

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика
Отделение школы (НОЦ) Б. П. Вейнберга

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
In-situ исследования радиационных повреждений и механических напряжений в монокристаллах оксидов методами высокоэнергетической ионолюминесценции

УДК 620.179.1:621.039.577:661.8:620.19

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ61	Комарова Диана Андреевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
начальник сектора ионно-имплационных нанотехнологий и радиационного материаловедения	Скуратов В. А.	д. ф. -м. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Меньшикова Е. В.	к. филос. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент отделения ядерно-топливного цикла	Гоголева Т. С.	к. ф. -м. н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель НОЦ Б. П. Вейнберга, профессор	Кривобоков В. П.	д. ф. -м. н.		

Томск – 2018 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность) 16.04.01 Техническая физика
Отделение школы (НОЦ) Б. П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ61	Комаровой Диане Андреевне

Тема работы:

Механические напряжения в монокристаллах $Al_2O_3: Cr$, облученных высокоэнергетическими ионами ксенона	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i>	<ol style="list-style-type: none">1. Монокристаллы $Al_2O_3: Cr$ необлученные и облученные ионами Хе с энергией 167 МэВ и флюенсом $3,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$;2. Требования к геометрическим параметрам и качеству поверхности образцов, подготавливаемых непосредственно перед исследованиями.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Механизмы образования дефектов по каналу электронного торможения; 2. Механические напряжения в кристаллах тугоплавких оксидов, облученных высокоэнергетическими ионами; 3. Пьезоспектроскопический анализ механических напряжений в $Al_2O_3: Cr$; 4. Основы метода конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ); 7. Принцип действия, схема и основные характеристики и лазерного конфокального сканирующего микроскопа ИНТЕГРА Спектра; 8. Методика подготовки образцов для послерадиационных исследований; 9. Методика определения профилей остаточных напряжений в образцах $Al_2O_3: Cr$; 10. Измерение пространственного распределения люминесценции R-линий в кристаллах рубина.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Распределение люминесценции R-линий по глубине для необлученного $Al_2O_3: Cr$; 2. Распределение интенсивности люминесценции R-линий по глубине образца; 3. Сравнение профилей спектров люминесценции необлученного (сверху) и облученного иона Хе (167 МэВ; $3,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) образцов (снизу); 4. Профили механических напряжений и потерь энергии ионов ксенона на электронное торможение и упругое рассеяние в $Al_2O_3: Cr$.
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и</p>	<p>Меньшикова Екатерина Валентиновна</p>

ресурсосбережение	
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Глава 2. Методы исследования и оборудование	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
начальник сектора ионно-имплантационных нанотехнологий и радиационного материаловедения, ЛЯР, ОИЯИ	Скуратов Владимир Алексеевич	д. ф. -м. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ61	Комарова Диана Андреевна		

**Результаты обучения магистров
направления 16.04.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-2). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий	Требования ФГОС (ОПК-1). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты	Требования ФГОС (ОПК-5, ПК-5, ПК- 8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ПК-6, 7). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учетом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.	Требования ФГОС (ПК-12,13,14). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P6	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии.	Требования ФГОС (ПК-15, 16). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
P7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Заниматься организационно-управленческой деятельностью, владеть приемами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	Требования ФГОС (ПК-17, 18, 19). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Осуществлять научно-инновационную деятельность, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоемкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.	Требования ФГОС (ПК-1, 2, 3, 4). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<i>Универсальные компетенции</i>		
P10	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять свое научное мировоззрение.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК - 4). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОК-4, 5, ОПК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Реферат

Работа включает в себя 129 страниц, 33 таблицы, 32 рисунка, 5 глав, 1 приложение, 38 литературных источников.

Ключевые слова: фотолюминесценция, механические напряжения, пьезоспектроскопический эффект, высокоэнергетические тяжелые ионы, ионизационные потери энергии, радиационные повреждения, латентные треки, лазерная конфокальная сканирующая микроскопия.

Данная работа посвящена изучению профилей механических напряжений в монокристаллах $Al_2O_3: Cr$ (рубина), облученных высокоэнергетическими (1,2 МэВ/нуклон) ионами ксенона, моделирующими воздействие осколков деления материалов ядерного топлива.

Цель работы: Оработка методики подготовки образцов в геометрии поперечного сечения и проведение измерений спектров фотостимулированной люминесценции по глубине облученного слоя образцов рубина на лазерном конфокальном сканирующем микроскопе (ЛКСМ). Уровень механических напряжений определялся с использованием пьезоспектроскопического эффекта по сдвигу частот характеристического излучения атомов хрома (R-линий).

В результате выполнения работы установлено, что пространственное разрешение при определении профиля напряжений при данном подходе составляет 1 мкм, что значительно выше разрешения (≥ 4 мкм), получаемого при стандартных ЛКСМ измерениях с перемещением точки фокуса по глубине образца. Для флюенса ионов $3,4 \cdot 10^{14}$ см⁻² определен уровень гидростатических напряжений, а также значения компонент тензора напряжений по глубине облученного слоя кристаллов $Al_2O_3: Cr$. Показано, что пространственное распределение уровня напряжений коррелирует с профилем удельных ионизационных потерь энергии высокоэнергетических ионов ксенона.

Апробация данного метода анализа поля механических напряжений и полученные результаты способствуют развитию представлений о

формировании радиационных дефектов по каналу электронного торможения и поведении керамических и оксидных материалах ядерного топлива при воздействии на них осколков деления.

Оглавление

Введение	11
Глава 1. Механизмы образования радиационных дефектов и механических напряжений в $Al_2O_3: Cr$ при облучении высокоэнергетическими тяжелыми ионами.....	14
1.1 Механизмы формирования латентных треков.....	14
1.2 Механические напряжения в монокристаллах тугоплавких оксидов, облученных высокоэнергетическими ионами	21
1.3 Пьезоспектроскопический анализ механических напряжений в $Al_2O_3: Cr$	23
1.4 Определение функции разрешения.....	29
1.5 Постановка задачи исследований	31
Глава 2. Методы исследования и оборудование	32
2.1 Основы метода лазерной конфокальной сканирующей микроскопии (ЛКСМ)	32
2.2 Схема, основные характеристики и принцип действия конфокального сканирующего лазерного микроскопа, входящего в состав устройства ИНТЕГРА Спектра (с конфигурацией Upright со спектрометром Solar III)	36
2.2.1 Принцип работы оптической спектральной системы.....	39
2.3 Методика подготовки образцов к послерадиационным исследованиям.....	43
2.4 Методика определения профилей остаточных напряжений в образцах $Al_2O_3: Cr$	46
Глава 3. Результаты и обсуждение.....	48
3.1 Определение функции разрешения ЛКС-микроскопа.....	49
3.2 Спектры люминесценции R-линий.....	53
3.3 Профили остаточных механических напряжений.....	57
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	60
4.1 Предпроектный анализ.....	60
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	60
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	61
4.1.3 SWOT-анализ	63
4.1.4 Оценка готовности исследования к коммерциализации	67
4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	70

4.2	Инициация исследования.....	72
4.3	Планирование управления научным исследованием.....	77
4.3.1	Иерархическая структура работ исследования.....	77
4.3.2	Контрольные события исследования.....	77
4.3.3	План исследования	78
4.3.4	Бюджет научного исследования.....	80
4.3.4.1	Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов).....	81
4.3.4.2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	82
4.3.4.3	Основная заработная плата.....	82
4.3.4.4	Отчисления на социальные нужды.....	84
4.3.4.5	Научные и производственные командировки	85
4.3.4.6	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями	85
4.3.4.7	Накладные расходы	86
4.3.5	Реестр рисков проекта.....	87
4.4	Оценка сравнительной эффективности исследования.....	90
Глава 5. Социальная ответственность		94
5.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов	94
5.2	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на работающих	97
5.2.1	Организация работы	97
5.2.2	Организация рабочего места оператора ЭВМ.....	97
5.2.3	Условия безопасной работы	100
5.3	Лазерное излучение	103
5.4	Электробезопасность.....	105
5.5	Пожарная и взрывная безопасность.....	107
Заключение		109
Список литературы.....		110
Приложение А.....		114

Введение

Радиационно-стимулированное изменение структуры, как правило, сопровождается появлением механических напряжений, способных оказать значительное влияние на долговременную радиационную стойкость материалов. Поэтому вопросы, связанные с зависимостью уровня напряжений от вида и условий воздействия, таких как тип частиц, доза радиационных повреждений, температура облучения, скорость генерации дефектов, соотношение между уровнями потерь энергии на ионизацию и упругое рассеяние и т.п., являются предметом большого числа экспериментальных и теоретических исследований. Это свидетельствует об их несомненной актуальности.

Наиболее сильным влияние механических напряжений может быть в диэлектриках, облучаемых тяжелыми заряженными частицами, в частности тяжелыми ионами высоких энергий ($E \geq 1$ МэВ/нуклон). В целом ряде материалов этого класса быстрые тяжелые ионы вызывают формирование так называемых латентных треков – разупорядоченных областей вокруг ионных траекторий (см., например, [1]). Этим области с плотностью, отличающейся от плотности окружающего материала, являются источником локальных напряжений, величина которых может быть сравнима и даже превышать предел прочности. С практической точки зрения изучение напряжений, связанных с образованием латентных треков, представляет интерес для моделирования воздействия осколков деления минорных актинидов в материалах ядерного топлива.

Среди различных методов исследования напряжений можно выделить пьезоспектроскопический подход, основанный на взаимосвязи между параметрами спектров оптического поглощения, люминесценции или Рамановского рассеяния с величиной механических напряжений (см., например, [2,3]). Наиболее известным материалом, проявляющим пьезоспектроскопические свойства, является рубин (кристаллы Al_2O_3

примесью трехвалентных атомов хрома). Параметры поля напряжений в $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$, такие, как уровень гидростатических напряжений и компоненты тензора напряжений, находятся по сдвигу линий характеристического излучения примеси хрома, (R линий), или по сдвигу полосы Рамановского рассеяния.

Облучение тяжелыми ионами с энергиями осколков деления ($E \sim 1$ МэВ/нуклон) характеризуется неоднородным распределением потерь энергии и, следовательно, неоднородным распределением радиационных дефектов и связанных с ними механических напряжений, по глубине облученного слоя, толщина которого составляет $\sim 5 \div 15$ микрон. Поэтому значительный интерес представляет экспериментальное определение профилей дефектообразования и напряжений. Для получения такой информации может быть использован метод лазерной конфокальной сканирующей микроскопии (ЛКСМ) [4], пространственное разрешение которого, в зависимости от типа прибора, не превышает 2 микрон, что усложняет интерпретацию экспериментальных результатов. В настоящей работе представлена методика подготовки образцов в геометрии поперечного сечения (на торце образцов), позволяющая повысить разрешение до 1 микрона, а также результаты измерения уровня напряжений в кристаллах рубина, облученных ионами ксенона с энергией 167 МэВ до флюенса $3.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и одного приложения. В первой главе рассматриваются механизмы образования радиационных дефектов по каналу электронного торможения, возникновение механических напряжений в кристаллах тугоплавких оксидов, облученных высокоэнергетическими ионами, описан метод пьезоспектроскопического анализа применительно к $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$, а также рассмотрена методика определения функции разрешения прибора, регистрирующего спектры фотостимулированной люминесценции.

Во второй главе рассматриваются методы исследования и экспериментальное оборудование, используемое в данной работе. Приведены основы метода ЛКСМ, рассмотрена схема и основные характеристики конфокального микроскопа ИНТЕГРА Спектра, приведена методика подготовки образцов для ЛКСМ-исследований, а также методика определения профилей остаточных напряжений в образцах $Al_2O_3:Cr$.

В третьей главе приведены результаты исследований и их анализ.

В четвертой главе представлен анализ данной работы с точки зрения финансового менеджмента и ресурсоэффективности.

В пятой главе представлен анализ работы с точки зрения социальной ответственности.

В приложении приведен перевод второй главы на английский язык.

В заключении сформированы основные результаты работы.

Глава 1. Механизмы образования радиационных дефектов и механических напряжений в $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ при облучении высокоэнергетическими тяжелыми ионами

В данной главе рассматриваются результаты некоторых исследований по структурным изменениям и механическим напряжениям в монокристаллах $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$, таких, как корунд, рубин, сапфир, возникающим из-за облучения высокоэнергетическими тяжелыми ионами. Рассмотрены методы определения механических напряжений. Приведено обоснование выбора метода определения механических напряжений, основанного на пьезоспектроскопическом эффекте. Рассмотрен способ определения функции разрешения метода измерения спектров фотостимулированной люминесценции.

1.1 Механизмы формирования латентных треков

При облучении вещества высокоэнергетическими тяжелыми ионами вокруг траектории первичной частицы в веществе образуется трехмерное пространство, содержащее точечные дефекты большой концентрации, или, по-другому, аморфная область. Она окружена неповрежденным кристаллом и представляет из себя узкую (диаметром в несколько нм), стабильную, химически активную область – трек. Треки могут быть сплошными или прерывистыми.

Было установлено, что энергия, переданная в электронную подсистему, приводит к образованию точечных и протяженных структурных дефектов (латентных треков) [5]. Электронно-микроскопические исследования, проведенные в работе [6], позволили установить, что вызываемые ионами висмута радиационные повреждения представляют собой разупорядоченные области в районе ионных траекторий диаметром от

3 до 4 нм, дающие очень сильный дифракционный контраст, свидетельствующий о высоком уровне локальных механических напряжений.

