

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.03.02 Опотехника
 Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Короткоживущие дефекты в кристаллах фторида кальция

УДК 548.4:546.41

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В51	Вишнякова Юлия Аркадьевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ	Штанько В.Ф.	д.ф.-м.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко Валентин Сергеевич			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов Сергей Александрович	к.ф.-м.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие естественнонаучные, математические, гуманитарные, общепрофессиональные знания в области оптотехники
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области световой, оптической и лазерной техники, оптического и светотехнического материаловедения и оптических и светотехнических технологий
P3	Применять полученные знания для решения задач, возникающих при эксплуатации новой техники и технологий оптотехники
P4	Владеть методами и компьютерными системами проектирования и исследования световой, оптической и лазерной техники, оптических и светотехнических материалов и технологий
P5	Владеть методами проведения фотометрических и оптических измерений и исследований, включая применение готовых методик, технических средств и обработку полученных результатов
P6	Владеть общими правилами и методами наладки, настройки и эксплуатации оптической, световой и лазерной техники для решения различных задач
<i>Универсальные компетенции</i>	
P7	Проявлять творческий подход при решении конкретных научных, технологических и опытно-конструкторских задач в области оптотехники
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной деятельности
P9	Уметь эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации
P10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научной, педагогической и производственной деятельности
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.03.02 Опотехника
 Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ С.А.Степанов
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
4B51	Вишняковой Юлии Аркадьевне

Тема работы:

Короткоживущие дефекты в кристаллах фторида кальция
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>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></p>	<p>Литература по теме ВКР. Объект исследования – монокристаллы фторида кальция.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <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. Обзор литературы: наведенное оптическое поглощение и люминесценция короткоживущих радиационных дефектов в кристаллах фторида кальция. 2. Спектрально-кинетические характеристики наведенного оптического поглощения в кристаллах фторида кальция 3. Методика импульсной спектроскопии. 4. Анализ полученных результатов.
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Спектры наведенного оптического поглощения фторида кальция при импульсном электронном

	возбуждении 2. Спектральный состав наведенного поглощения в образцах фторида кальция разной предыстории.
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Николаенко Валентин Сергеевич
Социальная ответственность	Скачкова Лариса Александровна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОМ	Штанько В.Ф.	д.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В51	Вишнякова Юлия Аркадьевна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4В51	Вишняковой Юлии Аркадьевне

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	12.03.02 Оптотехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1. В исследовании задействовано 2 человека: научный руководитель и студент. 2. Научно-техническое исследование выполняется на оборудовании лаборатории, 3. Стоимость кристаллов для экспериментов – 2020руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Нормы рабочего времени, выполнения исследования
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды от ФОТ – 27,1%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	1. Потенциальные потребители НТИ 2. Оценка научного уровня исследования
3. Планирование и формирование бюджета научных исследований	1. Планирование научно-исследовательских работ 2. Расчёт бюджета затрат на исследование
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение экономической эффективности исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. График проведения НТИ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Николаенко Валентин Сергеевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В51	Вишнякова Юлия Аркадьевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4B51	Вишняковой Юлии Аркадьевне

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	12.03.02 «Оптехника»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Целью настоящей работы является разработка метода контроля качества кристаллов CaF_2 , применяющихся при производстве окон для лазеров.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	- ТК РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019) - ГОСТ 12.2.032-78
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– Отклонение температуры и влажности воздуха от нормы; – Высокий уровень шума; – Воздействие электрического тока на человека
3. Экологическая безопасность:	– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – наличие отходов.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– выбор наиболее типичной ЧС; – разработать профилактические меры по устойчивой работе производства.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B51	Вишнякова Юлия Аркадьевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 68с., 12 рис., 17 табл., 42 источников.

Ключевые слова: Ионные кристаллы, оптическое поглощение, ионизирующая радиация, электронно-дырочное возбуждение, дефекты.

Объектом исследования является кристалл CaF_2

Цель работы – Экспериментальное исследование влияния температуры закалки на эффективность создания короткоживущих оптически активных дефектов во фториде кальция.

В процессе исследования проводились: измерения спектров наведенного оптического поглощения воздействием импульсного электронного пучка в кристаллах фторида кальция после закалки от ряда повышенных температур.

В результате исследования: установлено увеличение величины оптической плотности короткоживущих дефектов с ростом температуры закалки.

Степень внедрения: полученные результаты будут использованы при выборе материалов для окон эксимерных лазеров в рамках научно-технического сотрудничества с ФИ РАН им.П.Н.Лебедева (г. Москва).

Область применения: оптические материалы с высокой радиационной стойкостью для производства эксимерных лазеров высокой мощности.

Экономическая эффективность/значимость работы: выбор материалов с высокой радиационной стойкостью позволит увеличить срок службы эксимерных лазеров и оптических элементов, работающих в полях ионизирующих излучений.

В будущем планируется: экспериментальные исследования взаимосвязи между эффективностью создания короткоживущих дефектов и стабильных оптически активных дефектов при высоких дозах электронного облучения.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

АЭ – автолокализованные экситоны

ФЩЗМ – фторид щелочноземельных металлов

ЩГК – щелочно-галогидные кристаллы

ИЭП – импульсный электронный пучок

V_k – автолокализованная дырка (V_k центр)

ЭС – эффективность создания

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	10
1 Обзор литературы	11
1.1 Методы выращивания и свойства монокристаллов фторида кальция	11
1.2 Модель автолокализованных экситонов в ФЦЗМ.....	16
1.3 Модель АЭ в виде близкорасположенной F-H пары.....	19
2 Объект и методы исследования	23
3 Результаты проведенного исследования	27
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	33
5 Социальная ответственность	53
Заключение	64
Список использованных источников	65

Введение

Кристаллы фторида кальция также, как и кварцевые стекла являются основными материалами для изготовления окон мощных эксимерных лазеров с электронно-пучковым возбуждением. Радиационная прочность материалов этих окон, работающих при воздействии рассеянных из пучка накачки электронов, рентгеновского и интенсивного лазерного излучения, в значительной степени определяет работоспособность, и, следовательно, перспективы использования лазеров.

Проблемы радиационной стойкости возникают и при работе с синхротронным излучением, в резонаторной оптике лазеров на свободных электронах. Считается, что возникновение и накопление структурных дефектов в ионных кристаллах обусловлено созданием и распадом электронно-дырочных возбуждений или автолокализованных экситонов (АЭ). Однако, структура и свойства АЭ, в частности в кристаллах фторидов щелочноземельных металлов (ФЦЗМ), до настоящего времени остаются предметом дискуссий и исследований.

