для применения. А в связи с высоким суточным федингом ($\approx 75\%$) рассмотренные объемные монокристаллы AlN могут быть использованы, прежде всего, в приборах on-line мониторинга радиационной обстановки окружающей среды и экспресс-анализа мощности пучка в клинической радиотерапии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах,
определенных ВАК РФ:*

1. Спиридонов Д.М. Кинетические особенности оптически стимулированной люминесценции в порошках нитрида алюминия / Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А., Спиридонов Д.М., Бекетов Д.А., Бекетов А.Р. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, вып. 4. С. 10–17 (0.93 п.л./0.19 п.л.).
2. Spiridonov D.M. Thermoluminescence kinetics of oxygen centers in AlN single crystals / Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Spiridonov D.M. // Diamond & Related Materials. 2012. Vol. 25. P. 59–62 (0.36 п.л./0.12 п.л.).
3. Spiridonov D.M. Afterglow in bulk AlN single crystals under β -irradiation / Vokhmintsev A.S., Spiridonov D.M., Weinstein I.A. // Journal of Luminescence. 2012. Vol. 132. P. 2109–2113 (0.47 п.л./0.16 п.л.).
4. Спиридонов Д.М. Дозовые зависимости параметров оптически стимулированной люминесценции в монокристаллах нитрида алюминия / Вохминцев А.С., Спиридонов Д.М., Чайкин Д.В., Минин М.Г., Вайнштейн И.А. // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 20–23 (0.47 п.л./0.09 п.л.).
5. Spiridonov D.M. Continuous wave ОСЛ in bulk AlN single crystals / Vokhmintsev A.S., Weinstein I.A., Spiridonov D.M. // Physica Status Solidi C. 2013. Vol. 210, № 3. P. 457–460 (0.47 п.л./0.16 п.л.).
6. Spiridonov D.M. Photoluminescence characterization of AlN nanowhiskers / Vokhmintsev A.S., Weinstein I.A., Chaikin D.V., Spiridonov D.M., Afonin Yu.D. // Functional Materials. 2014. Vol. 21, № 1. P. 21–25 (0.58 п.л./0.12 п.л.).

Патенты:

7. Пат. 2473926 Российская Федерация, RU 2473926 С1. Устройство для определения поглощенной дозы β -излучения в твердотельном термолюминесцентном детекторе / Вайнштейн И.А., Вохминцев А.С., Спиридонов Д.М.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет име-

ни первого Президента России Б.Н. Ельцина» – № 2011132177/28; приор. 29.07.2011, опубл. 27.01.2013.

8. Пат. 2473925 Российская Федерация, RU 2473925 С1. Способ определения поглощенной дозы β -излучения в твердотельном термолюминесцентном детекторе / Вайнштейн И.А., Вохминцев А.С., Спиридонов Д.М.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» – № 2011132176/28; приор. 29.07.2011, опубл. 27.01.2013.
9. Пат. 2517773 Российская Федерация, RU 2517773 С1. Способ определения поглощенной дозы ионизирующего ультрафиолетового или бета-излучения в детекторе на основе монокристалла нитрида алюминия / Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А., Спиридонов Д.М.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» – № 2012151970/28; приор. 04.12.2012, опубл. 27.05.2014.

Другие публикации:

10. Спиридонов Д.М. Параметры термолюминесценции монокристаллов AlN после УФ-облучения / Спиридонов Д.М., Вайнштейн И.А., Вохминцев А.С., Белоусова Е.Ю. // 16-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-16 : сборник тезисов. Волгоград: Изд-во АСФ России, 2010. С. 157–159 (0.35 п.л./0.09 п.л.).
11. Спиридонов Д.М. Параметры термолюминесценции в β -облученных монокристаллах AlN / Спиридонов Д.М., Белоусова Е.Ю., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А. // XI Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества : тезисы докладов. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2010. С. 118 (0.12 п.л./0.03 п.л.).
12. Спиридонов Д.М. Параметры оптически стимулированной люминесценции в нанопорошках на основе нитрида алюминия / Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А., Спиридонов Д.М., Бекетов Д.А., Бекетов А.Р., Харитонов Д.В. // Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь-Россия-Украина (НАНО-2010) : тезисы II Международной научной конференции. Киев: НВК «Комункомплекс Украина», 2010. С. 50 (0.12 п.л./0.02 п.л.).
13. Спиридонов Д.М. Параметры оптически стимулированной люминесценции в нанопорошках на основе нитрида алюминия / Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А., Спиридонов Д.М., Бекетов Д.А., Бекетов А.Р., Харитонов Д.В. // Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. 2011. Т. 9, вып. 2. С. 365–374 (1.16 п.л./0.35 п.л.).
14. Спиридонов Д.М. Влияние условий синтеза на оптические свойства монокристаллов AlN / Спиридонов Д.М., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А. //