Позднее было установлено, что ионы ксенона с энергий 1,2 МэВ/нуклон создают прерывистые латентные треки (рисунок 1.1).

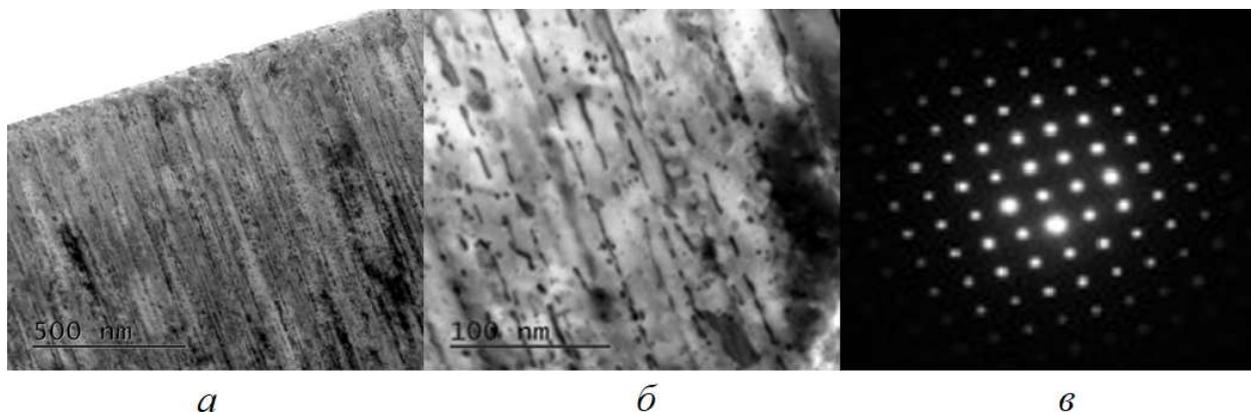


Рисунок 1.1 – (а), (б) ПЭМ изображение латентных треков ионов Хе с энергией 167 МэВ в Al_2O_3 в поперечном сечении образца, (в) дифракционная картина [7]

Обнаруженные треки представляют собой разупорядоченные области пониженной плотности диаметром $1,12 \pm 0,14$ нм, сохраняющие кристаллическую структуру, что подтверждается картиной дифракции на рисунке 1.1.1 (в). Треки регистрируются, начиная с поверхности до определенной глубины. Расчетное значение удельных ионизационных потерь энергии на границе этого слоя, равное $9,8 \div 10,5$ кэВ/нм является порогом образования латентных треков.

Существуют различные модели, разработанные для описания механизмов формирования треков, однако, наиболее популярными являются модель кулоновского взрыва и модель термического пика. Также рассматривается модель ударных и акустических волн, появляющихся при релаксации электронных возбуждений.

Модель кулоновского взрыва является первой предложенной моделью. В данной модели предполагается, что эмиссия электронов за счет ион-электронных соударений приводит к появлению ионизированных атомов

в мишени, что, в свою очередь, является причиной возникновения электростатического поля вдоль траектории иона. Движение иона в этом поле происходит в течение ограниченного времени (менее 10^{-13} с) и является причиной формирования трека в веществе. Часть энергии, сообщенная электронам, вызывает изменение межатомных сил и последующее движение атомов.

Модель кулоновского взрыва описывает при каких условиях сила кулоновского отталкивания будет преобладать над силами связи в решетке. Эта локальная сила, нормированная на единицу площади [4]:

$$F = n^2 e^2 / (\varepsilon a_0^4), \quad (1.1)$$

где n – зарядовое число;

ε – диэлектрическая постоянная рассматриваемых материалов;

a_0 – среднее расстояние между атомами.

Если $F > \sigma_M \sim Y/10$ (σ_M – механическая сила, Y – модуль Юнга), то имеет место движение атомов [4].

Чтобы процесс деформации кристаллической решетки мог реализоваться, подвижность вакансий не должна быть высокой.

Модель кулоновского взрыва объясняет отсутствие треков в металлах и некоторых полупроводниках.

В работе [8] показано, что центральная область трека представляет собой квазинейтральный плазменный шнур, в котором разделение зарядов происходит на расстояниях, не превышающих радиус Дебая. В области данного плазменного шнура генерируется электрическое поле, взаимодействующее с ионами решетки. Квазинейтральность данной области может быть нарушена на границах облучаемого вещества (в местах падения и вылета иона). Поэтому, модель кулоновского взрыва может применяться, когда требуется объяснить возникновение дефектов на поверхностях кристаллов, облучаемых ионами.

Вторая модель – это модель термического пика. Здесь предполагается, что образование латентных треков происходит из-за локального повышения температуры до значения, превышающего температуру плавления и, затем, быстрого остывания. Локальное повышение температуры происходит в результате двухступенчатого процесса: термализации электронов через электрон-электронное взаимодействие и сообщение выделенной энергии решетке через электрон-решеточное взаимодействие.

Существует несколько моделей релаксации термического пика. Наиболее популярной является модель неупругого термического пика, в которой предполагается, что все параметры, описывающие тепловые изменения возбужденной электронной системы постоянны [7, 9 – 14]. Единственным свободным параметром электронной подсистемы является средняя длина свободного пробега электрона при электрон-решеточном взаимодействии $\lambda = \sqrt{D_e(T_e)\tau}$, $D_e(T_e)$ – коэффициент тепловой диффузии для горячих электронов, τ – время электрон-решеточной релаксации.

Решая два связанных уравнения теплопроводности численным методом, возможно определить радиус трека как размер области, в которой температура решетки превысила температуру плавления.

$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r K_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial r} \right] - g(T_e - T_a) + A(r), \quad (1.2)$$

$$C_a(T_a) \frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r K_a(T_a) \frac{\partial T_a}{\partial r} \right] + g(T_e - T_a), \quad (1.3)$$

где $T_{e,a}(r, t)$; $C_{e,a}(r, t)$ и $K_{e,a}(r, t)$ – температура, теплоемкость, нормированная на объем (удельная теплоемкость) и теплопроводность электронной и ядерной подсистем соответственно;

g – константа, описывающая электрон-фононное взаимодействие;

$A(r)$ – энергия, сообщенная в электронную систему;

r – радиальная координата;

t – время.

Величина g связана с τ соотношением $\tau = C_e(T_e)/g$. Параметр λ

определяется подгонкой известных экспериментальных данных по размеру латентного трека.

Несмотря на то, что рассмотренная выше модель позволяет объяснить образование треков в целом ряде диэлектриков и получить размеры треков, близкие к экспериментальным, обоснованность применения макроскопических уравнений теплопроводности для описания процессов диссипации энергии на столь малых расстояниях, как единицы нанометров подвергается сомнению [6, 15].

Другая модель релаксации термического пика – это аналитическая модель термического пика. Здесь предложена систематика размеров треков, не предполагающая зависимости радиуса трека от свойств материала, в том числе и от теплопроводности в отличие от предыдущей модели. Предположено, что рост температуры, вызванный налетающим ионом $\Delta T(r, t)$ можно аппроксимировать нормальной функцией распределения, аналитическое решение которой [4]:

$$\Delta T(r, t) = \gamma S_e / \pi \rho c a^2(t) e^{-(r^2/a^2(t))}, \quad (1.4)$$

где ρ и c – плотность и теплоемкость;

γS_e – часть S_e , идущая в тепловой пик с эффективностью γ .

$$a(t) = a(0) + 4Dt, \quad (1.5)$$

где $a(0)$ – начальная ширина радиального распределения температуры, аппроксимированной нормальной функцией распределения в фононной системе;

Dt – квадратное значение длины диффузии энергии в зависимости от времени в рассматриваемом материале с коэффициентом тепловой диффузии D .

В работе [16] предположено, что максимальный размер трека достигается при $t = 0$ и $\Delta T(r, 0)$ рассчитывается только с $a(0)$.

$$\Delta T(R_m, 0) = T_0 = T_m - T_{ir}, \quad (1.6)$$

где T_{ir} (обычно 300 K) – температура облучения;

T_m – температура плавления.

Эффективный радиус трека описывается следующими уравнениями [4]:

$$R^2 = a^2(0) \ln(S_e / S_{et}), \text{ при } S_e < 2,7S_{et}, \quad (1.7)$$

$$R^2 = (a^2(0)S_e) / (2,7S_{et}), \text{ при } S_e > 2,7S_{et}, \quad (1.8)$$

где S_{et} – порог потерь электронной энергии для образования трека.

$$S_{et} = (\pi r c T_0 a^2(0)) / \gamma, \quad (1.9)$$

Наиболее важные особенности данной модели – то, что начальная ширина распределения Гаусса однородна $a(0) = 4,5$ нм и то, что эффективность $\gamma \sim 0,4$ при низких и $\gamma \sim 0,17$ при высоких скоростях налетающего иона в этой модели [4].

Аналитическая модель термического пика в первую очередь разрабатывалась для диэлектриков, в дальнейшем была расширена для полимеров и для материалов с высокой анизотропией электрической проводимости [4].

Еще одним механизмом, влияющим на образование латентных треков в твердых телах, является генерация в области трека ударных и акустических волн. Образование ударной волны можно рассмотреть, как результат возникновения термического пика и сопутствующих ему механических напряжений [17]. Если скорость движения частиц вещества превышает скорость звука, то в веществе распространяется ударная волна. Возникающие в результате вблизи траектории иона механические напряжения могут превышать предел текучести материала, что может повлиять на локальные изменения кристаллической структуры решетки. Возникновение ударной волны можно также описать в рамках механизма кулоновского взрыва [18], однако, вследствие квазинейтральности плазмы в треке такой механизм генерации ударной волны может иметь место только в приповерхностной области вещества.

Рассмотрев некоторые представления о формировании треков, можно заключить, что образование трека – результат воздействия многих механизмов. Относительная роль того или иного механизма зависит от целого ряда факторов и единый микроскопический механизм образования дефектов за счет электронного торможения тяжелых ионов еще не создан.

1.2 Механические напряжения в монокристаллах тугоплавких оксидов, облученных высокоэнергетическими ионами

В настоящее время в литературе нет достаточного количества данных по механическим напряжениям в $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$, вызванных высокоэнергетическим ионным облучением. Поэтому в данном разделе рассматриваются в том числе результаты немногочисленных работ, в которых изучались кристаллы тугоплавких оксидов – ZrO_2 и SiO_2 при облучении быстрыми тяжелыми ионами.

Первые экспериментальные результаты по определению напряжений в Al_2O_3 в процессе низкоэнергетичного ($E = 50 \div 250$ кэВ) ионного (H, D, He, Ar) облучения были представлены в [56]. Было установлено, что при относительно низких для пучков таких энергий флюенсах, $\sim 10^{14}$ см⁻², облучение уже вызывает значительные механические напряжения, величина которых зависит как от полных потерь ионов на ионизацию и упругое рассеяние, так и от их соотношения. Уровень интегральных напряжений в монокристаллах сапфира, S , при облучении низкоэнергетическими ионами на линейной стадии изменяется следующим образом:

$$S = \Phi(A - hB), \quad (1.10)$$

где $\Phi = E_n * \phi$;

$$h = E_e / E_n;$$

ϕ – флюенс ионов;

E_e, E_n – полные потери энергии на ионизацию и упругое рассеяние соответственно;

A, B – константы.

Оценка размера области механических напряжений в Al_2O_3 вокруг треков ионов висмута с энергией 700 МэВ была предпринята в работе [19]. Оценка радиуса действия механических напряжений R_t может быть сделана с помощью выражения $1/(\pi R_t^2) = \Phi_t$, где Φ_t – флюенс пучка.

В работе [20] изучалась морфология треков, формирующихся при облучении α -кварца, а также окружающих их полей внутренних напряжений. Образцы облучались ионами $^{197}\text{Au}^{+26}$ (374 МэВ) и $^{127}\text{I}^{+18}$ (241 МэВ) с удельными потерями на ионизацию 24 и 19 кэВ/нм, соответственно. В обоих случаях в образце наблюдаются цилиндрические аморфизованные области пониженной плотности радиусом 4 ± 1 нм. Форма поля напряжений, окружающего эти области, является цилиндрически-симметричной, величина напряжений убывает пропорционально квадрату расстояния от центральной оси и радиус напряженной области составляет 16 нм.

Проводились исследования усредненной по объему величины внутренних напряжений в кристаллах ZrO_2 с 10% примесью Y_2O_3 после облучения тяжелыми ионами. Образцы облучались ионами 944 МэВ Рь до флюенсов в интервале $5\times 10^{11} - 4\times 10^{13}$ см⁻². Показано, что внутренние напряжения можно представить, как сумму гидростатических напряжений, и напряжений в плоскости, перпендикулярной оси трека (латеральных). При этом гидростатические напряжения являются растягивающими, а латеральные – сжимающими.

1.3 Пьезоспектроскопический анализ механических напряжений в $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$

Существуют различные методы определения остаточных механических напряжений в материале. Каждый из них можно отнести к одному из двух типов – разрушающему методу анализа и неразрушающему.

Идея разрушающего метода определения остаточных механических напряжений заключается в постепенно возрастающем высвобождении и одновременном контроле изменения внутренних напряжений тензометрированием. Данный метод применим в случае массивных образцов.

Неразрушающие методы определения остаточных напряжений – это методы, которые не предусматривают разрушение образца. К таким методам относят ультразвуковой, рентгеновский метод, метод, основанный на пьезоспектроскопическом эффекте и др.

Так, как в данной работе анализируемая область для определения механических напряжений не превышает 10 – 15 нм, то имеет смысл остановиться подробнее только на рентгеновском методе и методе, основанном на пьезоспектроскопическом эффекте. Остальные методы применяются в случае более массивных образцов.