Все это свидетельствует о необходимости изучения радиационно-стимулированных процессов в ФЦЗМ при воздействии ионизирующих и лазерных излучений.

В настоящей работе планируется изучение влияния низкотемпературной закалки на спектральные свойства и эффективность создания электронно-дырочных возбуждений (экситонов) в кристаллах фторида кальция.

1 Обзор литературы

1.1 Методы выращивания и свойства монокристаллов фторида кальция

Фторид кальция представляет собой химически стойкое соединение. Он встречается в природе как минерал, также называемый «плавиковый шпат». Монокристаллы фторида кальция имеют кубическую решетку, в которой кальций координирован с восемью фторид-анионами, а каждый ион F^- окружен четырьмя ионами Ca^{2+} .

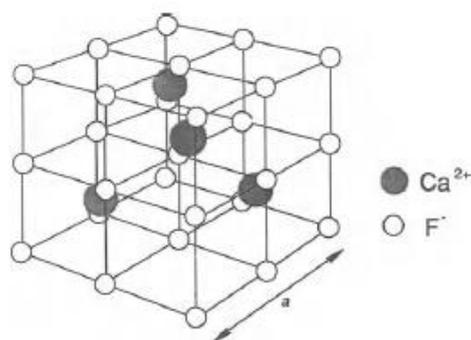


Рисунок 1.1 – Структура решетки фторида кальция

Вследствие прозрачности в инфракрасной и ультрафиолетовой областях (примерно от 0,15 до 9 мкм) и низким показателем преломления фторид кальция находит широкое применение при изготовлении выходных окон эксимерных лазеров. Кроме того, монокристаллы фторида кальция, легированные редкоземельными элементами, используются как активные среды твердотельных лазеров.

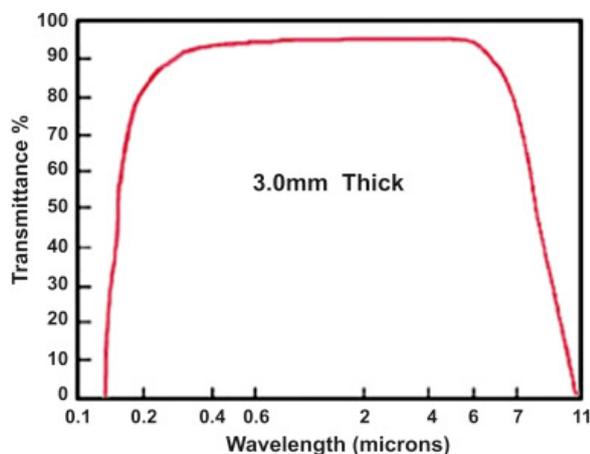


Рисунок 1.2 – Спектр пропускания для окон CaF_2 [8]

Синтетические кристаллы флюорита выращиваются по методам Чохральского [1] или Стокбаргера [2]. Метод Чохральского по своей природе является методом роста с высоким температурным градиентом, при котором кристалл вытягивается непосредственно из расплава. Метод Стокбаргера, в котором расплавленный материал кристаллизуется внутри тигля контролируемым образом, включает в себя гораздо более низкие температурные градиенты. Во время исследований травления кристаллов, выращенных этими методами, было замечено, что существуют определенные сходства и различия в расположениях дислокаций, индуцированных методом роста, и что некоторые из них могут быть изменены путем последующего отжига. Эти особенности описаны и сопоставлены с дислокационными решетками, наблюдаемыми в кристаллах других материалов, выращенных по методике Чохральского.

Метод Стокбаргера включает в себя последовательность ряда этапов: кристаллизация из расплава, отжиг кристаллов и последующее охлаждение в вакуумной печи. Режим охлаждения обеспечивается непрерывным переносом тигля, содержащего расплав из зоны кристаллизации в зону отжига. Каждая из этих двух зон имеет свою собственную независимую систему управления параметрами процесса, отличающуюся тем, что от зоны кристаллизации до зоны отжига происходит падение температуры на 250-450 °С. Тигель, содержащий кристаллизующийся материал, перемещается из зоны кристаллизации в зону отжига со скоростью 1-3 мм / час. В зоне отжига образец выдерживается при температуре 1100-1300 °С в течение 20-40 часов, а затем охлаждают сначала до 950-900 °С со скоростью 2-40 °С/ час, а затем до 300 °С со скоростью 5-8 °С/час, после чего материал остывает естественным образом.

Анализ свойств выращенных кристаллов показывает, что:

- в кристалле возникают напряжения, если изменения температуры происходят с такой скоростью, при которой структура кристалла не успевает прийти в равновесное состояние;

- наличие достаточно больших градиентов температуры в кристаллах (особенно в радиальном направлении) способствует возникновению напряжений;
- напряжения в растущем кристалле зависят от характера осевого распределения температуры;
- повторный нагрев (особенно в температурном поле с градиентом с другим направлением по сравнению с направлением градиента при росте) приводит к появлению малых (мозаика) или крупных (блоки) участков с различной ориентацией кристаллической решетки;
- длительный повторный отжиг в вакууме (особенно в открытом контейнере, т.е. при давлении пара ниже равновесного) приводит к нарушению стехиометрии, повышению концентрации дислокаций и точечных дефектов [3].

Все эти положения подтверждают сложность технологии выращивания качественных кристаллов фторидов, что в результате требует многочисленных экспериментов и в итоге тщательного подбора необходимых режимов такой технологии на всех этапах выращивания монокристаллов и контроля свойств полученных образцов.

Кристаллы со структурой флюорита являются классическими модельными объектами для изучения химии дефектов решетки в кристаллах [4], в частности, лабильности анионной подрешетки и проводимости быстрых ионов. Преобладающим типом дефекта в структуре флюорита является так называемый дефект Френкеля, который возникает при перемещении аниона от его регулярного участка к центру клетки без катионов. Экспериментальное значение энтальпии образования этого дефекта для кристалла CaF_2 составляет 2,43 эВ [5], а теоретические расчеты дают значения 1,9-2,8 эВ [6]. Температурная зависимость концентрации дефектов, следующая [7]: $n = 2,8 \times 10^{25} \exp(-15900/T)$. При температуре $T = 700\text{K}$, $n = 3,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и при $T = 900\text{K}$, $n = 1,4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Массовое образование дефектов условно можно охарактеризовать как плавление анионной подрешетки.