- 17-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-17 : сборник тезисов. Екатеринбург: Изд-во АСФ России, 2011. С. 153–154 (0.24 п.л./0.08 п.л.).
15. Спиридонов Д.М. Автоматизация измерительного ОСЛ-канала на основе виртуальных приборов в среде LabVIEW / Бюшель М.С., Белоусова Е.Ю., Спиридонов Д.М., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А. // Современная российская наука глазами молодых исследователей : материалы Всероссийской научно-практической конференции-форума молодых ученых и специалистов. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2011. С. 125–127 (0.36 п.л./0.07 п.л.).
16. Спиридонов Д.М. Люминесценция облученных монокристаллов нитрида алюминия при термической и оптической стимуляции / Вайнштейн И.А., Вохминцев А.С., Спиридонов Д.М. // 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» : тезисы докладов. Санкт-Петербург: изд-во Политехнического университета, 2011. С. 243–244 (0.24 п.л./0.08 п.л.).
17. Спиридонов Д.М. Влияние ростовых характеристик на ОСЛ отклик монокристаллов нитрида алюминия / Вохминцев А.С., Спиридонов Д.М., Луженкова С.В., Вайнштейн И.А. // Проблемы спектроскопии и спектрометрии : межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2011, вып. 28. С. 44–50 (0.35 п.л./0.09 п.л.).
18. Спиридонов Д.М. Персистентное послесвечение в β -облученных монокристаллах нитрида алюминия / Спиридонов Д.М., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А. // 8-я международная конференция «Ядерная и радиационная физика» : тезисы. Алматы: Институт ядерной физики НЯЦ РК, 2011. С. 218–219 (0.24 п.л./0.08 п.л.).
19. Spiridonov D.M. Thermoluminescence kinetics of oxygen centers in AlN single crystals / A.S. Vokhmintsev, I.A. Weinstein, D.M. Spiridonov // 22nd European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes and Nitrides. Garmisch-Partenkirchen (Germany), 2011. P1.10 (0.12 п.л./0.03 п.л.).
20. Спиридонов Д.М. Ростовые эффекты в катодолюминесценции объемных монокристаллов AlN / Спиридонов Д.М., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А. // XII Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества : тезисы докладов. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2011. С. 88 (0.12 п.л./0.03 п.л.).
21. Спиридонов Д.М. Персистентное послесвечение в β -облученных монокристаллах нитрида алюминия / Вохминцев А.С., Спиридонов Д.М., Вайнштейн И.А. // Ядерная и радиационная физика : материалы 8-й международной конференции. Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2011. С. 379–382 (0.36 п.л./0.12 п.л.).

22. Spiridonov D.M. Continuous wave OCL in bulk AlN single crystals / Vokhmintsev A.S., Weinstein I.A., Spiridonov D.M., Belousova E.Yu. // 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN 2012). St.Petersburg (Russia), 2012. P. 184 (0.12 п.л./0.03 п.л.).
23. Спиридонов Д.М. Погрешность измерения параметров термолюминесцентного отклика нитрида алюминия при постоянной дозе облучения / Спиридонов Д.М., Луженкова С.В., Вайнштейн И.А. // Сборник тезисов 5-й школы «Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и nanoиндустрии». Черноголовка: Метрологический центр РОСНАНО, 2012. С. 23 (0.12 п.л./0.04 п.л.).
24. Спиридонов Д.М. Люминесценция кислород-вакансионных центров в объемных монокристаллах нитрида алюминия / Спиридонов Д.М., Вайнштейн И.А., Вохминцев А.С. // Сборник тезисов лекций и докладов Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике «ЛЛФ-2012». Иркутск: Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, 2012. С. 146–147 (0.24 п.л./0.08 п.л.).
25. Спиридонов Д.М. Дозиметрические свойства монокристаллов AlN с примесью кислорода / Спиридонов Д.М., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А. // XIII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС-13 : тезисы докладов. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2012. С. 133 (0.12 п.л./0.04 п.л.).
26. Спиридонов Д.М. Эволюция параметров ТЛ в облученных порошках AlN при варьировании времени хранения / Спиридонов Д.М., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А. // XIV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС-14 : тезисы докладов. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2013. С. 259 (0.12 п.л./0.04 п.л.).
27. Спиридонов Д.М. Катодолюминесценция кислород-вакансионных центров в структурах нитрида алюминия / Спиридонов Д.М., Вохминцев А.С., Вайнштейн И.А. // Сборник тезисов лекций и докладов Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике «ЛЛФ-2014». Иркутск: Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН, 2014. С. 133–134 (0.12 п.л./0.04 п.л.).

Подписано в печать
«__» _____ 2015

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

Офсетная печать

Тираж 100 экз.

Заказ №

Отпечатано в ризографии НИЦ УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19