Рентгеновский метод определения напряжений основан на определении межатомного расстояния кристаллической решетки. Существуют две причины изменения межатомного расстояния: из-за температуры и из-за силового воздействия. Метод рентгеновского исследования позволяет на основании измерений величины характерного линейного размера кристаллической решетки в различных направлениях под углом к поверхности образца определить упругие деформации, а по ним величину остаточных напряжений.

Следует отметить, что пластические деформации не оказывают влияния на межатомные расстояния, потому рентгеновский метод в отличие

от остальных позволяет определить только упругую составляющую деформации.

В сравнении с рентгеновским методом, метод, основанный на пьезоспектроскопическом эффекте является более простым, точным, позволяет регистрировать напряжения на большей глубине, причем не только упругую составляющую. Кроме того, отсутствие рентгеновского излучения также является преимуществом.

Рассмотрим метод определения механических напряжений с помощью пьезоспектроскопического эффекта подробнее. Данный метод основан на взаимосвязи между параметрами спектров оптического поглощения, люминесценции или Рамановского рассеяния с величиной механических напряжений.

Оптический спектр $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ изучался наиболее подробно в конце 1950 – начале 1960 благодаря тому, что он являлся первым лазерным материалом. Одно из главных открытий того времени – существование значительного систематического сдвига частот R_1 - и R_2 -линий (или по-другому характеристических линий) при приложении одноосных механических напряжений параллельных и перпендикулярных к оси c в монокристалле $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$. Данное явление назвали пьезоспектроскопическим эффектом.

Как известно, большинство керамик являются оптически прозрачными материалами из-за большой ширины запрещенной зоны. Однако, присутствие следов примеси в основном переходных и редкоземельных металлов может являться причиной интенсивной люминесценции при возбуждении этих ионов. Характеристические линии излучения обычно являются следствием перехода с одного энергетического уровня на другой в атомах допантов.

Рассмотрим пьезоспектроскопические свойства $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$. Здесь часть атомов Al замещена ионами Cr^{3+} . Диаграмма энергетических уровней Cr^{3+} в $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ приведена на рисунке 1.2.

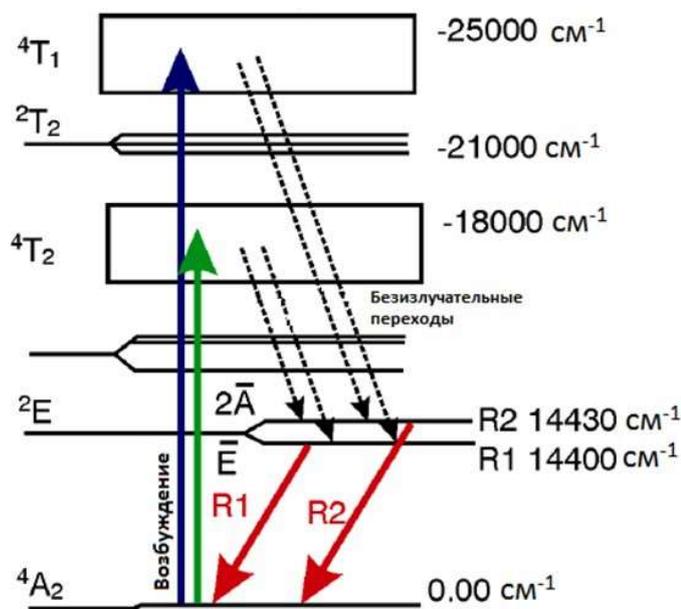


Рисунок 1.2 – Уровни энергии и энергетические переходы ионов хрома в решетке $Al_2O_3: Cr$ [7]

Линии излучения света R_1 и R_2 обусловлены переходом между уровнями 2E и 4A_2 . Состояние 2E является метастабильным и имеет при комнатной температуре время жизни около 3 мс. Оно состоит из двух подуровней $-E$ и $2A$. Переходы между этими подуровнями и основным уровнем 4A_2 дают линии излучения R_1 и R_2 .

Положение энергетических уровней Cr^{3+} главным образом определяется ближайшим окружением иона, соответственно изменение положения уровней иона зависит в первую очередь от изменений в его ближайшем окружении. В результате деформаций, которые изменяют межатомное расстояние, происходит сдвиг частот линий люминесценции (R_1 - и R_2 -линий).

На рисунке 1.3 показано смещение характеристических линий спектра люминесценции при присутствии механических напряжений.

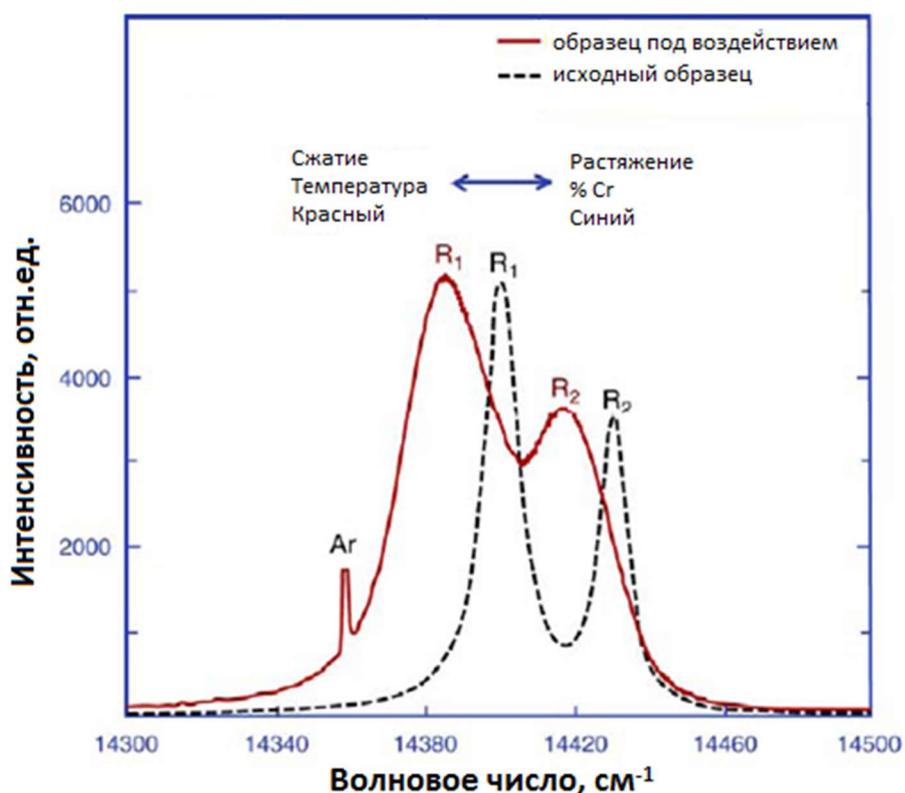


Рисунок 1.3 – Смещение линий спектра люминесценции при присутствии механических напряжений относительно линий спектра люминесценции образца, в котором механические напряжения отсутствуют [7]

При сдвиге линий спектра люминесценции в красную область характер остаточных механических напряжений в образце является сжимающим.

Локальная деформация решетки Al_2O_3 около ионов Cr^{3+} вносит большой вклад также в наблюдаемое концентрационное уширение линий (рисунок 1.3). Оно происходит благодаря влиянию на уровни ионов хрома упругих искажений решетки, вызванных присутствием других ионов хрома (так называемый «деформационный» механизм неоднородного уширения линий).

Помимо механических напряжений, характеристические линии спектра люминесценции также чувствительны к температуре, приложенному электрическому или магнитному полю, концентрации допантов.

Связь между величиной механических напряжений и наблюдаемым сдвигом линий в спектрах люминесценции или поглощения и величиной механических напряжений описывается следующим уравнением:

$$\Delta \nu = \Pi_{ij} \times \sigma_{ij}, \quad (1.11)$$

где Π_{ij} – пьезоскопические коэффициенты;

σ_{ij} – поле напряжений в базисе кристаллической решетки.

Π_{ij} – симметричный тензор, отражающий симметрию тензора напряжений ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) [65]. Следствием этого предположения является то, что пьезоспектроскопический тензор для спектра единичного, изолированного атома примеси, такого, как ион Cr^{3+} , будет иметь форму, определяемую точечной симметрией атома примеси в кристаллической решетке. Предположив тип решетки моноклинный или триклинный, что справедливо в случае $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{Cr}$, пьезоспектроскопический тензор выглядит следующим образом:

$$\Pi_{ij} = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \Pi_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \Pi_{33} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

В частности, в случае Cr^{3+} в $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{Cr}$ стандартная система отсчета определена тремя осями, параллельными кристаллографическим направлениям a (индекс 11), c (индекс 22) и m (индекс 33). Основываясь на этом предположении пьезоспектроскопический эффект R-линий обуславливается точечной симметрией ионов Cr^{3+} в недеформированной тригональной решетке. Пьезоспектроскопический эффект является изотропным в направлениях a и m ($\Pi_{11} = \Pi_{22}$).

Экспериментальным образом в работе [22] установленная линейная зависимость сдвига R-линий от приложенного напряжения:

$$\Delta \nu_1 = 2,56 \cdot \sigma_{11} + 3,50 \cdot \sigma_{22} + 1,53 \cdot \sigma_{33} \quad (1.13)$$

$$\Delta \nu_2 = 2,65 \cdot \sigma_{11} + 2,80 \cdot \sigma_{22} + 2,16 \cdot \sigma_{33} \quad (1.14)$$

$$\sigma_h[\Gamma\Gamma a] = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} = \frac{\Delta \nu_2[\text{см}^{-1}]}{7,61}, \quad (1.15)$$

где σ_h – гидростатические напряжения.

Сдвиг R_2 линии не зависит от кристаллографической ориентации и девиаторных напряжений в отличие от сдвига R_1 линии [24, 25]. Разный характер зависимостей R_1 и R_2 линий от приложенного напряжения может быть использован для получения информации о степени негидростатичности напряжений, поскольку при однородном сжатии соответствующие сдвиги частот $\Delta\nu_1$ и $\Delta\nu_2$ равны между собой.

Первые результаты по использованию пьезоспектроскопического эффекта для исследования механических напряжений в кристаллах рубина, облученных тяжелыми ионами высоких энергий, были представлены в [19]. Было установлено, что, радиационные дефекты, вызываемые ионным облучением, приводят, прежде всего, к уширению и снижению интенсивности R линий. Другой эффект, наблюдаемый только для ионов висмута, состоял в изменении положения максимумов R линий, т.е. сдвиге частот излучения, что говорило о появлении механических напряжений. Облучение же ионами аргона и криптона в интервале флюенсов 10^{10} - 10^{13} ион/см² не приводило к заметному сдвигу линий как при 300 К, так и при 80 К при одинаковых с ионами висмута дозах радиационных повреждений, образующихся по каналу упругого рассеяния. Был сделан вывод, что при данных ионных флюенсах напряжения обусловлены структурными дефектами, созданными в $Al_2O_3:Cr$ по каналу электронного торможения. Отрицательный знак изменения частоты R линий свидетельствовал, что в облучаемом слое образца аккумулируются сжимающие механические напряжения.

1.4 Определение функции разрешения

При измерении люминесценции, свет от точек, лежащих на оси объектива, но не в точке фокуса, также частично попадает в точечное отверстие. Рассчитаем детектируемую интенсивность для некоторой точки при i -том смещении объектива:

$$I_i = \int_{-\infty}^{\infty} F(z) \cdot \Phi_i(z_i - z) \cdot \varepsilon_i(z_i - z) dz, \quad (1.16)$$

где $F(z)$ – реальная интенсивность люминесценции образца по глубине z ;
 $\Phi_i(z_i - z)$ – интенсивность света лазера на расстоянии $z_i - z$ от точки z_i ;
 $\varepsilon_i(z_i - z)$ – эффективность попадания света, лежащего на расстоянии $z_i - z$ от точки z_i , в точечное отверстие.

При объединении ε и Φ в одну функцию, получаем функцию разрешения.