Влияние режима отжига на изменение формы края собственного поглощения не легированного фторида кальция представлено на рисунке 1.3.

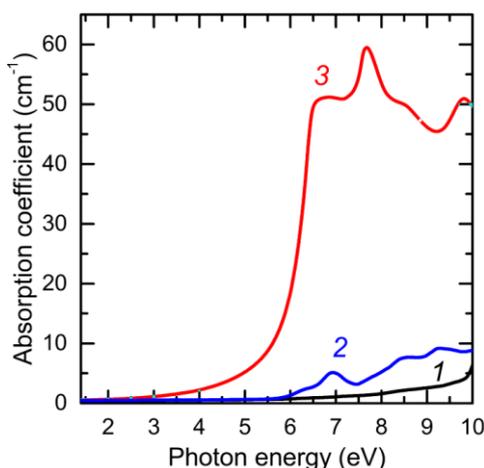


Рисунок 1.3 – Спектры поглощения образца А (номинально чистый): после приготовления (кривая 1) и после дополнительного предварительного нагрева / закали при 800 °С (2) и 1000 °С (3). Спектр после предварительного нагрева /закалки при 600 °С (не представлен) практически совпадает со спектром для свежеприготовленного образца [8]

В этом интервале температур наблюдается широкая аномалия удельной теплоемкости и изменение физических характеристик кристалла: фтор-ионная проводимость резко возрастает и становится насыщенной, упругие постоянные резко уменьшаются. Подобная модификация свойств в области высоких температур характерна для всех кристаллов со структурой флюорита. Удельные тепловые аномалии в этих кристаллах [9], а также сопутствующие явления иногда рассматриваются как «диффузный фазовый переход», однако истинного фазового перехода не происходит. Остается кубическая структура кристалла, удельная тепловая аномалия имеет конечное значение. Термодинамические модели описывают эту аномалию как результат взаимодействия точечных дефектов [10].

Корреляция между дефектами, число которых увеличивается с ростом температуры, изучалась с использованием метода когерентного диффузного

квазиупругого рассеяния нейтронов. Характерное изменение с вектором рассеяния интегрирующей интенсивности рассеяния можно объяснить мгновенной конфигурацией дефектных анионов в виде кластеров, включающих анионные междоузлия, анионные вакансии и релаксированные анионы [11]. Энергетическая ширина рассеяния дает возможность оценить время жизни кластера как $\sim 10^{-12}$ с при температуре, соответствующей аномалии в теплоемкости, а время жизни уменьшается с ростом температуры [12]. Предложено несколько моделей кластеров, которые включают пары анионных междоузлий и вакансий, а также область возмущения вокруг анионных междоузлий, где соседние анионы релаксируют от своих регулярных мест к соседним пустым местам, в то время как катионная подрешетка сохраняет регулярность структуры [12].

Компьютерное моделирование показало, что наиболее стабильным является статический кластер, состоящий из двух вакансий, двух релаксированных анионов и трех промежуточных анионов (2|2|3-кластер). Согласно этой модели, кластеры с избыточным внедрением компенсируются одиночными анионными вакансиями, ответственными за проводимость быстрых ионов в объеме кристалла [13].

Попытка получения кристаллов фторида кальция с более высокой прозрачностью реализована путем введения примеси иттрия. Модифицированные материалы на основе флюорита $\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_{2+x}$ ($0 < x < 0.37$) имеют улучшенные механические свойства. Возможность замены кристаллов CaF_2 на многокомпонентные фторидные материалы определяется УФ прозрачностью последних, ранее не изученной [13]. В работе представлены результаты изучения прозрачности кристаллов фтористого кальция разной предыстории. Кристаллы выращивали методом Бриджмена в графитовых тиглях и тепловом узле во фторирующей атмосфере. Спектры пропускания кристаллов $\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_{2+x}$ и CaF_2 , измеренные на вакуумном монохроматоре ВМР-2 в области 125–220 нм, приведены на рисунке 1.4.

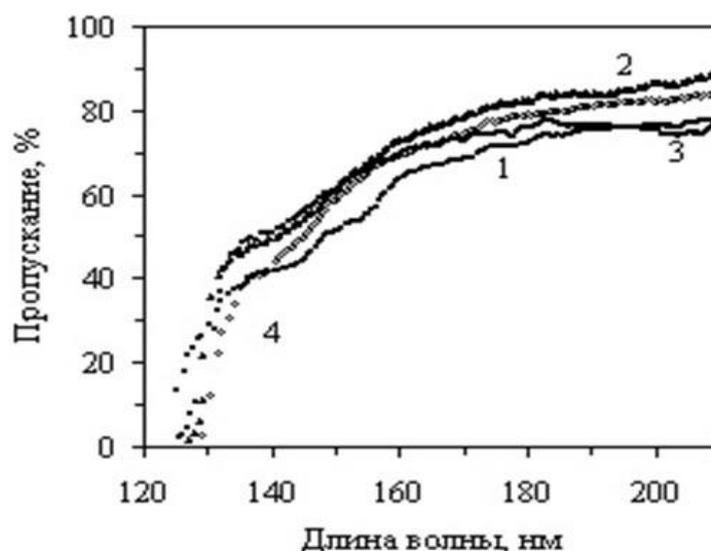


Рисунок 1.4 – Спектры УФ пропускания кристаллов CaF_2 (1) и $\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_{2+x}$ ($x=0.01$ (2), 0.05 (3), 0.11 (4)). Толщина образцов $0.7\text{--}0.8$ мм [21].

Как следует из результатов, представленных на рисунке 1.4, кристаллы $\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_{2+x}$ обладают высокой УФ–прозрачностью, высокой твердостью, негигроскопичны и технологичны с точки зрения получения объемных монокристаллов.

1.2 Модель автолокализованных экситонов в ФЦЗМ

Измерениями спектров поглощения тонких слоев чистых кристаллов ЦГК в УФ-области спектра обнаружена сложная структура полос. Поскольку поглощение очевидно обусловлено самим кристаллом, но не дефектами, такое поглощение называют собственным. Показатель поглощения в максимумах полос имеет огромную величину и достигает $10^4 \dots 10^6 \text{ см}^{-1}$. Это означает, что всё излучение в этой области поглощается в слоях нанометровой толщины. Измерения спектра фотопроводимости в этой же области спектра показали, что, по крайней мере, в области первой длинноволновой полосы, величина проводимости мала. С повышением энергии квантов (уменьшением длины волны) при достижении энергии, достаточной для реализации межзонных переходов, величина фотопроводимости резко увеличивается.