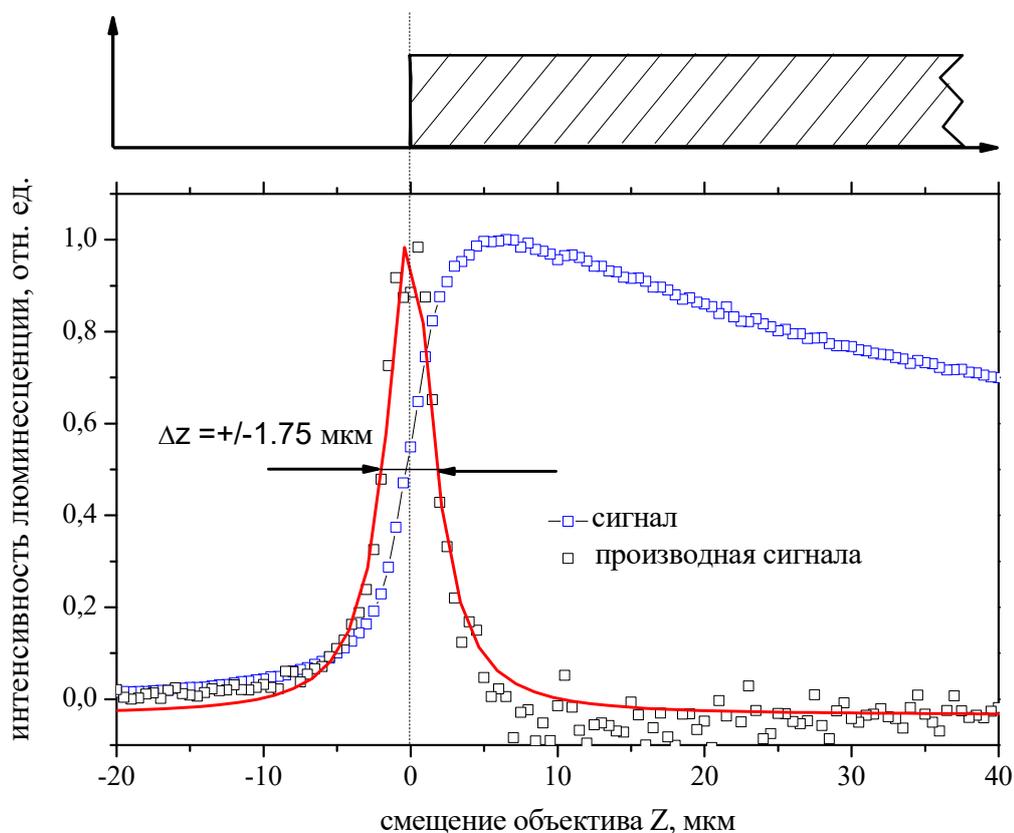


Рисунок 1.4 – Определение функции разрешения у поверхности образца дифференцированием профиля люминесценции необлученного образца. На

верхней картинке представлена поверхность образца. На нижней картинке синие точки – измеренное распределение люминесценции, черные квадраты – численная производная профиля люминесценции, красная кривая – аппроксимация функцией Лоренца

Таким образом, функция разрешения определяется как первая производная от распределения интенсивности люминесценции [26-28].

1.5 Постановка задачи исследований

Для получения детальной информации о профилях механических напряжений в образцах $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ через пьезоспектроскопический эффект требуется высокое разрешение устройства, регистрирующего спектры фотостимулированной люминесценции (в данном случае разрешение лазерного конфокального сканирующего микроскопа). В настоящее время с учетом различных типов приборов, разрешение метода лазерной конфокальной сканирующей микроскопии (ЛКСМ) не превышает 2 мкм.

В данной работе размер анализируемой области образцов, в которой требуется получить подробную информацию об остаточных механических напряжениях (облученной области), составляет 10 – 15 мкм. Таким образом при проведении стандартных измерений спектров фотостимулированной люминесценции методом ЛКСМ по глубине образца возможно проанализировать только 5 – 7 точек. Данное количество анализируемых точек является неудовлетворительным для получения подробной информации о профилях остаточных механических напряжений.

Поэтому для повышения точности метода ЛКСМ в данной работе были выдвинуты следующие основные задачи:

1. Отработка методики подготовки образцов в геометрии поперечного сечения;
2. Определение разрешения ЛКС-микроскопа;
3. Проведение ЛКСМ-измерений спектров фотостимулированной люминесценции образцов $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$, облученных ионами Хе с энергией 167 МэВ до флюенса $3,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ на поперечном сечении образца;
4. Определение уровня механических напряжений.

Глава 2. Методы исследования и оборудование

В данной главе представлены методы измерения спектров фотостимулированной люминесценции и методы исследования профилей внутренних механических напряжений в образцах $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$, облученных высокоэнергетическими ионами Хе, а также используемое для этих целей экспериментальное оборудование.

2.1 Основы метода лазерной конфокальной сканирующей микроскопии (ЛКСМ)

Для проведения измерений спектров фотостимулированной люминесценции образцов $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$, по которым затем можно будет оценить пространственные профили механических напряжений в данных образцах, может применяться метод ЛКСМ.

Данный метод основан на использовании лазерного конфокального сканирующего микроскопа, в котором лазер возбуждает образец, стимулируя его люминесценцию, а затем с помощью спектрометрической системы происходит регистрация спектров люминесценции. Типичная схема лазерного конфокального микроскопа показана на рисунке 2.1.

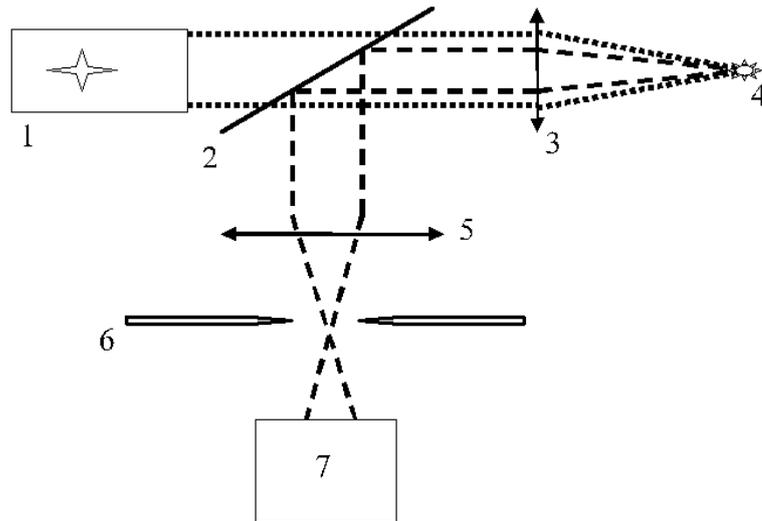


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема конфокального микроскопа. 1 – лазер, 2 – делитель пучка (полупрозрачное зеркало), 3 – объектив микроскопа, 4 – точка фокуса, 5 – собирающая линза, 6 – точечное отверстие, 7 – спектрометрический узел [7]

Луч света из источника 1 проходит через делитель пучка 2 на объектив 3. Разделение происходит по длинам волн, т.е. свет с длинами волн больше критической, отражается зеркалом-делителем, а с меньшими - пропускаются. Объектив 3 фокусирует луч на образце. После этого часть света, переизлученного из точки фокуса, собирается тем - же объективом 3 и попадает на делитель пучка 2. Отраженный делителем пучок попадает на объектив 5, который фокусирует его на точечном отверстии 6, за которым расположен спектрометрический узел 7. Применение точечного отверстия позволяет улучшить разрешение оптического микроскопа.

На рисунке 2.2 приведены схемы, отображающие принцип улучшения разрешения.

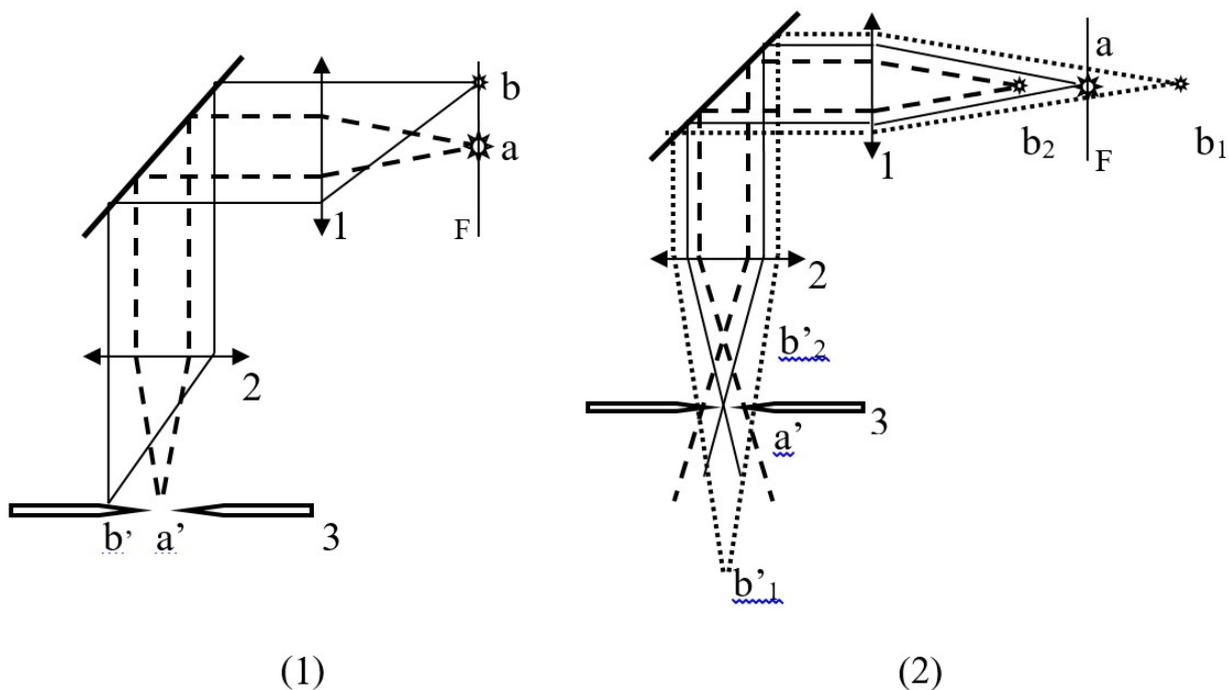


Рисунок 2.2 – Схематическое изображение хода лучей в конфокальном микроскопе в случае латерального (1) и аксиального (2) разрешения. 1 – объектив микроскопа, 2 – собирающая линза, 3 – точечное отверстие, F – фокальная плоскость [7]

На рисунке 2.2 (1) приведена схема улучшения латерального разрешения (разрешения в фокальной плоскости). Пусть точки a и b лежат в фокальной плоскости F . Точка a находится в точке фокуса объектива 1, а точка b рядом с ней. Тогда изображение a' точки a , построенное объективом 2, попадает в точечное отверстие 3 и, соответственно, на детектор. Изображение b' точки b в отверстие 3 не попадает. Таким образом, с помощью точечного отверстия отсекается свечение точек, лежащих в непосредственной близости от точки фокуса.

В случае классического светового микроскопа согласно критерию Релея, пространственное разрешение объективной линзы равно радиусу диска Эйри:

$$R = \frac{1,22 \cdot \lambda}{2 \cdot NA}, \quad (2.1)$$

где λ – длина волны;

NA – числовая апертура объективной линзы.

В таком случае разрешение микроскопа определяется следующим образом:

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{NA}, \quad (2.2)$$

где $k = 0,61$ в случае латерального разрешения классического оптического микроскопа.

В случае конфокального микроскопа при устремлении размеров точечного отверстия к нулю пространственное разрешение улучшается в $\sqrt{2}$ раз. Принимая размер точечного отверстия нулевым, получим коэффициент k для пространственного разрешения в фокальной плоскости $k = 0,44$.

В случае аксиального разрешения (по оси Z , перпендикулярной плоскости F объектива 1) схема выглядит иначе (рисунок 2.2 (2)). Точка a лежит в фокальной плоскости, а точки b_1 и b_2 вне ее. Изображение a' точки a по прежнему полностью попадает в отверстие 3, а изображения b'_1 и b'_2 точек b_1 и b_2 не попадают. Однако, из схемы видно, что свет из точек b_1 и b_2 все же частично попадает на детектор, т.е. разрешение ухудшается. Кроме того, аксиальная функция разрешения зависит и от объекта исследования. Из схемы видно, что если объект представляет из себя светящуюся или отражающую плоскость, то ее поверхность будет детектироваться с хорошим разрешением. Если объект представляет из себя прозрачную матрицу с незначительно изменяющейся по объему интенсивностью свечения, то за счет свечения точек, попадающих в световые конусы до и после точки фокусировки пучка, разрешение в данной точке понизится. На реальной установке ширина функции разрешения зависит также от дефектов систем линз 1 и 3, размеров точечного отверстия, особенностей всей оптической схемы и, следовательно, реальную ее оценку можно получить только из экспериментальных измерений на тестовых образцах.

2.2 Схема, основные характеристики и принцип действия конфокального сканирующего лазерного микроскопа, входящего в состав устройства ИНТЕГРА Спектра (с конфигурацией Upright со спектрометром Solar TII)

Измерения спектров люминесценции проводились на конфокальном сканирующем лазерном микроскопе, входящим в состав установки ИНТЕГРА Спектра производства фирмы NT-MDT.

На установке ИНТЕГРА Спектра возможно выполнять следующие измерения:

- проводить спектральные измерения в точке и получать спектральные характеристики различных материалов, используя прибор как обычный спектрометр;
- проводить измерения интенсивности вторичного сигнала в выбранном диапазоне длин волн в процессе послойного объемного сканирования области 100x100x30 мкм;
- получать оптические изображения объектов, работая в качестве обычного лазерного конфокального микроскопа;
- с разрешением вплоть до атомарного проводить измерения характеристик рельефа поверхности образца, а также его электрических, магнитных, наномеханических и других свойств методами силовой микроскопии;
- реализовать с нанометровым разрешением измерения различных оптических характеристик, присущих методикам безапертурной Сканирующей Ближнепольной Оптической Микроскопии.

Общий вид установки ИНТЕГРА Спектра представлен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Установка ЗНЛ ИНТЕГРА Спектра [29]

Основными узлами установки являются:

1. Базовый блок. На данном блоке устанавливается измерительная головка, сканер и держатель образца.
2. Оптическая измерительная головка. Обеспечивает получение изображения поверхности исследуемого объекта. Устанавливается на базовом блоке прибора.
3. Модуль ввода/вывода лазерного излучения. Обеспечивает сопряжение спектрального блока с измерительной головкой. Крепится на штатив и основание базового блока.
4. Спектральный блок. Данный блок состоит из следующих узлов:
 - Спектрометр. Предназначен для проведения спектроскопии и формирования изображения.
 - Лазеры. С помощью оптоволоконной транспортной системы лазерное излучение передается к спектрометру, либо к измерительной головке.
 - Оптоволоконная транспортная система. Предназначена для передачи лазерного излучения к входному порту спектрометра, либо к измерительной головке.

5. Детекторы. Предназначены для регистрации сигналов, полученных в процессе измерений. К спектрометру могут подключаться следующие типы детекторов: ПЗС-камера, модуль ЛФД, модуль ФЭУ.

6. Система видеонаблюдения. Позволяет вести наблюдение как по нормали, так и под малым углом к поверхности образца, что позволяет решать следующие задачи:

- наведение лазерного луча на кантилевер;
- выбор участка поверхности образца для исследований;
- контроль подвода и сканирования.

7. Система управления:

- СЗМ контроллер;
- Компьютер;
- Интерфейсные платы.

Основные узлы ИНТЕГРА Спектра представлены на блок-схеме, приведенной на рисунке 2.4.

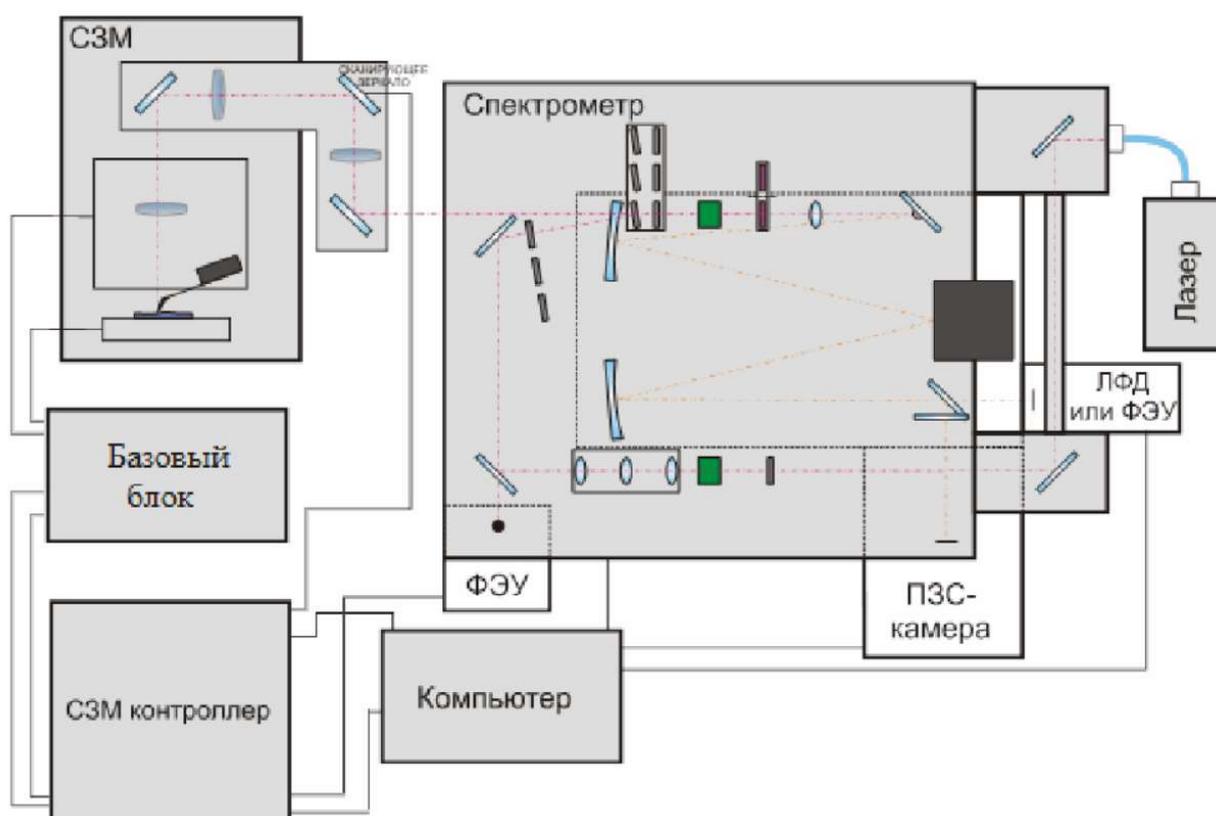


Рисунок 2.4 – Блок-схема ИНТЕГРА Спектра [29]

При проведении измерений спектров фотостимулированной люминесценции образцов $Al_2O_3:Cr$ применялся твердотельный лазер модели LM473, входящий в состав ИНТЕГРА Спектра. Технические характеристики твердотельного лазера приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Технические характеристики твердотельного лазера LM473 [29]

Параметр	Значение
Поперечная мода	TEM00
Длина волны	473 нм
Поляризация	Линейная
Степень поляризации	100:1
Выходная мощность	до 50 мВт
Расходимость пучка ($1/e^2$)	< 1,2 мрад
Нестабильность мощности излучения	< 3%
Время выхода на рабочий режим	< 15 мин
Диапазон рабочих температур	10 - 40 °С

2.2.1 Принцип работы оптической спектральной системы

Функционирование установки ИНТЕГРА Спектра поясняется упрощенной оптической схемой, изображенной на рисунке 2.5.

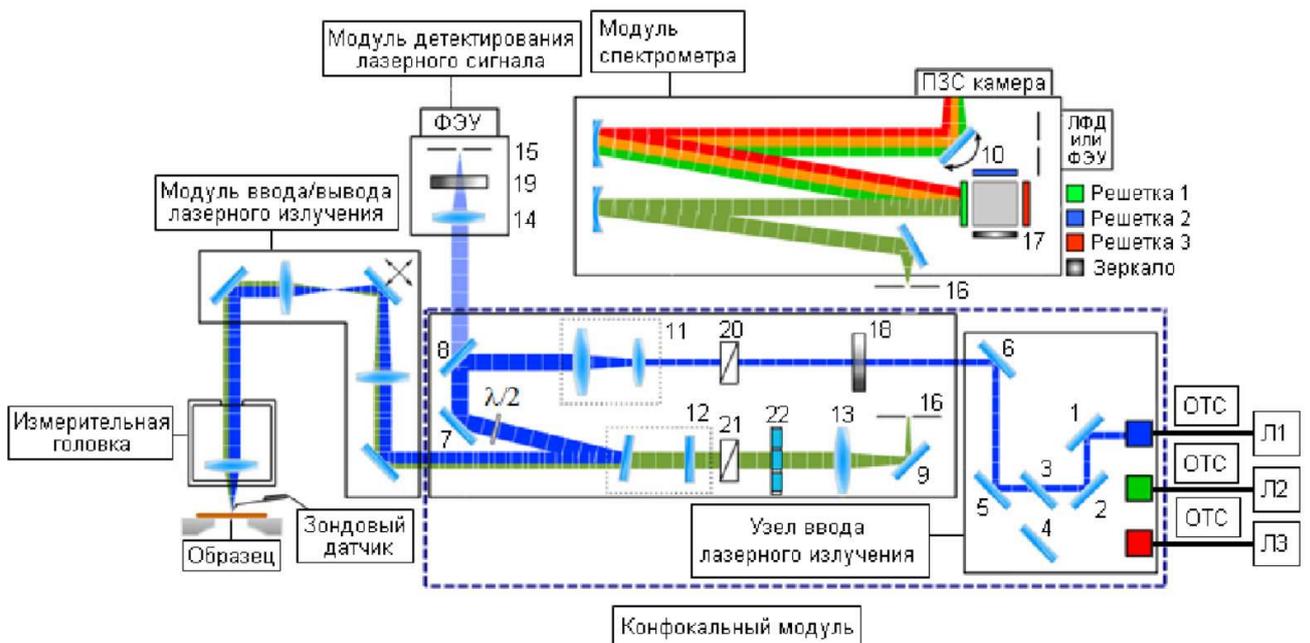


Рисунок 2.5 – Упрощенная оптическая схема работы установки ИНТЕГРА Спектра. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 – зеркала; 8 - 97% зеркало; 11 – расширитель пучка; 12 – три набора сменных целевых и режекторных фильтров; 13, 14 – объективы; 15, 16 – точечная диафрагма; 17 – дифракционных решетки; 18, 19 – нейтральный фильтр переменной плотности; 20, 21 – поляризатор; 22 – кассета с фильтрами; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель; ЛФД – лавинный фотодиод; ОТС – оптоволоконная транспортная система; Л1, Л2, Л3 – лазеры [29]

Лазерный луч, проходя через оптоволоконную транспортную систему, попадает в узел ввода лазерного излучения. Далее с помощью зеркал узла ввода направляется через нейтральный фильтр переменной плотности 18 и поляризатор 20 к расширителю пучка 11 лазерного излучения. Автоматически перенастраиваемый расширитель пучка 11 обеспечивает настройку диаметра и коллимированности лазерного луча для всего набора используемых лазеров. Зеркала 7, 8 направляют лазерный луч на режекторный фильтр 9. Отраженный от режекторного фильтра 12 лазерный луч направляется в модуль ввода-вывода лазерного излучения и, проходя через объектив измерительной головки, фокусируется на образце.

Регистрация отраженного от образца излучения производится по лазерной оптической схеме или спектральной оптической схеме, независимо от способа ввода излучения.

Лазерная оптическая схема предназначена для получения конфокального изображения образца в лазерном свете. Также при помощи лазерной оптической схемы можно прецизионно совмещать в одной точке острие зонда и сфокусированный лазерный луч.

Отраженное от образца лазерное излучение, проходя через объектив измерительной головки, коллимируется и передается обратно в спектрометр, полностью отражаясь от режекторного фильтра 12 и зеркала 7. Часть излучения ($\sim 3\%$) проходит через зеркало 8 и направляется в модуль детектирования лазерного излучения. Объектив 17 фокусирует луч на регулируемой точечной диафрагме 15. При необходимости интенсивность лазерного излучения, направленного на ФЭУ, регулируется нейтральным фильтром переменной плотности кругового типа 19.

Получение 2- и 3-мерного лазерного конфокального изображения образца производится путем сканирования образцом с одновременной записью интенсивности отраженного лазерного излучения, регистрируемого ФЭУ.

Спектральная оптическая схема предназначена для получения конфокального изображения образца в свете вторичного излучения, имеющим спектральный состав, отличный от спектра излучения возбуждающего лазера.

Вторичное излучение, испускаемое образцом, коллимируется объективом измерительной головки и направляется в спектрометр, проходя через поляризатор и кассету с фильтрами. Излучение проходит через режекторный фильтр 12, и объективом 13 фокусируется на регулируемой точечной диафрагме 16 установленной на входе монохроматора. Спектральный состав вторичного излучения может анализироваться с помощью ПЗС-камеры или же интенсивность отдельной линии спектра

может определяться с помощью ЛФД или ФЭУ (в т.ч. в режиме счета фотонов) – при соответствующем повороте дифракционной решетки 17 и определенном положении зеркала 10. Если в монохроматор вместо решетки установлено зеркало, требуемая длина волны выбирается полосовым фильтром, устанавливаемым в кассету фильтров 22.

2.3 Методика подготовки образцов к послерадиационным исследованиям

Исследуемые образцы изначально представляют собой пластинки монокристалла $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$, с исходными размерами $10 \times 10 \times 0,4$ мм³. Часть пластинок облучалась пучком быстрых тяжелых ионов Хе с энергией 167 МэВ и флюенсом $3,4 \cdot 10^{14}$ см⁻², другая часть оставалась необлученной. Облучение производилось на ускорительном комплексе ИЦ-100 [30]. Общий вид данного ускорительного комплекса представлен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Общий вид ускорительного комплекса ИЦ-100 [30]

Для проведения измерений спектров фотостимулированной люминесценции $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ методом ЛКСМ требовалось произвести подготовку образцов к исследованиям. Для этого пластинки $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ распиливались на прямоугольные части, размерами примерно $0,5 \times 1,6 \times 0,4$ мм³, после чего полученные кусочки по два помещались в специальный титановый держатель, причем так, чтобы облученная сторона одного монокристалла $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ прилегала к облученной стороне другого (рисунок 2.7).

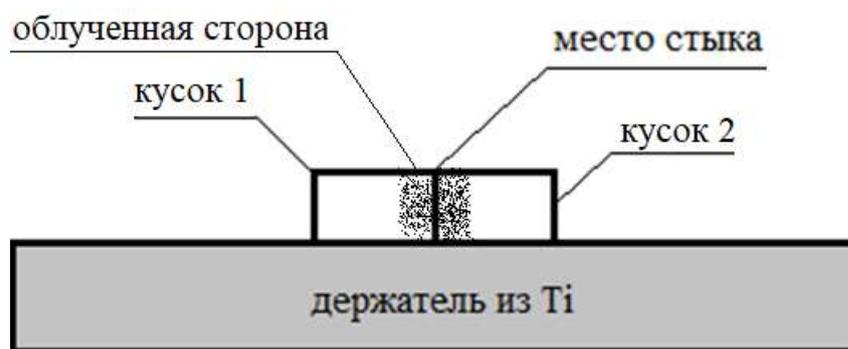


Рисунок 2.7 – Схематическое изображение $Al_2O_3: Cr$, размещенного в держателе

Как видно из рисунка, прямоугольные кусочки с одной стороны держателя обычно выпирают на некоторое расстояние. Нижнюю сторону полученной сборки, показанную на рисунке, назовем условно равной.

Далее требуется провести склейку полученной сборки. Для этого сборка равной стороной опускается в специальную смесь эпоксидной смолы с углеродной пудрой (Araldite), которая, предварительно разогревается на плитке при температуре $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ и переходит из порошкообразного состояния в расплавленное. Сборка находится в ней, пока данная смесь не затвердеет (примерно 1,5 часа) при той же температуре $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. В итоге получаем образец для исследования, изображение которого после процесса затвердения смеси приведено на рисунке 2.8.