Описанные эксперименты однозначно свидетельствуют о том, что по крайней мере первая длинноволновая полоса спектра поглощения не связана с переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости. Следовательно, этот пик обусловлен созданием в кристалле неких новых электронных возбуждений – экситонов [14]. Идею возможности существования таких квазичастиц, высказал и обосновал Яков Ильич Френкель в 1931 году. Экситоном называется электронное возбуждение, обусловленное переходом электрона в состояние, расположенное ниже дна зоны проводимости. Экситон можно представить, как связанную электронно-дырочную пару, которая является подвижным состоянием. Экситон, перенося энергию, не переносит заряд, и подобен – в целом нейтральному – атому водорода, в котором роль атомного ядра выполняет дырка, т.е. место, в котором электрон находился до возбуждения квантом света. Известно, что создание экситонов приводит к возникновению люминесценции, т. е. экситоны переносят по кристаллу энергию, достаточную для возбуждения центров свечения. Отметим, что в большинстве кристаллов в длинноволновой части УФ-спектра собственного поглощения обнаруживается несколько экситонных полос поглощения. Межзонный переход (переход электронов из валентной зоны в зону проводимости) проявляется в спектре характерным уступом после первых экситонных пиков. Более коротковолновые полосы поглощения в УФ-области связывают с образованием катионных экситонов.

Итак, экситон – это подвижное электронное возбуждение, способное переносить энергию, но не переносящее заряд. Экситон может быть создан не только путем прямого их создания оптическим излучением, но и при встрече зонных электрона и дырки. Экситон можно представить, как дырку (атом галоида) с электроном, локализованным на окружающих атом галоида ионах катионов. Такой экситон называется свободным.

Известно, что любой носитель заряда, электрон или дырка, после создания поляризуют своим полем, окружающий их кристалл. Поляризация кристалла означает некоторое уменьшение энергии носителя заряда. Движение такого

носителя заряда с переносом поляризации кристаллической решетки отличается от движения свободного носителя. Электрон в созданном им самим поляризационном поле называется поляроном и имеет эффективную массу в полтора раза большую, чем свободный. Дырка изначально имеет большую массу, поэтому способна обеспечить большую степень поляризации решетки и, следовательно, большее изменение эффективной массы. Это приводит к замедлению скорости движения дырки и, в конце концов, к остановке движения. Результатом такого процесса является создание автолокализованной одногалоидной дырки, которая в процессе дальнейшей релаксации преобразуется затем в автолокализованную двухгалоидную. Последняя представляет собой в ЩГК молекулярный ион галоида вида X_2^- занимающий два смежных узла решетки. Одногалоидная автолокализованная дырка экспериментально не обнаружена, возможно, из-за малого времени ее существования. Подробно о структуре и свойствах двухгалоидной автолокализованной дырки будет сказано ниже.

Таким образом, носители заряда, электроны и дырки после их создания релаксируют (термализуются, отдают свою энергию решетке), подвижность их падает, появляется энергетический зазор между их энергетическими уровнями и дном зоны проводимости (для электрона) и потолком валентной зоны (для дырки). Процесс может, по крайней мере для дырки, завершиться полной потерей подвижности, т. е. автолокализацией.

Можно представить, что подобным должен быть процесс релаксации и экситона. Созданный оптически экситон теряет свою подвижность, происходит его автолокализация в основном из-за локализации дырочного компонента до состояния одногалоидного, ядром которого является один атом галоида, затем до состояния, когда ядром экситона становится двухгалоидная автолокализованная дырка. Захват электрона на автолокализованной дырке происходит за время, зависящее от концентрации электронов в зоне проводимости и при $N = 10^{17} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$ равно 10 пс (верхний предел). Связанное состояние

автолокализованная двухгалоидная дырка – электрон $(X_2^- + e)^* \equiv (V_k + e)^*$ представляет собой автолокализованный экситон (АЭ), характерный для ШГК.

1.3 Модель АЭ в виде близкорасположенной F-Н пары

Методом оптического детектирования электронного парамагнитного резонанса (ОДЭПР) в кристаллах CaF_2 обнаружено слабое взаимодействие электронной компоненты АЭ с атомами фтора своего ядра, но сильное – с атомами окружения [15]. Тонкая и сверхтонкая структура спектров ОДЭПР проявляется при ориентации вектора напряженности магнитного поля параллельно направлению $\langle 111 \rangle$. Различная интенсивность линий спектра свидетельствует о взаимодействии с двумя неэквивалентными атомами фтора: дырка на ядре экситона, как на Н центре распределена неравномерно [15] (~70% на междоузельном). Поскольку V_k центр во флюоритах ориентирован вдоль плотноупакованного направления $\langle 100 \rangle$, а его спектр ЭПР свидетельствует о сверхтонком взаимодействии (на 98%) с двумя эквивалентными атомами фтора [16], то в [17] предложена модель АЭ с ядром в виде Н центра. Электрон проводимости притягивается катионами, окружающими V_k центр. Это стимулирует вращение V_k центра и перемещение его в ближайшее междоузлие. На вакансии локализуется электрон с образованием F центра. Позднее в [18] получено почти изотропное пространственное распределение внешнего электрона АЭ, схожее с распределением электрона F центра [16].

Ориентационные зависимости спектров ОДЭПР [15] также свидетельствуют о низкой симметрии вокруг оси Н центра.

Спектрально-кинетические характеристики неустойчивого поглощения и люминесценции АЭ во флюоритах подробно исследованы в [17].

В спектрах неустойчивого поглощения кристалла CaF_2 выделяют электронный и дырочный компоненты поглощения АЭ, которые смещены относительно спектральных положений максимумов пространственно разделенных F и Н центров [16] в области меньших и больших энергий фотонов.

Релаксация наведенного поглощения описывается набором экспоненциальных зависимостей и по спектру происходит неоднородно.

Предположено [17], что в CaF_2 возможно образование различных конфигураций АЭ. Минимизация общей энергии с учетом движения V_k центра и окружающих ионов рассчитана в [19]. Энергетические затраты на образование различных конфигураций АЭ в CaF_2 и SrF_2 близки; при нулевой температуре реализуется наиболее тесная конфигурация. Для описания структуры АЭ введен геометрический фактор [20], характеризующий разделение электрон-дырка на расстояние R . Во флюоритах в составе дырочного ядра АЭ ион $\text{F}^{-0.7}$ занимает нормальный анионный узел, а ион $\text{F}^{-0.3}$ – смещен вдоль $\langle 111 \rangle$ оси на длину связи в Н центре (3,6а.е.) [19].

На рисунке 1.5 схематично представлены возможные конфигурации АЭ в решетке флюорита. В составе АЭ F-центр занимает узельную позицию аниона, а Н-центр ориентирован примерно вдоль $\langle 111 \rangle$ оси. В качестве основного параметра при идентификации выделенных групп полос использовано электрон-дырочное разделение – расстояние от позиции вакансии в анионном узле до междоузельного фтора в составе дырочного ядра, т.е. геометрический фактор R [21]. Согласно классификации, самой тесной F, Н-парой является конфигурация 2, а самой разделенной – конфигурация 1 (рис. 1.5).

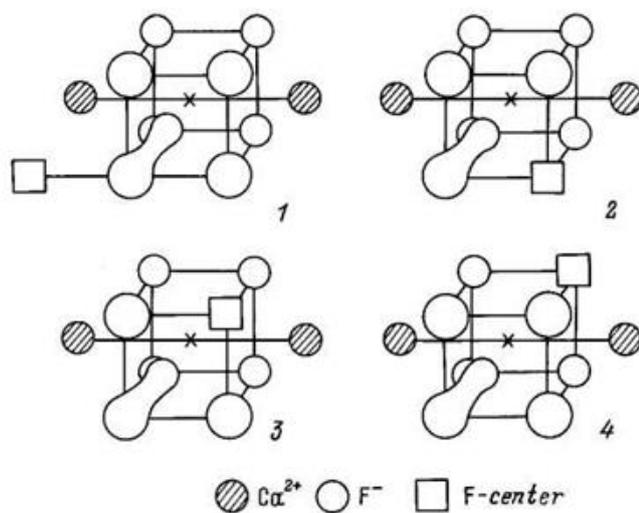


Рисунок 1.5 – Четыре возможные конфигурации F, Н-пар в решетке CaF_2 . Нумерация соответствует [11]. Н-центр представлен в виде гантели, лежащей вдоль направления $\langle 111 \rangle$ [31]

На основе анализа литературных данных авторы [22] показали, что в основе наиболее изученных типов разупорядочения кристаллов флюорита лежит нарушение анионной подрешетки, которое может быть качественно описано с единых позиций – кластеризации собственных дефектов решетки.

При изучении спектрально-кинетических характеристик оптического поглощения и люминесценции во флюоритах в качестве источника возбуждения применяются достаточно интенсивные пучки ускоренных электронов. Различные высокоомные материалы (кристаллические диэлектрики, полупроводники) при воздействии таких пучков обнаруживают весьма схожее поведение. Например, в кристаллах щелочных и щелочноземельных металлов с ростом плотности ($>0,1$ Дж/см²) возбуждения снижается энергетический выход всех разновидностей собственного свечения (АЭ [23], внутризонной дырочной [24] и электронной люминесценции [25]) при концентрациях создаваемых центров меньших тех, которые соответствуют условию перехода Мотта [26]. Квантовый выход свечения АЭ является наибольшим [24].

В полупроводниках собственный канал рекомбинации неравновесных электронов и дырок доминирует при превышении некоторого порога возбуждения [27]. При низких уровнях возбуждения рекомбинация электронов и дырок происходит на дефектах собственной и примесной природы и сопровождается излучением, смещенным в длинноволновую область относительно края собственного поглощения. Пороговая плотность энергии возбуждения определяется предысторией образцов (метод выращивания, наличие неконтролируемых примесей, режимы термической и механической обработки) и изменяется в широких пределах [27].

По аналогии с процессами в полупроводниках, можно предположить, что одной из причин, определяющих сублинейный характер плотностных зависимостей выхода первичных продуктов радиолиза в кристаллах фторида кальция, является предыстория реальных кристаллов. На основе представленного анализа литературы следует, что воздействие ионизирующей

радиации может приводить к образованию короткоживущих электронно-дырочных возбуждений различных конфигураций, локализованных вблизи кластеров, концентрация которых определяется предысторией образцов. Однако, до настоящего времени спектрально-кинетические параметры конфигураций АЭ изучены явно недостаточно. Практически отсутствуют результаты исследования влияния биографических дефектов в номинально чистых кристаллах фторидах кальция на эффективность создания и структуру короткоживущих дефектов.

2 Объект и методы исследования

Объектами для исследований служили номинально чистые кристаллы CaF_2 , выращенные методом Стокбаргера (ГОИ, г. Санкт–Петербург).

В качестве основного метода исследований в настоящей работе использован метод импульсной оптической спектроскопии с наносекундным разрешением [28] который позволяет изучать кинетику создания и эволюции центров люминесценции и поглощения под действием коротких импульсов возбуждающей радиации. Блок-схема установки представлена на рис.3 и содержит три функциональные системы: источник радиации, оптический спектрометр и систему синхронизации. Источником радиации служит ускоритель электронов конструкции Г.А. Месяца, Б.М. Ковальчука [29]. Генератор импульсных напряжений (ГИН) ускорителя собран по схеме Аркадьева-Маркса и состоит из четырнадцати ступеней, каждая из которых в качестве емкостных накопителей содержит один конденсатор типа К15-10, что позволяет сократить число нежелательных явлений на контактах.