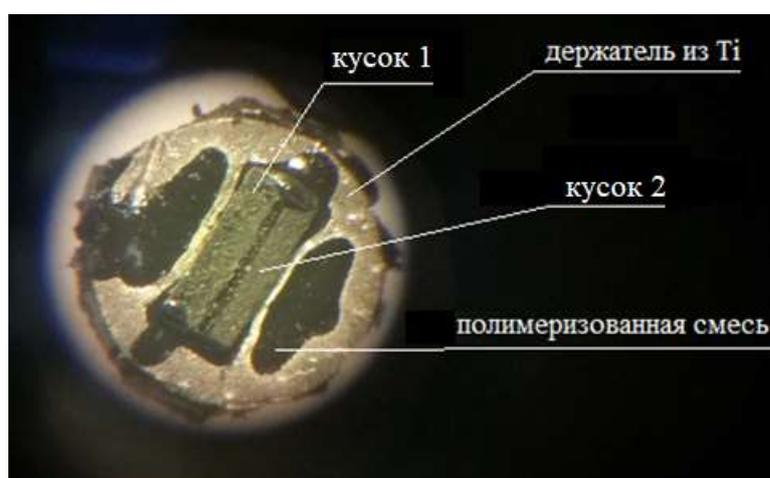


Рисунок 2.8 – Микроскопическая фотография образца после склейки. Фотография сделана через оптический микроскоп. На фотографии представлена сторона с выпирающими образцами

После этого образцы шлифуются наждачной бумагой Р 800 с ровной стороны с целью удаления полимеризованной смеси. Данное загрязнение требуется удалить полностью.

Далее происходит механическая обработка стороны с выпирающими монокристаллами Al_2O_3 : Сг наждачной бумагой различной зернистости (Р 400, Р 800, Р 1200). После этого образцы полируются с применением алмазной пасты с зернистостью 9 мкм; 6 мкм; 3 мкм; 1 мкм; 0,25 мкм.

Конечным этапом процесса подготовки образцов к исследованиям является очистка ацетоном с целью удаления оставшихся загрязнений.

Микроскопическая фотография поверхности образца, полученного с помощью данной методики подготовки приведена на рисунке 2.9 (в).

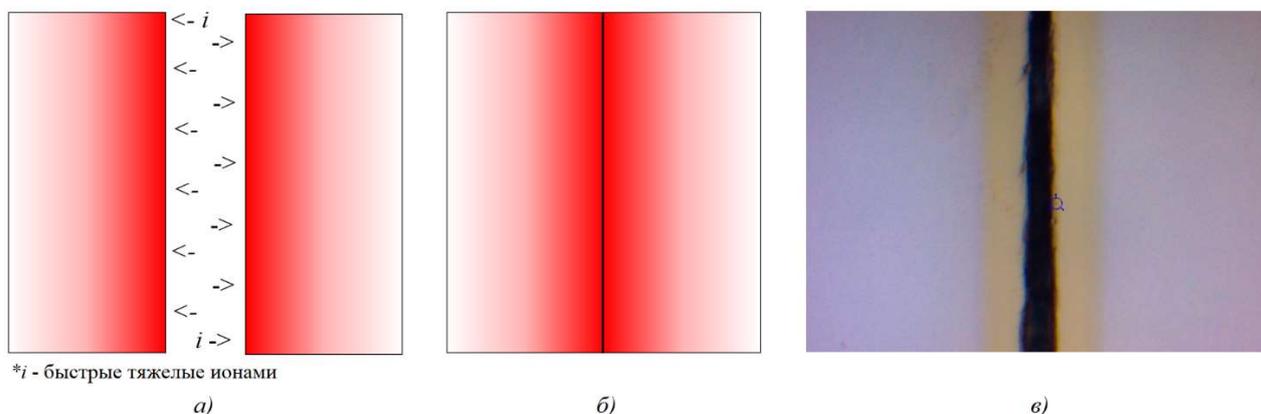


Рисунок 2.9 – Схема и вид полученного образца: а) облученные стороны образца; б) схема образца; в) микроскопическая фотография поверхности образца, сделанная с помощью лазерного конфокального сканирующего микроскопа в составе ИНТЕГРА Спектра

После проведения процесса подготовки образцов к исследованиям можно приступить непосредственно к измерениям спектров фотостимулированной люминесценции.

2.4 Методика определения профилей остаточных напряжений в образцах $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$

После измерения спектров фотостимулированной люминесценции определялись профили внутренних механических напряжений в образцах через пьезоспектроскопический эффект (см. раздел 1.4). Рассмотрим методику определения профилей остаточных напряжений в образцах $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$ подробнее.

Экспериментальная часть работы заключается в измерении спектров фотостимулированной люминесценции R-линий в различных точках фокусировки лазерного луча по глубине образцов. Из каждого спектра в дальнейшем определялся сдвиг R-линий относительно положения R-линий в спектрах люминесценции необлученной части образцов. По полученным значениям сдвигов рассчитывается уровень внутренних механических напряжений в образцах через соотношения, приведенные в разделе 1.4.

На рисунке 2.10 (б) приведены двумерные спектры люминесценции по глубине необлученного $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$.

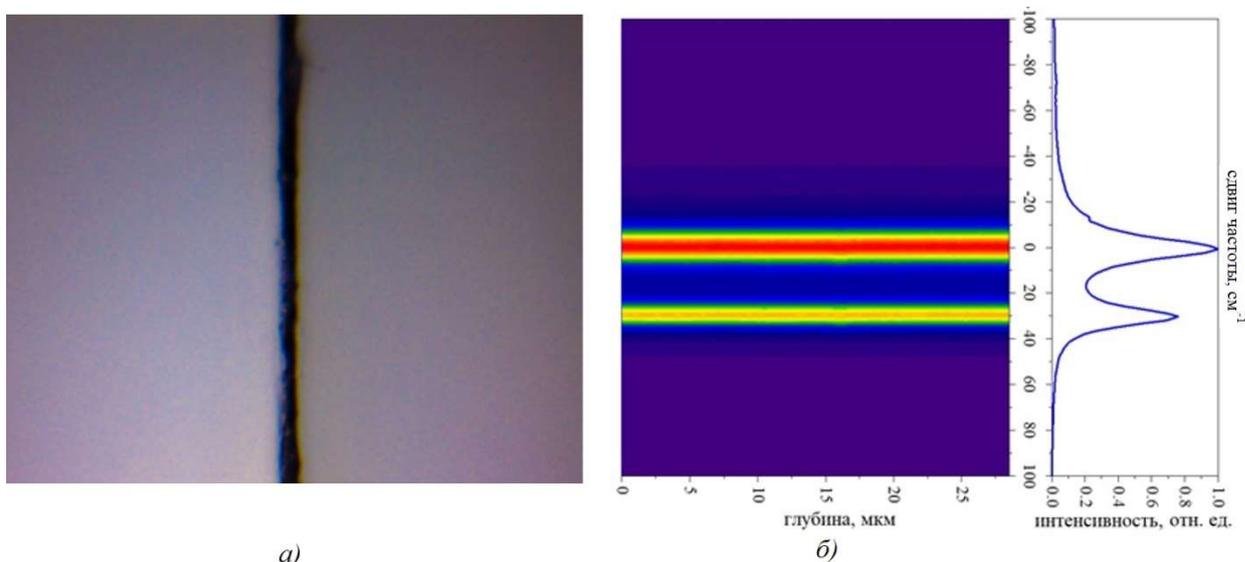


Рисунок 2.10 – а) микроскопическая фотография образца; б) двумерные спектры люминесценции по глубине образца. Глубина 0 мкм соответствует левому краю правого монокристалла $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$

Из данного рисунка видно, что в необлученном образце смещение R-линий люминесценции отсутствует, что говорит об отсутствии механических напряжений.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ61	Комарова Диана Андреевна

Школа	ИШЯТ	Отделение школы (НОЦ)	Б. П. Вейнберга
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	– стоимость сырья и материалов; – размер окладов и выплат исполнителям проекта.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	– согласно проектной документации.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	– отчисления во внебюджетные фонды.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	– разработка анализа конкурентоспособности.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	– планирование работ; построение иерархической структуры ВКР
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	– график проведения ВКР – диаграмма Ганта; – бюджет научного исследования; – анализ потенциальных рисков.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	– оценка сравнительной и финансовой эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *Сегментирование рынка*
2. *Оценка конкурентоспособности технических решений*
3. *Матрица SWOT*
4. *График проведения и бюджет НТИ*
5. *Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ*
6. *Потенциальные риски*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Меньшикова Е. В.	к. филос. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ61	Комарова Диана Андреевна		

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка.

Сегмент рынка – особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

Для коммерческих организаций критериями сегментирования могут быть: месторасположение, отрасль, выпускаемая продукция, размер и др.

Из выявленных критериев целесообразно выбрать два наиболее значимых для рынка. На основании этих критериев строится карта сегментирования рынка.

Карта сегментирования рынка некоторых исследований взаимодействия быстрых тяжелых ионов на материалы, проводимых в мире представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Карта сегментирования рынка некоторых актуальных в настоящее время исследований

		Карта сегментирования			
		Области применения			
		Атомная промышленность	Микроэлектроника	Оптика	Машиностроение и космическая промышленность
Исследуемые материалы	Сталь				
	Ni				
	Al ₂ O ₃ : Cr				
	SiO ₂				
	Органика				

Исследование 1	Исследование 2	Исследование 3	Исследование 4	Исследование 5

Основные сегменты рынка – это атомная промышленность, а именно отрасль производства ядерного топлива, микроэлектроника, оптика, машиностроение и космическая промышленность. Проводимое исследование, а именно исследование Al₂O₃: Cr нацелено в первую очередь на атомную промышленность. Привлекательными сегментами в будущем является микроэлектроника, оптика.

Из данной карты видно, что «исследование 3» - исследование взаимодействия быстрых тяжелых частиц на Al₂O₃: Cr имеет наибольшую область применения, следовательно, большое количество потенциальных потребителей результатов исследования.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Для проведения анализа конкурентоспособности используется оценочная карта, приведенная в таблице 4.2. В качестве основной разработки K_{ϕ} выбрано «исследование 3» (исследование взаимодействия быстрых

тяжелых ионов на $Al_2O_3: Cr$). В качестве конкурирующих разработок были приняты K_1 – «исследование 4» (исследование взаимодействия быстрых тяжелых ионов на оксид кремния), K_2 – «исследование 1» (исследование взаимодействия быстрых тяжелых ионов на сталь). Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

В таблице 4.2 представлена оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Таблица 4.2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	К1	К2
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические оценки критерия ресурсоэффективности							
Простота используемого оборудования	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
Надежность используемого оборудования	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
Безопасность исследования	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Требования к квалификации персонала	0,2	4	3	3	0,8	0,6	0,6
Экономические оценки критерия ресурсоэффективности							
Востребованность на рынке	0,2	5	3	3	1	0,6	0,6
Цена материалов	0,2	3	5	4	0,6	1	0,8
Финансирование исследований	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
Итого	1				4,3	3,6	3,5

Из данной оценочной карты видно, что «исследование 3» имеет основное конкурентное преимущество в позициях простоты используемого оборудования, востребованности на рынке и финансировании исследования. Это связано с тем, что такой материал, как $Al_2O_3: Cr$ может применяться во многих производственных отраслях, следовательно, спрос на него всегда будет велик и уровень проникновения разработок на рынок, связанных с данным материалом всегда будет высок. Кроме того, $Al_2O_3: Cr$ является типичным представителем материалов, обладающих пьезоспектроскопическими свойствами, что позволяет использовать относительно простые и безопасные методы исследования.

4.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды исследования. Данный анализ проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые появились и могут появляться в его внешней среде.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должно помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 4.3. Описание сильных и слабых сторон исследования, его возможностей и угроз

<p>Сильные стороны (Strengths):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Большая сфера применения результатов исследования; 2. Высокая конкурентоспособность данного исследования (см. табл. 4.2); 3. Стабильное финансирование со стороны предприятия; 4. Наличие необходимого оборудования и комплектующих; 5. Актуальность исследования; 6. Высокая квалификация персонала, непосредственно участвующего в исследовании. 	<p>Слабые стороны (Weaknesses):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемых в процессе проведения научного исследования; 2. Ограничение во времени; 3. Недостаточное развитие представлений о механизмах трекобразования в материалах, в частности в диэлектриках.
<p>Возможности (Opportunities):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Получение дополнительных грантов, таких, как РФФИ и т.п.; 2. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые в исследовании; 3. Появление дополнительного спроса на результаты исследования со стороны других стран. 	<p>Угрозы (Threats):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Снижение финансирования со стороны предприятия; 2. Ограничение на ввоз из других стран необходимых материалов и комплектующих для исследований.

В таблице 4.4 приведено сопоставление сильных сторон и возможностей проводимого исследования.

Таблица 4.4. Сопоставление сильных сторон и возможностей исследования

		Сильные стороны					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
Возможности	V1	0	-	+	+	0	-
	V2	-	-	0	+	-	-
	V3	+	+	+	+	+	-

Из данной таблицы видно, что благоприятными направлениями реализации исследования являются V1V3C3C4, V2C4, V3C1C2C3C4C5.

В таблице 4.5 приведено сопоставление слабых сторон и возможностей исследования.