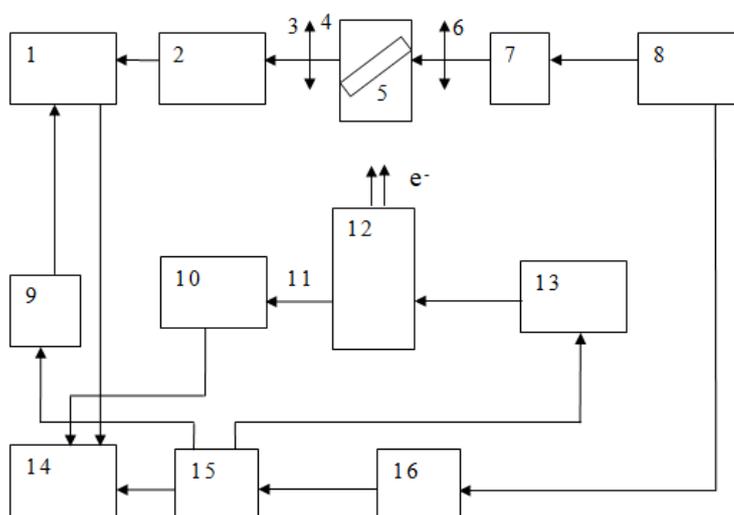


Рисунок 2.1 – Блок-схема установки импульсной оптической спектроскопии: 1 – ФЭУ; 2 – монохроматор; 3,6 – конденсоры; 4 – криостат; 5 – образец; 7 – импульсная лампа; 8 – блок питания лампы; 9 – блок питания ФЭУ; 10 – ФЭУ светового запуска; 11 – оптический кабель; 12 – ускоритель электронов; 13 – блок питания и управления ускорителя; 14 – осциллограф; 15 – генератор задержанных импульсов; 16 – схема сравнения и управления

Питание емкостного накопителя осуществляется от высоковольтного источника, включающего генератор импульсов тока, импульсный трансформатор, нагруженный на утроитель напряжения, схему сравнения и схему запуска. При достижении заданного напряжения срабатывает схема сравнения и синхроимпульс через тиристорную схему и импульсный трансформатор поступает на управляющую сетку тиратрона, на анод которого подается высокое напряжение. Запуск ускорителя происходит при открытии тиратрона и закорачивании на землю сетки трехэлектродного разрядника.

Основные параметры установки импульсной спектроскопии.

Максимальная энергия электронов		0,28 МэВ
Длительность импульса (тока) на полувысоте		12 нс
Временное разрешение		7 нс
Частота следования импульсов		$(3 \cdot 10^{-2} - 10^{-3})$ Гц
Спектральный диапазон измерений		(200-1100) нм
Интервал температур		(80-700) К
Диапазон значений флюенса энергии ИЭП		(2-500) мДж/см ²
Обратная линейная дисперсия монохроматора		
МДР-23 в области	(200-600) нм	1,3 нм/мм
	(600-1200) нм	2,6 нм/мм

Использование ИЭП для возбуждения диэлектриков и полупроводников определяет необходимость измерения энергии, поглощенной в образце. Наносекундные ускорители генерируют широкий энергетический спектр электронов, поскольку, форма импульса ускоряющего напряжения отличается от прямоугольной и искажается при прохождении электронов в дрейфовой камере через слой остаточного газа между фольгой и образцом.

Методика оптических измерений при многократном облучении образцов.

При облучении однократным ИЭП (доза $\sim 10^3$ Гр) в ФЦЗМ создаются преимущественно короткоживущие дефекты – автолокализованные экситоны АЭ [28]. Тем не менее, авторами обнаружено присутствие долгоживущих компонентов. В [30] при облучении CaF₂ серией из 50 изодозных ИЭП

обнаружено резкое (~ 12 %) уменьшение эффективности создания (ЭС) АЭ на начальной стадии облучения и более медленное - на последующих. С целью исключения влияния накопления дозы на форму измеряемых спектров, образцы перед каждым последующим облучением и измерением следует обесцвечивались нефльтрованным светом ртутной лампы высокого давления. Скорость набора дозы оказывает большое влияние на ЭС АЭ в ФЦЗМ. Методика измерения спектров при многократном облучении образцов требует медленной скорости набора дозы.

На рисунке 2.2 показаны результаты измерения оптической плотности и амплитуды импульсной люминесценции в зависимости от интервала времени между импульсами облучения. С ростом поглощенной дозы, помимо общей тенденции к снижению, наблюдаются осцилляции в ЭС АЭ.

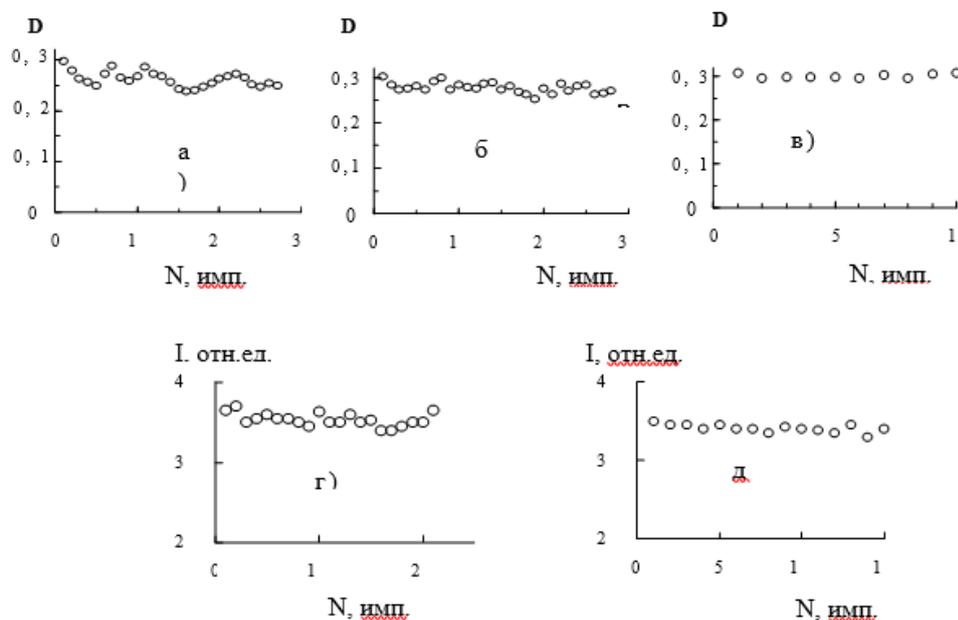


Рисунок 2.2 – (а,б,в) - Амплитудные значения оптической плотности, измеренные в момент окончания ИЭП в CaF_2 на 2,75 эВ при 273 К при частоте следования импульсов: 1 мин.(а), 2 мин.(б), 15 мин. (в). Плотность энергии $W_0 = 0,2 \text{ Дж/см}^2$; (г,д) - амплитудные значения интенсивности.