Таблица 4.5. Сопоставление слабых сторон с возможностями исследования

		Слабые стороны			
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Возможности	V1	0	+	-	-
	V2	-	+	-	-
	V3	-	0	-	-

Из таблицы 4.5 видно, что направление ликвидации слабых сторон исследования – это V1V2Сл2.

В таблице 4.6 приведено сопоставление сильных сторон и угроз исследования.

Таблица 4.6. Сопоставление сильных сторон и угроз исследования

		Сильные стороны					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
Угрозы	У1	-	0	+	0	-	-
	У2	-	-	-	+	-	-

Из данной таблицы видно, что существуют направления У1С3, У2С4, по которым исследование может лишиться своих сильных сторон.

Таблица 4.7 – Сопоставление слабых сторон и угроз исследования

		Слабые стороны			
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
Угрозы	У1	+	+	+	-
	У2	+	0	+	-

Из данной таблицы видно, что У1Сл1Сл2Сл3 – наиболее проигрышный путь развития исследования. Другой проигрышный путь развития – У2Сл1Сл3.

Таблица 4.8. Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны (Strengths):	Слабые стороны (Weaknesses):
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Большая сфера применения результатов исследования; 2. Высокая конкурентоспособность данного исследования по отношению к подобным исследованиям с другими материалами (см. табл. 4.2) из-за широкого применения Al_2O_3: Cr; 3. Финансирование со стороны предприятия; 4. Наличие необходимого оборудования; 5. Актуальность исследования; 6. Высокая квалификация персонала, непосредственно участвующего в исследовании. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемых в процессе проведения научного исследования; 2. Ограничение во времени; 3. Недостаточное развитие представлений о механизмах трекообразования в материалах, в частности в диэлектриках.

Таблица 4.8. Матрица SWOT-анализа (продолжение)

<p>Возможности (Opportunities):</p> <p>1. Получение дополнительных грантов, таких, как РФФИ и т.п.;</p> <p>2. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые в исследовании;</p> <p>3. Появление дополнительного спроса на результаты исследования.</p>	<p>За счет получения дополнительных грантов снижения таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые в научном исследовании возможно расширить имеющуюся техническую базу для исследований. Появление дополнительного спроса на результаты исследования позволит увеличить потребительскую аудиторию, что в свою очередь повысит конкурентоспособность данного исследования.</p>	<p>Дополнительное финансирование и снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые в исследованиях, позволит преодолеть проблему стоимости исследований.</p>
<p>Угрозы (Threats):</p> <p>1. Снижение финансирования со стороны предприятия (основного источника финансирования исследования);</p> <p>2. Ограничение на ввоз из других стран необходимых материалов и комплектующих для исследований.</p>	<p>Снижение финансирования со стороны предприятия повлияет на техническую базу исследования так, как, сложнее будет выделять деньги на расходные материалы, например, на титановые держатели, алмазную пасту и комплектующие для лазерного конфокального сканирующего микроскопа, используемого в исследовании.</p>	<p>Снижение финансирования и ограничение на импорт необходимого сырья и материалов может привести к тому, что сроки поставок увеличатся, что приведет к увеличению времени проведения исследования.</p>

4.1.4 Оценка готовности исследования к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилось научное исследование, полезно оценить степень его готовности к коммерциализации. Для этого используется специальная форма, представленная в таблице 4.9.

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению отличается. Так, при оценке степени проработанности научного исследования 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного исследования к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i, \quad (4.2)$$

где $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научного исследования и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение $B_{\text{сум}}$ получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

Таблица 4.9. Оценка степени готовности научного исследования к коммерциализации

№	Наименование	Степень проработанности научного исследования	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	5
3	Определены отрасли и технологии для предложения на рынке	5	5
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	1	1
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	5	4
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	1
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10	Разработана стратегия реализации научной разработки	1	1
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	3	1
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	2	1
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	2
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Проработан механизм реализации научного проекта	1	1
	Итого баллов	35	32

Из таблицы 4.9 видно, что степень коммерциализации научного исследования на настоящий момент является средней, знания разработчика также на среднем уровне. Это связано с тем, что исследование носит в основном фундаментальный характер.

4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Выделяют следующие методы коммерциализации научных разработок.

1. Торговля патентными лицензиями, т.е. передача третьим лицам права использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе. При этом в патентном законодательстве выделяются виды лицензий: исключительные (простые), исключительные, полные лицензии, сублицензии, опционы.

2. Передача ноу-хау, т.е. предоставление владельцам ноу-хау возможности его использовать другим лицом, осуществлением путем раскрытия ноу-хау.

3. Инжиниринг как самостоятельный вид коммерческих операций предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика, усовершенствованием имеющихся производственных процессов вплоть до внедрения изделия в производство и даже сбыта продукции.

4. Франчайзинг, т.е. передача или переуступка (на коммерческих условиях) разрешения продавать чьи-либо товары или оказывать услуги в некоторых областях.

5. Организация собственного предприятия.

6. Передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия.

7. Организация совместного предприятия, т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия.

8. Организация совместных предприятий, работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».

Проанализировав перечисленные методы коммерциализации, можно прийти к выводу, что наиболее подходящие методы коммерциализации результатов исследования – это передача ноу-хау, так как исследование носит более фундаментальный характер, нежели прикладной, результатом которого является новое знание. Данный метод коммерциализации поможет привлечь больше внимания к проблеме самого исследования, что в дальнейшем поможет привлечь новые ресурсы для дальнейших работ.

4.2 Инициация исследования

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового исследования. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны исследования, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного исследования. Данная информация закрепляется в Уставе исследования.

Устав данного научного исследования имеет следующую структуру:

1. Цели и результат проекта;
2. Организационная структура проекта;
3. Ограничения и допущения проекта.

В таблице 4.10 представлены заинтересованные стороны данного научного исследования.

Таблица 4.10. Заинтересованные стороны исследования

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
ОИЯИ (г. Дубна, Московская обл.)	Проведение исследований по изучению поведения материалов, используемых в ядерных реакторах при воздействии на них осколков деления. Прогноз поведения материалов в радиационно-агрессивной среде. Разработка способов модификации данных материалов с целью повышения радиационной стойкости.
Исполнители научного исследования	Повышение точности метода исследования остаточных механических напряжений в образцах $Al_2O_3: Cr$ после облучения высокоэнергетическими ионами Хе, что позволит получать более подробную информацию о радиационных повреждениях в материалах методом лазерной сканирующей конфокальной микроскопии
Компании, разрабатывающие ядерное топливо	Прогноз долговременной радиационной стойкости материалов. Рекомендации к используемым материалам. Возможность улучшения используемых материалов или нахождение альтернатив с лучшими характеристиками
МАГАТЭ	Прогноз долговременной радиационной стойкости материалов

Информация об иерархии целей исследования и критериях достижения целей представлена в таблице 4.11.

Таблица 4.11. Цели и результат проекта

Цели	Повысить точность метода исследований радиационной повреждаемости $Al_2O_3: Cr$ при воздействии на него высокоэнергетических ионов Хе
Ожидаемые результаты	Более детальная информация о профилях остаточных механических напряжений, которая позволяет судить о поведении материала в радиационно-агрессивной среде.
Критерии приемки результата	Новая точность метода исследования выше, чем была ранее.
Требования к результату	Полученные результаты исследования должны быть адекватными, соответствовать в общем более ранним результатам, быть достаточно обоснованными теоретически.

Информация о рабочей группе исследования приведена в таблице 4.12.

Таблица 4.12. Информация о рабочей группе исследования

№	ФИО, основное место работы, должность	Роль в исследовании	Функции	Трудозатраты, час.
1	Скуратов В. А., начальник сектора ионно- имплантационных нанотехнологий и радиационного материаловедения, ЛЯР ОИЯИ	Руководитель проекта	Постановка задачи исследования, предоставление необходимых методических материалов и материалов для исследований, контроль за полученными результатами	160

Таблица 4.12. Информация о рабочей группе исследования (продолжение)

№	ФИО, основное место работы, должность	Роль в исследовании	Функции	Трудозатраты, час.
2	Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)	Заказчик проекта	Формирование глобальной цели исследования, ограничений по срокам и затратам, осуществление укрупненного анализа исследований по показателям сроков освоения и финансированию	50
3	Консультанты по экономическому разделу, разделу социальной ответственности, разделу на иностранном языке, рецензенты работы, НИ ТПУ	Эксперт проекта	Консультации по выполнению и проверка соответствующих выполненных разделов диссертации	32
4	Кирилкин Н. С., младший научный сотрудник научно-экспериментального отдела прикладных исследований на пучках тяжелых ионов, ЛЯР ОИЯИ;	Лаборант, исполнитель по проекту	Обучение исполнителя работе с требуемым оборудованием, проведение исследований, помощь в анализе полученных результатов	344
5	Комарова Д. А., студент ИШЯТ НИ ТПУ	Исполнитель по проекту	Подготовка образцов к исследованиям, проведение исследований, анализ полученных результатов, написание диссертации	624
6	Персонал на ускорителе циклотронного типа ИЦ-100	Субподрядчики	Получение материалов исследования (облучение монокристалла рубина ионами Хе для дальнейших исследований)	10
Итого:				1220

Ограничения исследования представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13. Ограничение исследования

Фактор	Ограничения / допущения
Бюджет исследования	3125000 руб./год
Источники финансирования	Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)
Сроки проведения исследования	4 календарных месяца
Дата утверждения плана управления исследования	29.01.18.
Дата завершения исследования	29.05.18.

4.3 Планирование управления научным исследованием

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

4.3.1 Иерархическая структура работ исследования

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего исследования.

Структура исследования представлена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Иерархическая структура исследования

4.3.2 Контрольные события исследования

В таблице 4.14 представлены контрольные события проводимого исследования.

Таблица 4.14. Контрольные события проводимого исследования

№	Контрольное событие	Дата	Результат
1	Составление технического задания	29.01.2018 - 1.02.2018	Техническое задание на выполнение магистерской диссертации
2	Ознакомление с научной и методической литературой	29.01.18 - 25.02.18	Составление литературного обзора
3	Подготовка образцов для исследований	26.02.18 - 15.04.18	Получение готовых к исследованию образцов облученных материалов
4	Исследование образцов	16.04.18 - 29.04.18	Исследование спектров люминесценции образцов при помощи конфокальной лазерной сканирующей микроскопии
5	Анализ полученных результатов	30.04.18 - 13.05.18	Получение требуемых аналитических зависимостей и соотношений, по которым можно сделать вывод о механических свойствах материала образцов в зависимости от радиационной повреждаемости
6	Описание и обоснование полученных результатов	14.05.18 - 25.05.18	Пояснительная записка к магистерской диссертации

4.3.3 План исследования

В таблице 4.15 представлен календарный план исследования.

Таблица 4.15. Календарный план исследования

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала	Дата окончания	Состав участников
1	Составление технического задания	4	29.01.2018	01.02.2018	Скуратов В. А.
2	Ознакомление с научной и методической литературой	28	29.01.2018	25.02.2018	Комарова Д. А.
3	Подготовка образцов для исследований	49	26.02.2018	15.04.2018	Комарова Д. А., Кирилкин Н. С.
4	Исследование образцов	14	16.04.2018	29.04.2018	Комарова Д. А., Кирилкин Н. С.
5	Анализ полученных результатов	14	30.05.2018	13.05.2018	Комарова Д. А., Скуратов В. А.
6	Описание и обоснование полученных результатов	12	14.05.2018	25.05.2018	Скуратов В. А., Комарова Д. А.
Итого:		121			

Календарный план-график (диаграмма Ганта) проводимого исследования представлена в таблице 4.16.

Таблица 4.16. Календарный план-график проводимого исследования

Код работ	Вид работы	Исполнитель	Т, кал. дни	Продолжительность выполнения работ															
				январь			февраль			март			апрель			май			
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление технического задания	Руководитель	4		■														
2	Ознакомление с научной и методологической литературой	Инженер-дипломник	28		■	■	■												
3	Подготовка образцов для исследований	Инженер-дипломник, лаборант	49					■	■	■	■	■							
4	Исследование образцов	Инженер-дипломник, лаборант	14											■	■				
5	Анализ полученных результатов	Инженер-дипломник, руководитель	14														■	■	
6	Описание и обоснование полученных результатов	Инженер-дипломник, руководитель	12															■	■

4.3.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице 4.17.

Таблица 4.17. Бюджет научного исследования

Сырье, материалы, покупные изделия, руб.	Специальное оборудование, руб.	Основная з.п., руб.	Отчисления на социальные нужды, руб.	Научные и производственные командировки, руб.	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями, руб.	Накладные расходы, руб.	Итого, руб., руб.
13387,50	116636,94	144096,19	43517,04	14409,62	252200,00	3048,11	587295,40

4.3.4.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данному исследованию (таблица 4.18).

Таблица 4.18. Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Пластины монокристалла Al ₂ O ₃ :Cr	1 см x 1 см	1	7650	7650
Пластины монокристалла Al ₂ O ₃	1 см x 1 см	1	5100	5100
Всего за материалы				12750
Транспортно-заготовительные расходы (3 - 5%)				637,5
Итого по статье См				13387,5

4.3.4.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по данному исследованию (таблица 19).

Таблица 4.19. Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Количество единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс. руб	Срок эксплуатации, лет	Время использования, дни	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Зондовая Нано Лаборатория ИНТЕГРА Спектра компании NT-MDT	1	9900	5	11	98108,11
2	Персональный компьютер	1	80	5	46	3315,32
Всего за оборудование						101423,42
Затраты по доставке и монтажу (15%)						15213,51
Итого						116636,94

4.3.4.3 Основная заработная плата

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.3)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда.