Эффект снижения ЭС АЭ с ростом поглощенной дозы может быть связан как с увеличением температуры образца, так и с изменением эффективности каналов рекомбинации электронов и дырок.

Наличие осцилляций предполагает дополнительный канал рекомбинации электронных возбуждений на исходных и введенных предварительным облучением дефектах структуры, а также влияние остаточного электрического поля инжектированного заряда.

Эффективность накопления этих дефектов определяется температурой и скоростью набора дозы, а пострадиационного отжига - временем, температурой и интенсивностью оптической подсветки. Совокупность этих факторов определяет сложную функцию изменения ЭС АЭ.

Методика требует затрат по времени за счет увеличения интервалов времени между импульсами (до ~ 15 мин), однако позволяет добиться значительного снижения погрешности при измерении спектров в режиме многократного облучения. Контроль исследований проводился с использованием свежих образцов.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Выпускная квалификационная работа посвящена изучению методов контроля качества производства кристаллов фторида кальция, которые применяются при изготовлении окон для эксимерных лазеров с электронно-пучковым возбуждением. Проект нацелен на разработку метода контроля качества, который напрямую связан с улучшением технологии производства кристаллов.

Целью данного раздела является обоснование целесообразного использования технического проекта, выполняемого в рамках выпускной квалификационной работы, при этом детально рассматриваются планово-временные и материальные показатели.

4.1 Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- Составление SWOT-анализа разработки метода контроля качества производства кристаллов CaF_2
- Планирование научно-исследовательских работ
- Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности проекта.

4.2 SWOT-анализ работы ремонтно-механического цеха ферросплавного завода

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента и представляет собой комплексное исследование научного проекта.

Применительно к разрабатываемому методу, SWOT-анализ позволит оценить сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы.

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, в которую записываются слабые и сильные стороны проекта, а также возможности и угрозы.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

С – сильные стороны проекта;

Сл – слабые стороны проекта;

В – возможности;

У – угрозы;

Матрица SWOT приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Матрица SWOT

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	<p>С1. Простота применения</p> <p>С2. Экологичность технологии.</p> <p>С3. Более низкая стоимость по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Повышение качества производства</p> <p>С5. Квалифицированный персонал</p>	<p>Сл1. Отсутствие отработанной технологии</p> <p>Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с данной технологией</p> <p>Сл3. Ограниченность материалов, используемых при проведении научного исследования</p> <p>Сл4. Длительная обработка полученных результатов</p>
Возможности:		
<p>В1. Использование инновационной структуры ТПУ</p> <p>В2. Понижение количества бракованной продукции</p> <p>В3. Повышение спроса</p> <p>В4. Попадание в программу по обновлению оборудования на производстве</p>		

В5. Повышение стоимости конкурентных разработок		
Угрозы: У1. Отсутствие спроса У2. Введение дополнительных государственных требований к сертификации У3. Появление новых улучшенных технологий У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства		

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются обозначения аналогичные самой матрицы SWOT с дополнением знаков (+, -) для подробного представления наличия возможностей и угроз проекта («+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие).

Анализ интерактивных матриц, приведенных в таблицах 4.2 и 4.3, показывает, что сильных сторон у проекта значительно больше, чем слабых.

Кроме того, угрозы имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта.

Таблица 4.2 – Интерактивная матрица возможностей

	Сильные стороны проекта					
		С1	С2	С3	С4	С5
Возможности	В1	+	+	+	-	+
	В2	+	-	-	+	+
	В3	+	+	+	+	-
	В4	-	-	+	+	+
	В5	+	-	+	+	-
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	-
	В1	-	-	+	-	
	В2	+	+	-	+	
	В3	+	-	-	+	
	В4	+	+	+	-	
	В5	+	-	-	-	

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица угроз

	Сильные стороны проекта					
		С1	С2	С3	С4	С5
Угрозы	У1	-	-	+	+	-
	У2	-	+	-	+	-
	У3	+	-	-	+	-
	У4	-	-	+	+	-
	Слабые стороны проекта					
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	-
	У1	+	+	+	+	
	У2	-	-	+	-	
	У3	+	+	-	-	
	У4	+	+	+	-	

При разработке научного проекта метода контроля качества производства кристаллов CaF_2 инженер нацелен на работу с возможно большим внедрением сильных сторон. Это влияет, прежде всего, на качество и востребованность созданной методики, что немало важно для потребителей.

Таблица 4.4 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	<p>C1. Простота применения</p> <p>C2. Экологичность технологии.</p> <p>C3. Более низкая стоимость по сравнению с другими технологиями.</p> <p>C4. Повышение качества производства</p> <p>C5. Квалифицированный персонал</p>	<p>Сл1. Отсутствие отработанной технологии</p> <p>Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с данной технологией</p> <p>Сл3. Ограниченность материалов, используемых при проведении научного исследования</p> <p>Сл4. Длительная обработка полученных результатов</p>
Возможности:	<p>Главным достоинством технологии является ее простота и точность, которые позволят поддерживать высокий спрос и</p>	<p>Главной слабостью проекта является отсутствие отработанной технологии. Проработка данного момента привела бы к</p>
V1. Использование инновационной структуры ТПУ		

<p>В2. Понижение количества бракованной продукции</p> <p>В3. Повышение спроса</p> <p>В4. Попадание в программу обновление оборудования на производстве</p> <p>В5. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>	<p>конкурентоспособность на рынке.</p>	<p>повышению спроса на технологию.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса</p> <p>У2. Введение дополнительных государственных требований к сертификации</p> <p>У3. Появление новых улучшенных технологий</p> <p>У4. Несвоевременное финансовое обеспечение</p>	<p>Возможные угрозы заключаются только в ведении дополнительных требований к сертификации. Ввиду новизны технологии, потребуется вложение средств для соответствия каждой сфере.</p>	<p>Угрозой для проекта является появление новой технологии. На фоне проблем с доступом к некоторым материалам для исследований, эта проблема является достаточно актуальной.</p>

научного исследования со стороны государства		
--	--	--

4.3 Организация работ технического проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

4.4 Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 4.5 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
Теоретические и экспериментальные исследования	3	Изучение исходных образцов	Студент
	4	Подготовка образцов кристаллов CaF ₂	Студент
	5	Проведение экспериментальных работ	Научный руководитель, студент
	6	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Студент
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка эффективности полученных результатов	Научный руководитель, студент
Оформление отчета по научному исследованию	8	Составление пояснительной записки	Студент
	9	Проверка квалификационной работы выпускной работы	Научный руководитель

Сдача выпускной квалификационной работы	10	Подготовка к защите ВКР	Научный руководитель, студент
---	----	-------------------------	-------------------------------

4.5 Определение трудоемкости выполнения НИ

Трудоемкость выполнения технического проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями по формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения календарного плана-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности, рассчитываемый по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{(365 - 52 - 14)} = 1,22 \text{ кал. дн.},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году

Рассчитанные по этим формулам параметры для каждой из работ сведены в таблицу ниже:

Таблица 4.6 – Временные показатели научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ, чел-дни						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{\text{ожс}}$, Чел-дни					
	Науч. рук-ль	Студент	Науч. рук-ль	Студент	Науч. рук-ль	Студент	Науч. рук-ль	Студент	Науч. рук-ль	Студент
Составление и утверждение технического задания	1	-	3	-	1,8	-	3	-	3	-
Подбор и изучение материалов по теме	-	3	-	5	-	3,2	-	4	-	5
Изучение исходных образцов	-	7	-	1	-	2	-	6,2	-	8
Подготовка образцов кристаллов CaF_2	-	5	-	0	-	1	-	5	-	6
Проведение экспериментальных работ	2	5	5	9	4,2	14	2	26	2	28

Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	-	2 0	-	3 5	-	28	-	31	-	33
Оценка эффективности полученных результатов	3	8	5	1 5	7,2	13, 6	3	7	4	8
Составление пояснительной записки	-	5	-	1 2	-	7,8	-	8	-	9
Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	2	-	7	-	4,2	-	2	-	3	-
Подготовка к защите ВКР	1	3	2	4	1,4	2,8	2	3	3	4

4.6 Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным в данном случае является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится для ожидаемого по длительности исполнения работ в рамках научного исследования, с разбивкой по месяцам и декадам за период времени подготовки ВКР. На основе таблицы 4.6 строим план-график проведения работ.

Таблица 4.7

п/п	Наименование работ	Исполнители	T_i , дн.	Продолжительность выполнения работ, дн																								
				окт		нояб			дек			янв			февр			март			апр			май			июнь	
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и выдача технического задания	Науч. рук.	3																									
2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	5	—																								
3	Изучение исходных образцов	Студент	9		—																							
4	Подготовка образцов кристаллов CaF ₂	Студент	8			—																						
5	Проведение экспериментальных работ	Науч. рук.	2																									
		Студент	28			—																						
6	Сопоставление результатов	Студент	33							—																		

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 16 декад, начиная со второй декады февраля, заканчивая первой декадой июня. Продолжительность выполнения технического проекта составит 119 дней. Из них:

104 дня – продолжительность выполнения работ студентом;

15 дней – продолжительность выполнения работ руководителем;

4.7 Бюджет научного исследования

Смета затрат включает в себя следующие статьи:

- материальные затраты;
- полная заработная плата исполнителей научного исследования;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.8 Расчет материальных затрат

В материальные затраты включаются затраты на образцы для исследования, канцелярские принадлежности, информационные носители (флеш-карты), картриджи и т.п.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi} ,$$

где m – количество видов материальных ресурсов;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию (натур.ед.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./натур.ед.);

Таблица 4.8 – материальные затраты

Наименование	Ед.изм.	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
Кристалл CaF ₂	Шт.	4	505	2020
Бумага	Шт.	1	250	250
Линейка	Шт.	1	100	100
Интернет и связь	м/байт (пакет)	8	350	2800
Итого				5170

4.9 Расчет полной заработной платы исполнителей темы

Таблица 4.9 – расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнитель и по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу (оклад), тыс. руб.
1	Исследование литературы	Студент	9	667,0	6003,0
2	Подготовка образцов	Студент	5	667,0	3335,0
3	Проведение экспериментов	Науч. рук-ль	4	1410,0	5640,0
		Студент	14	667,0	9338,0
4	Анализ полученных данных	Науч. рук-ль	7	1410,0	9870,0
		Студент	14	667,0	9338,0
Итого:					43524,0

Полная заработная плата включает основную и дополнительную заработную плату и определяется как

$$Z_{\text{полн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}$$

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

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) исполнителя рассчитывается исходя из трудоемкости работ и квалифицированных исполнителей по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

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

T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.;

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течении года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней.

Таблица 4.10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
– выходные дни	52	52
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
– отпуск	24	24
– невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	275	275

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2-0,5;

k_p – районный коэффициент равный 1,3 (для Томска).

Таблица 4.11 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	k_t	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб.дн.	$Z_{осн}$, руб.
Научный руководитель	1	19148	0,3	0,2	1,3	37338	1001	25	25025
Студент	1	1906	0,3	0,2	1,3	3716	490	50	24500
Итого $Z_{осн}$									49525

4.10 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

В дополнительную заработную плату включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12% от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}$$

где $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

$Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.

Научный руководитель: $Z_{доп} = 25025 \cdot 0,12 = 3003$ руб.

Студент: $Z_{доп} = 24500 \cdot 0,12 = 2940$ руб.

4.11 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}})$$

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

Таблица 4.12 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Научный руководитель	25025	3003
Студент	24500	2940
Коэффициент отчисления во внебюджетные фонды	0,271	
Итого	15031	

4.12 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, размножение материалов и т.д. их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{\text{нр}}$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

4.13 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Таблица 4.13 – расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НИИ	5170	
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	49525	Суммарная величина обоих исполнителей
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	5943	Суммарная величина обоих исполнителей
4. Отчисления во внебюджетные фонды	15031	
5. Накладные расходы	12107	16% от суммы ст. 1-4
6. Бюджет затрат НИИ	87776	Сумма ст. 1-5

4.14 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической 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 ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной школе оценивая.

Таблица 17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения

проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4
2. Удобство использования	0,15	4
3. Надежность	0,2	5
4. Стоимость	0,3	5
5. Возможность реализации	0,25	5
Итого	1	

$$I_{p-исп} = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,25 = 4,75$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-бальной шкале), что говорит об эффективности использования научного проекта.

В результате выполнения поставленных задач по данному разделу, можно сделать следующие выводы:

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что научный проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности и экономичности технического производства.

- при планировании технических работ был разработан график занятости, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу.

- составление сметы научного проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию научного проекта.

- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,75 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации научного проекта.