Для расчета заработной платы требуется знать действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, который представлен в таблице 4.20.

Таблица 4.20. Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер-дипломник	Лаборант
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней выходные дни; - праздничные дни.	119	119	119
Потери рабочего времени: - отпуск; -невыходы по болезни	24	24	24
Действительный годовой фонд рабочего времени	222	222	222

Основная заработная плата руководителя, инженера, лаборанта от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.4)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (см. таблица 4.20);

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_D}, \quad (4.5)$$

где Z_M – месячный должностной оклад;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске 24 дня $M=11,2$);

F_D – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. д.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_б \cdot (k_{np} + k_D) \cdot k_p, \quad (4.6)$$

где $Z_б$ – базовый оклад, руб.;

k_{np} – премиальный коэффициент (определяется Положением об оплате труда);

k_D – коэффициент доплат и надбавок;

k_p – районный коэффициент (для Московской области $k_p = 1$).

В таблице 4.21 приведены результаты расчета основной заработной платы.

Таблица 4.21. Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_б$, руб	k_{np}	Z_M , руб	$Z_{дн}$, руб	Тр, раб. дн.	$Z_{осн}$, руб
Руководитель	45600,00	1,10	50160,00	2530,59	20,00	50611,89
Лаборант	25200,00	1,00	25200,00	1271,35	43,00	54668,11
Инженер-дипломник	9864,00	1,00	9864,00	497,64	78,00	38816,17

4.3.4.4. Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды (30,2 %).

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{дон}), \quad (4.7)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Расчет отчислений на социальные нужды представлен в таблице 4.23.

Таблица 4.22. Расчет отчислений во внебюджетные фонды

Заработная плата	Руководитель	Инженер-дипломник	Лаборант
Основная заработная плата	50611,89	38816,17	54668,11
Отчисления во внебюджетные фонды	15284,79	11722,48	16509,77
Итого по статье:	43517,04		

4.3.4.5 Научные и производственные командировки

В эту статью включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10 % от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы.

В таблице 4.24 представлены расчеты отчислений по данной статье.

Таблица 4.23. Отчисления по статье научные и производственные командировки

	Руководитель	Инженер-дипломник	Лаборант
Зарплата исполнителя	5061,19	3881,62	5466,81
Итого:	14409,62		

4.3.4.6 Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

В данную статью включается стоимость контрагентных работ, т.е. работ, выполненных сторонними организациями и предприятиями по заказу

данной научно-технической организации, результаты которых используются в конкретном научно-техническом исследовании. Кроме того, на эту статью расходов относят оплату консультаций, использование Internet и т.д. Величина этих расходов определяется по договорным условиям.

В таблице 4.25 представлены отчисления по данной статье.

Таблица 4.24. Отчисления по статье оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

Организация	Работа	Стоимость за ед. времени	Время	Стоимость, руб.
Ускоритель циклотронного типа ИЦ-100	Облучение монокристаллов $Al_2O_3: Cr$	25000 руб./час	10 час.	250000
Wifire	Интернет	550 руб./мес.	4 мес.	2200
Итого				252200

4.3.4.7. Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относят расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

В таблице 4.25 представлены затраты на электроэнергию

Таблица 4.25. Затраты на электроэнергию

	Мощность, кВт	Время работы, час.	Тариф, руб./кВт*час	Расход, руб.
ЗНЛ ИНТЕГРА Спектра	4,5	88	5,8	2296,80
ПК	0,352	368		751,31
Итого:				3048,11

4.3.5 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски исследования включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информацию по данному разделу сведена в таблицу 4.26.

Таблица 4.26. Реестр рисков

Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1 - 5)	Влияние риска (1 - 5)	Уровень риска	Способы смягчения	Условия наступления
Неисправность оборудования	Некорректные результаты исследования	2	5	средний	Проверка оборудования, запас фонда времени исследования на починку оборудования	Нарушение правил эксплуатации оборудования

Таблица 4.26. Реестр рисков (продолжение)

Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1 - 5)	Влияние риска (1 - 5)	Уровень риска	Способы смягчения	Условия наступления
Плохое качество образцов	Сложности в анализе образцов и получении результатов	3	3	средний	Обучение персонала, контроль	Невнимательность персонала в процессе подготовки образцов
Несвоевременное финансирование	Увеличение количества требуемого времени для исследования, прекращение исследования	1	3	низкий	Получение дополнительных грантов на исследование	Изменение политики предприятия в отношении данного исследования, следовательно, прекращение финансирования

Таблица 4.26. Реестр рисков (продолжение)

Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1 - 5)	Влияние риска (1 - 5)	Уровень риска	Способы смягчения	Условия наступления
Ограничение на импорт необходимых материалов и комплектующих для исследований	Нехватка качественного сырья и материалов для исследования, увеличение стоимости исследования	1	3	низкий	Нахождение аналогов на российском рынке и рынках дружественных стран	Изменение политики государства в отношении некоторых стран, в которых заготавливается необходимое сырье и оборудование

4.4 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех и более вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки можно определить через сравнение стоимости данного исследования со стоимостью аналогичного:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}}, \quad (4.8)$$

где I_{ϕ}^p – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{\max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^a$$

$$I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^p$$
(4.9)

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (таблица 4.27).

Таблица 4.27. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения исследования

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущее исследование	Аналог
Способствует росту производительности труда	0,1	3	3
Удобство в эксплуатации	0,15	4	4
Помехоустойчивость	0,15	5	4
Энергосбережение	0,2	4	4
Надежность	0,25	5	4
Материалоемкость	0,15	4	4
Итого:	1		

$$I_{mi} = 0,1 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,3$$

$$A = 0,1 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 3,9$$
(4.10)

где I_{mi} – интегральный показатель ресурсоэффективности текущего исследования;

A – интегральный показатель ресурсоэффективности аналогичного исследования ранее с другой геометрией анализа образцов, описанного в работе [7];

Интегральный показатель эффективности разработки и аналога определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p},$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a},$$
(4.11)

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность исследования. Сравнительная эффективность исследования рассчитывается следующим образом:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a},$$
(4.12)

где \mathcal{E}_{cp} – сравнительная эффективность проекта;

$I_{финр}^p$ – интегральный показатель разработки;

$I_{финр}^a$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Сравнительная эффективность исследования представлена в таблице 4.28.

Таблица 4.28. Сравнительная эффективность исследования

№	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,9	4,3
3	Интегральный показатель эффективности	3,9	4,3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,1	

Список литературы

1. Комаров Ф. Ф. Нано- и микроструктурирование твёрдых тел быстрыми тяжёлыми ионами. УФН, 187:5 (2017), 465–504; Phys. Usp., 60:5 (2017), 435–471. Каплянский А.А. и Пржевуский А.К. Пьезоспектроскопический эффект в кристаллах рубина.– ДАН СССР. Физика, 1962, т.142, № 2, с.313-316.
2. Ma. Q., Clarke D. R. Stress Measurement in Single-Crystal and Polycrystalline Ceramics Using Their Optical Fluorescence.- J. Am. Ceram. Soc., 1993, v.76, p.1433-1442.
3. V.A. Skuratov, N.S. Kirilkin, Yu.S. Kovalev, T.S. Strukova, K. Havancsak. Depth-resolved photo- and ionoluminescence of LiF and Al₂O₃. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 286 (2012) 61–66.
4. Wesch W., Wendler E. Ion Beam Modification of Solids. Springer International Publishing, №61 (2016). – P. 534.
5. Canut B., Benyagoub A., Marest G., Meftach A., Moncoffre N., Ramos S.M.M., Studer F., Thevenard P., Toulemonde M. Swift-uranium-ion-induced damage in sapphire.- Phys. Rev.B, 1995, v.51, N18, p.12194–12197.
6. Skuratov V.A., Zinkle S.J., Efimov A.E., Havancsak K. Swift heavy ion-induced modification of Al₂O₃ and MgO surfaces.- Nucl. Instr. Meth. B, 2003, v.203, p.136-140.
7. Ковалев, Юрий Сергеевич. Пьезоспектроскопический анализ механических напряжений в Al₂O₃, вызванных воздействием высокоэнергетических ионов : автореферат дис. ... к. ф.-м. н : 01.04.07 / Ковалев Юрий Сергеевич; [Место защиты: Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т)]. - Дубна, 2016. - 18 с.
8. Ritchie G. G., Claussen C. A core plasma model of charged particle track formation in insulators. - Nucl. Instr. Meth., 1982, 198, p. 133-138.

9. Metfah A., Brisard F., Constantini J. M., Dooryhee E., Hage -Ali M., Hervieu M., Stoquert J. P., Studer F., Toulemonde M. Track formation in SiO₂ quartz and the thermal spike mechanism.- Phys. Rev.B, 1994, v.49, p.12457-12463.
10. Toulemonde M., Paumier E., Dufour Ch. Thermal spike model in the electronic stopping power regime. - Radiat. Eff., 1993, v.56, p. 201-206.
11. Wang Z. G., Dufour Ch., Paumier E., Toulemonde M. The S_e sensitivity of metals under swift-heavy-ion irradiation: a transient thermal process. – J. Phys. Condens. Matter, 1994, v.6, p.6733-6750.
12. Dufour Ch., Audouard A., Beuneu F., Dural J., Girard J. P., Hairie A., Levalois M., Paumier E., Toulemonde M., A high-resistivity phase induced by swift heavy-ion irradiation of Bi: a probe for thermal spike damage?– J. Phys. Condens. Matter, 1993, v.5, p.4573-4584.
13. Metfah A., Djebara M., Stoquert J. P., Studer F., Toulemonde M. Electronic stopping power threshold of sputtering in yttrium iron garnet.- Nucl. Instr. Meth, 1996, B107, p.242-245.
14. Toulemonde M., Dufour Ch., Paumier E. Transient thermal process after a high-energy heavy-ion irradiation of amorphous metals and semiconductors.– Phys. Rev.B, 1992, v.46, No. 22, p.14362-14369.
15. Szenes G. Comparison of two thermal spike models for ion–solid interaction. -Nucl. Instr. Meth. B 269 (2011) 174-179.
16. G. Szenes. General Features of Latent Track Formation in Magnetic Insulators Irradiated with Swift Heavy Ions. – Phys. Rev. B 51 (1995).
17. Гольданский В. И., Ланцбург Е. Я., Ямпольский П. А. О гидродинамическом эффекте при прохождении осколков деления через конденсированное вещество. - Письма в ЖЭТФ, 1975, т. 21, с. 365-366.
18. Thompson D. A. High density cascade effects. - Radiat. Eff., 1981, 56, p. 105-108.

19. Skuratov V.A., Kim Jong Gun, Stano J., Zagorski D.L. In-situ luminescence as monitor of radiation damage under swift heavy ion irradiation.- Nucl. Instr. Meth. B, 2006, v.245, Issue 1, p.194-200.
20. Sattonnay G., Moll S., Herbst-Ghysel M., Legros C., Costantini J.M., Thomé L. Nucl. Instr. Meth. B 266(2008), 3052. Title
21. Никифоров С. Н. Сопротивление материалов. Издание четвертое (переработанное, дополненное): учеб. пособие / С. Н. Никифоров. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1966.
22. He, J. and Clarke, D. R. (1995), Determination of the Piezospectroscopic Coefficients for Chromium-Doped Sapphire. Journal of the American Ceramic Society, 78: 1347-1353.
23. Follstaedt D.M., Norman A. K., Doyle B. L., McDaniel F. D. Strain fields around high-energy ion tracks in α -quartz. - Appl. Phys. 100(2006), 064306-6.
24. He Jun and Clarke D. R. Determination of the piezospectroscopic coefficients chromium-doped sapphire.- J. Am. Ceram. Soc., 1995, v.78, N5, p.1347-1353.
25. Grabner L. Spectroscopic Technique for the Measurement of Residual Stress in Sintered Al_2O_3 . J. Appl. Phys. 49[2] (1978), 580-583.
26. Bruneel, J. L., Lassègues, J. C. and Sourisseau, C. In-depth analyses by confocal Raman microspectrometry: experimental features and modeling of the refraction effects. J. Raman Spectrosc., 33 (2002), 815-828.
27. Maruyama Y., Kanematsu W. Confocal volume in laser Raman microscopy depth profiling. Journal of Applied Physics 110 (2011), 103-107.
28. Sheng G., Todd, R. Confocal fluorescence microscopy in alumina-based ceramics: Where does the signal come from?. J. of the European Ceramic Society, 30 (2010), 641-648.
29. ИНТЕГРА Спектра. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / —. Режим доступа: <https://www.ntmdt->

si.ru/data/media/files/manuals/NTEGRA%20SP/NT_Spectra-
UpR_Solar_Px.R.pdf, свободный

30. Ускорительный комплекс IC-100 [Электронный ресурс] / –. Режим доступа: <http://flerovlab.jinr.ru/flnr/ic-100.html>, свободный
31. V.A. Skuratov, J. O'Connell, N.S. Kirilkin, J. Neethling. On the threshold of damage formation in aluminum oxide via electronic excitations. Nucl. Instr. Meth. B 326 (2014) 223–227.
32. J.H. O'Connell, R.A. Rymzhanov, V.A. Skuratov , A.E. Volkov and N.S. Kirilkin. Latent Tracks and Associated Strain in Al₂O₃ Irradiated with Swift Heavy Ions. Nucl. Instr. Meth. B 374 (2016) 97-101.
33. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
34. СанПиН 5804-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.
35. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
36. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Санитарные нормы. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
37. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
38. Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность.