

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки 12.04.02 Опототехника

Отделение школы Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование люминесценции кристаллов NaI:Tl при возбуждении импульсным электронным пучком

УДК 535.37:548.55:539.1.074.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4BM72	Новоселов А.А.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОМ	Карнаухова А.А.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОСГН	Жаворонок А.В.	-		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романова С.В.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОМ	Корепанов Владимир Иванович	д.ф.-м.н.		

Томск – 2019 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
Р1	Способность формулировать цели, задачи научного исследования или разработки в области светотехники и фотонных технологий и материалов, способность выделять и обосновывать критерии, на основании которых формируются модели принятия решений, составлять план работ, способность строить физические и математические модели объектов исследования и выбирать алгоритм решения задачи
Р2	Способность разрабатывать программы экспериментальных исследований, применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы, защищать приоритет и новизну полученных результатов исследований в области обработки, изучения и анализа фотонных материалов, корпускулярно-фотонных технологий, оптоволоконной техники и технологии, в области оптических и световых измерений, люминесцентной и абсорбционной спектроскопии, лазерной техники, лазерных технологий и оборудования, взаимодействия излучения с веществом, производства и применения светодиодов
Р3	Способность к профессиональной оценке проблем проектирования в области светотехники, оплотехники, фотонных технологий и материалов на основе подбора и изучения литературных и патентных источников. Способностью к разработке структурных и функциональных схем оптических, оптико-электронных, светотехнических приборов, лазерных систем и комплексов с определением их физических принципов работы, структуры и технических требований на отдельные блоки и элементы
Р4	Способность к конструированию и проектированию отдельных узлов и блоков для осветительной, облучательной, оптико-электронной, лазерных техники, оптоволоконных, оптических, оптико-электронных, лазерных систем и комплексов различного назначения, осветительных и облучательных установок для жилых помещений, сельского хозяйства, промышленности
Р5	Способность к разработке и внедрению технологических процессов и режимов сборки оптических и светотехнических изделий, к разработке методов контроля качества изготовления деталей и узлов, составлению программ испытаний современных светотехнических и оптических приборов и устройств, фотонных материалов.

P6	Способность эксплуатировать и обслуживать современные светотехнические и оптические приборы и устройства, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды
Универсальные компетенции	
P7	Способность проявлять творческий, нестандартный подход, требующий абстрактного мышления, при решении конкретных научных, технологических и проектно-конструкторских задач в области фотонных технологий и материалов и светотехники, нести ответственность за принятые решения
P8	Способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала
P9	Способность к инновационной инженерной деятельности, менеджменту в области организации освоения новых видов перспективной и конкурентоспособной оптической, оптико-электронной и световой, лазерной техники с учетом социально-экономических последствий технических решений
P10	Способностью к координации и организации работы научно-производственного коллектива, принятию исполнительских решений для комплексного решения исследовательских, проектных, производственно-технологических, инновационных задач в области светотехники и фотонных технологий и материалов
P11	Способность к оценке современного состояния развития науки и техники, владение иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности
P12	Способность к сбору сведений, анализу и систематизации знаний об исследуемом объекте

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.04.02 Опотехника
 Отделение школы Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Корепанов В.И.
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4BM72	Новоселову Андрею Андреевичу

Тема работы:

Исследование люминесценции кристаллов NaI:Tl при возбуждении импульсным электронным пучком

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№ 920/с от 12.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Образцы монокристаллов NaI:Tl (10^{-2} мол.% Tl) Установка импульсной оптической спектрометрии на базе ускорителя электронов ($E_{\text{ср}} = 250$ кэВ, $t_{\text{имп}} = 10$ нс) Программное обеспечение MS Excel и Origin 9.0
--------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	- обзор источников информации по теме ВКР - проведение экспериментальных исследований фото- и катодolumинесценции образцов - анализ экспериментальных результатов - заключение о природе процессов в материале - оценка коммерческого потенциала и перспективности - анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте
Перечень графического материала	Презентация в формате MS Powerpoint
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Ассистент ОСГН Жаворонок А.В.
Социальная ответственность	Старший преподаватель Романова С.В.
Раздел на английском языке	Старший преподаватель Рыбушкина С.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Общие представления о люминесцентных щелочно-галогидных кристаллах	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	11.03.2019
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОМ	Карнаухова А.А.	к.ф.-м.н.		11.03.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ72	Новоселов А.А.		11.03.2019

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4BM72	Новоселов Андрей Андреевич

Школа		Отделение школы (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	магистр	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	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Разработка устава научно-технического проекта	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НТИ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Проведение оценки экономической эффективности научного исследования в области ЦГК NaI:Ti

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Матрица SWOT
5. График проведения и бюджет НТИ
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
7. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОСГН	Жаворонок А.В.	—		20.02.19

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4BM72	Новоселов А.А.		20.02.19

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4BM72	Новоселов Андрей Андреевич

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	12.03.02 Оптехника

Исследование люминесценции кристаллов NaI:Tl при возбуждении электронным пучком	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: монокристалл NaI:Tl. Образец возбуждается электронным пучком на установке «Импульс-1» Рабочая зона: ТПУ, корпус №166, лаб. 024 Область применения: детектирование гамма и ИК-излучения
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.	Рабочее место должно соответствовать нормам проведения работ в теплицах и требований безопасности ОСТ 46.3.1.115-81 ССБТ. Рабочее место должно соответствовать техническим требованиям и санитарным нормам.
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ вредных производственных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	- Отклонение показателей микроклимата в помещении - Недостаточная освещённость рабочей зоны - Пульсация светового потока - Повышенное значение напряжения в электрической цепи замыкания, которое может пройти через тело человека - Риск поражения электрическим током на установке «Импульс 1» - Повышенный уровень УФ-радиации установки «Импульс-1»
3. Экологическая безопасность: 3.1 Влияние на окружающую среду	Вопросы влияния на окружающую среду
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: 1. Перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; 2. Разработка мер по предупреждению ЧС; 3. Разработка действий в результате возникновения ЧС и мер по ликвидации ее последствий.	– перечислить возможные ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – указать наиболее типичную ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.02.19
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романова Светлана Владимировна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4BM72	Новоселов Андрей Андреевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 126 с., 33 рис., 33 табл., 62 ист., 1 прил.

Ключевые слова: фотолюминесценция, катодолуминесценция, центры свечения, перенос заряда, иодид натрия

Объектом исследования являются образцы монокристаллов NaI:Tl (10^{-2} мол.% Tl)

Цель работы – установление физических процессов, протекающих в кристаллах NaI:Tl при облучении импульсным электронным пучком и излучением N₂ лазера при температурах выше 295 К.

В процессе исследования проводились: обзор источников информации по теме ВКР, разработка методики измерения люминесценции в ИК-области, проведение экспериментальных исследований фото- и катодолуминесценции образцов, анализ экспериментальных результатов.

В результате исследования были получены спектры, кинетики затухания ФЛ и КЛ NaI:Tl при температурах 78 К – 460 К; температурные зависимости интенсивности и светосуммы вспышки активаторной люминесценции в полосе 425 нм при 295 К – 470 К. Сделан вывод, что катодолуминесценция при 425 нм обусловлена внутрицентровыми переходами в ионе Tl⁺, а фотолюминесценция - процессами переноса заряда с формированием примесной подзоны проводимости. Также проведена оценка экономической эффективности научного исследования в области люминесцентных явлений в кристалле NaI:Tl, анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте.

Степень внедрения: научное исследование.

Область применения: сцинтилляционная техника, термолуминесцентная дозиметрия.

Экономическая эффективность/значимость работы: заявлена экономичность и энергоэффективность технологии; бюджетное финансирование

В будущем планируется исследование люминесценции кристалла NaI:Tl в ИК-области

Список принятых сокращений:

ЩГК (АНС) – щелочно-галогидные кристаллы

ФЛ – фотолюминесценция

КЛ – катодолуминесценция

ФД – фотодиод

НС – нейтральные стекла

СЦ – сложные активаторные центры – $(Tl^+)_n$

Оглавление

Введение.....	14
Глава 1. Общие представления о люминесцентных щелочно-галогидных кристаллах.....	15
1.1 Основные сведения о монокристалле NaI:Tl.....	15
1.2 Активация люминесценции в ЩГК.....	16
1.3 ЩГК, активированные ртутеподобными ионами	17
1.4 Активаторные центры свечения в кристаллах NaI(Tl).....	20
1.5 Виды фотоприемников для регистрации ИК-излучения	24
1.5.1 Фоторезисторы	25
1.5.2 Фототранзисторы	27
1.5.3 Фотодиоды	29
Выводы из главы 1	34
Глава 2. Экспериментальная техника исследования	36
2.1 Установка «ИМПУЛЬС – 1».....	36
2.2 Фотодиод 9Э-111А.....	37
2.3 Схема включения фотодиода 9Э-111А	39
2.4 Методика регистрации ИК-излучения с помощью фотодиода 9Э-111А ..	40
Выводы из главы 2	44
Глава 3. люминесцентные процессы в NaI:Tl	45
3.1 Спектры и кинетики фотолюминесценции	45
3.1.1 Люминесценция при комнатной температуре	45
3.1.2 Люминесценция при повышенных температурах	46
3.2 Спектры и кинетики катодолюминесценции	48
3.3 Температурные зависимости люминесценции.....	51
3.4 Схемы уровней центра свечения в кристалле NaI:Tl	55
Выводы из главы 3	59
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 решений.....	61
4.1.3 SWOT-анализ.....	63

4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	66
4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	67
4.2 Инициация проекта	67
4.2.1 Цели и результаты проекта	68
4.2.2 Ограничения и допущения проекта	69
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом.....	69
4.3.1 Иерархическая структура работ проекта	69
4.3.2 План проекта	70
4.3.3 Бюджет научного исследования	72
4.3.4 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	72
4.3.5 Основная заработная плата	73
4.3.6 Отчисления на социальные нужды	75
4.4 Организационная структура проекта	78
4.4.1 План управления коммуникациями проекта	79
4.4.2 Реестр рисков проекта.....	79
4.5 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	80
4.5.1 Оценка абсолютной эффективности исследования	80
4.5.2 Чистая текущая стоимость (NPV).....	81
4.5.3 Оценка сравнительной эффективности исследования	86
Выводы из главы 4	90
Глава 5. Социальная ответственность.....	93
5.1 Предпроектный анализ	93
5.2 Организационные мероприятия по обеспечению безопасности.....	94
5.3 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	96
5.4 Анализ опасных и вредных факторов, которые могут возникнуть при использовании установки Импульс-1 и их обоснования по снижению воздействия.	97
5.4.1 Отклонение показателей микроклимата.	97
5.4.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны	98
5.4.3 Повышенная пульсация светового потока	99

5.4.4 Повышенное значение напряжения в электрической цепи замыкания, которая может пройти через тело человека	100
5.4.5 Риск поражения электрическим током на установке «Импульс-1» .	101
5.4.6 Экологическая безопасность.....	103
5.4.7 Повышенный уровень УФ-радиации установки «Импульс-1»	104
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	105
Выводы из главы 5	108
Список использованной литературы.....	109
Приложение А	114

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение кристаллов NaI(Tl) в сцинтилляционной технике и в качестве модельного кристалла на протяжении многих лет стимулировало многочисленные исследования, направленные на выявление механизмов формирования активаторной люминесценции

Большое внимание, которое привлекают исследования ЩГК, определяются также важными техническими применениями этих материалов. Здесь необходимо прежде всего отметить такие ставшие уже традиционными областями применения ЩГК, как использование их в качестве оптических материалов для инфракрасной и ультрафиолетовой (включая вакуумный ультрафиолет) областей спектра, сцинтилляционная техника, термолюминесцентная дозиметрия. Также большой интерес вызывает возможность использования ЩГК для создания оптических квантовых генераторов и оптических запоминающих устройств.

Несмотря на обширные исследования, все же остаются дискуссионные вопросы в области физики люминесцентных явлений в этом кристалле. В частности, неясно, какими процессами обусловлены стадии затухания сцинтилляционного импульса при комнатной и повышенной температуре; нет единой точки зрения относительно природы центра свечения 425 нм при облучении импульсным электронным пучком, а также излучением ближней УФ-области. Нет информации о характеристиках люминесценции в ИК-области, для изучения которой необходимо разработать методику регистрации ИК-люминесценции.

Цель данной работы – установление физических процессов, протекающих в кристаллах NaI:Tl при облучении импульсным электронным пучком и излучением N₂ лазера при температурах выше 295 К.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ

1.1 Основные сведения о монокристалле NaI:Tl

Монокристаллический йодистый натрий, активированный таллием, открыт Р.Хофштадтером более семидесяти лет назад. Этот сцинтиллятор отличается высоким световыходом — на образование одного фотона в нем затрачивается около 25 эВ, что обеспечивает ему широкую область применения. Спектр люминесценции хорошо согласуется со спектральной чувствительностью стандартных фотокатодов ФЭУ. Монокристалл имеет высокую прозрачность к свету собственного излучения и сравнительно прост в изготовлении. Большим недостатком кристалла является его высокая гигроскопичность.

На сегодняшний день имеются спектроскопические данные и энергетические соображения в пользу того, что в активированном щелочно-галоидном кристалле Na:Tl центрами свечения являются автолокализованные экситоны в первой координационной сфере иона активатора. Эти экситонные состояния возмущены ионом активатора, что приводит к изменению спектрального состава люминесценции по сравнению с автолокализованными экситонами в чистом кристалле.

В переносе энергии от основного вещества к активаторной примеси могут участвовать все электронные возбуждения, возникающие в кристалле под воздействием ионизирующего излучения: электроны, дырки и экситоны, находящиеся как в свободном, так и в автолокализованном состоянии. Легкий электрон не способен к автолокализации, хотя и может локализоваться на достаточно глубоких ловушках. Но экситон или дырка, обладающие большой эффективной массой, весьма быстро переходят в автолокализованное (поляронное) состояние. Ввиду этого, перенос энергии от основного вещества к примесным центрам может осуществляться автолокализованными галоидными дырками (V_k -центрами), экситонными поляронами и зонными электронами.

1.2 Активация люминесценции в ЩГК

Люминесцентные характеристики активированных кристаллов обычно интерпретируются при использовании понятий прямой и косвенной активации люминесценции по Креггеру [1].

В случае прямой активации спектры поглощения и возбуждения специфичны для данного активатора и обусловлены излучательными переходами между его энергетическими уровнями.

Прямая активация люминесценции проявляется в ЩГК с широкой зоной запрещенных энергий и довольно малым зазором между энергетическими уровнями активатора. Примером систем с прямой активацией являются ЩГК, активированные ртутеподобными ионами.

В случае косвенной активации люминесценции спектральные характеристики ЩГК слабо зависят от активирующей примеси и специфичны для данного основного вещества. Люминесценция обусловлена излучательной аннигиляцией связанных или локализованных возбуждений галоида (X_2^{2-}) у дефектов решетки примесного или структурного характера [2-6]. Возбуждение этой люминесценции осуществляется на спаде фундаментального экситонного поглощения, поскольку для создания вблизи дефектов решетки требуется энергия в большинстве случаев меньшая, чем энергия для их образования в ненарушенных местах решетки.

Экспериментально доказаны возбуждения, возникающие вблизи анионной вакансии или F-центра – α - и β -полосы. Свойства α - и β -полос детально рассмотрены Зейтцем [7], в работе [8] обнаружена γ -полоса, которая расположена в более высокоэнергетической области по сравнению с α - и β -полосами. Согласно [9] эта полоса обусловлена возбуждением галоидов, находящихся во второй координационной сфере по отношению к анионной вакансии. Излучательная аннигиляция α - и γ -возбуждений доказана в работах [10, 11]. При этом в γ -полосе возбуждается свечение по своим свойствам подобное α -люминесценции, но его максимум смещен в более длинноволновую

область спектра приблизительно на 0,1 эВ. В кристаллах NaI α -люминесценция возбуждается при температуре 77К в области 224 и 238 нм и излучается в полосе с максимумом 480 нм [12].

В теоретических работах [13, 14] показано, что центрами локализации экситонных возбуждений могут служить пары вакансий противоположного знака – диполоны, а также одиночные вакансии. Экспериментальное наблюдение свечения локализованных экситонов у катионной вакансии проведено в работе [13]. Локализованные экситоны, возникающие около ртутеподобных ионов в решетке ЩГК, известны как D-возбуждения [15, 16].

Проявление примесной косвенной активации кристаллофосфоров, согласно [17], наблюдается в системах с изовалентными примесями, катион (анион) которых обладает по сравнению с катионом (анионом) матрицы большим потенциалом ионизации (меньшим сродством к электрону) с шириной запрещенных энергий меньшей по сравнению с основной.

Ярким примером системы с косвенным типом активации является эффективный сцинтилляционный материал на основе кристаллов CsI(Na), где люминесценция возникает благодаря излучательной аннигиляции околоактиваторных экситонов [18,19].

1.3 ЩГК, активированные ртутеподобными ионами

Ртутеподобные ионы имеют конфигурацию внешней электронной оболочки s^2 и в возбужденном состоянии sp . Этим конфигурациям отвечает основной уровень 1S_0 и ряд возбужденных уровней 1P_1 , 3P_0 , 3P_1 , 3P_2 . В поле кубической симметрии разрешены переходы $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ (A) и $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ (C), а в поле тетрагональной симметрии еще и переход $^1S_0 \rightarrow ^3P_2$ (B). Переход $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ разрешен лишь в поле более низкой симметрии.

Существует генетическая связь полос поглощения ЩГК, содержащих ртутеподобные ионы, с соответствующими переходами в свободных ионах активатора [20-24]. В спектрах поглощения ЩГК, активированных ртутеподобными ионами, наблюдаются А-, В- и С-полосы. В спектрах

возбуждения люминесценции, кроме этих полос, наблюдается также D-полоса, расположенная на краю экситонного поглощения основы, (по данным работы [24]).

При возбуждении в A-, B- и C-полосах поглощения в спектрах излучения активированных ЩГК при комнатной температуре наблюдается обычно только A-полоса излучения, благодаря безызлучательным переходам $^1P_1 \rightarrow ^3P_1$ и $^3P_2 \rightarrow ^3P_1$. Квантовый выход внутрицентральной люминесценции таких кристаллов постоянен и близок к единице. Кроме того, в A-полосе поглощения при низких температурах возбуждается также длинноволновая люминесценция, которая сопоставляется с D-излучением [16].

С увеличением концентрации активатора спектральные характеристики ЩГК видоизменяются: возникают дополнительные полосы поглощения и излучения, связанные со сложными активаторными центрами: парными, тройными и т.д. Спектры поглощения, излучения и возбуждения свечения СЦ, как правило, смещены в длинноволновую область спектра по отношению к соответствующим спектрам основных центров [20-22]. Соответственно, интенсивность их полос поглощения и люминесценции в зависимости от содержания активатора изменяется по квадратичному, кубическому и т.д. закону. Поскольку эти добавочные центры возникают и увеличиваются по числу, как при возрастании содержания активатора, так и при воздействиях, увеличивающих число собственных дефектов кристаллической решетки, существуют представления, что в состав сложных центров входит либо пара ионов активатора, либо ион или пара ионов активатора и точечный дефект решетки (вакансии, посторонние примеси) [20-22].

Изучение сложных центров было начато Юстером и Делбеком [25], которые на системе KI(Tl) показали, что существуют парные центры, в состав которых входит два иона таллия. Интенсивность их поглощения возрастает с увеличением концентрации таллия по квадратичному закону.

Кроме парных центров, при повышенных концентрациях активатора образуются еще более сложные центры. Так, обнаруженная при температуре 77K

люминесценция с максимумом 490 нм в кристаллах KI(Tl) в работе [24] связывается с дефектом решетки, в состав которого входит более трех ионов таллия.

В сильно легированных примесями Cu, Pb, Tl, Sn ЩГК наблюдалось свечение (при комнатных температурах), которое совпадает по положению со свечением галоидных солей соответствующих активаторов (при низких температурах). На основании этого было сделано заключение [26], что это свечение связано с фазой активаторной соли, диспергированной в кристаллической решетке.

Детальное исследование таллиевых СЦ проведено в работах Гиндиной [27, 28] на системах KCl(Tl) и KBr(Tl), в которых содержание активатора не превышало предела растворимости. В указанных системах было обнаружено несколько типов центров свечения: одиночные, парные, тройные и более сложные, в состав которых входят соответственно 1, 2, 3 и более катионов таллия, разделенных галоидом. Структура спектров возбуждения СЦ повторяет структуру спектра возбуждения основных центров, в ней хорошо проявляется генетическая связь с переходами в свободном ионе Tl^+ . В спектрах излучения (А-излучения) сложных центров обнаружены две полосы, одна из которых (коротковолновая) связана с излучательными переходами в ионах Tl^+ , возмущенных соседством других активаторных ионов, а другая (длинноволновая) приписана электронным переходам в ионах галоида, входящих в состав этих центров (тип D-излучения). Длительность затухания внутрицентральной люминесценции СЦ того же порядка, что и центров Tl^+ , в то время как D-излучение проявляется лишь при низких температурах и имеет только длительную компоненту. При очень больших содержаниях активатора, когда образуются наиболее крупные агрегаты, спектральные характеристики СЦ приближаются к спектральным характеристикам галоидной соли активатора.

Увеличение числа СЦ сопровождается уменьшением числа одиночных центров Tl^+ . В кристаллах, содержащих СЦ, наблюдается, кроме того, отступление от строго статистического распределения примеси, что обусловлено

энергетической выгодностью образования ассоциаций Tl^+ , вследствие частично гомеополярного характера связи $Tl^+ - X^- - Tl^+$. Поскольку гомеополярность связи таллий - галоид возрастает в гомологическом ряду анионов Cl^- , Br^- , I^- , то, при переходе от хлоридов к йодидам щелочных металлов, образование сложных центров должно происходить при относительно меньших концентрациях активатора.

1.4 Активаторные центры свечения в кристаллах NaI(Tl)

Спектры поглощения кристаллов NaI(Tl) характеризуются А-, В- и С-полосами с максимумами при 293, 250 и 234 нм [29]. D-полоса проявляется при 229 нм [30].

Спектр активаторной фотолюминесценции имеет сложный характер, и форма спектра сильно зависит от температуры и содержания активатора в кристалле, а также от того, в какой из указанных полос люминесценция возбуждается.

Однако существует несколько точек зрения относительно природы центра свечения, а также какими процессами обусловлены стадии разгорания и затухания сцинтилляционного импульса при комнатной температуре.

Так, например, в работах Ван Скайвера показано [17], что при температуре 5К в А-полосе поглощения возбуждается люминесценция 330 нм. Это свечение затухает по экспоненте с постоянной времени $\tau_{\phi} = 10$ нс. С тем же временем высвечивания та же люминесценция затухает после ее возбуждения при 5К в С- и D-полосах поглощения. Наряду с ней в D-полосе возбуждается также и свечение 430 нм, хотя и в шесть раз менее интенсивное. С повышением температуры интенсивность свечения в полосе 330 нм подавляется (с энергией активации тушения 0,045 эВ). Одновременно усиливается яркость люминесценции 430 нм. Суммарный же световой выход фотолюминесценции остается неизменным.

При температуре 77К в А-, В- и С- полосах, независимо от С, возбуждается одна и та же люминесценция с максимумом 430 нм [18, 19]. С

повышением температуры до комнатной и выше ее максимум аномально сдвигается в коротковолновую сторону от 430 нм до 410 нм (320 К) [135]. Несмотря на то, что в указанных полосах при 77К возбуждается также слабая люминесценция 330 нм, интенсивность которой растет с повышением температуры, эту полосу долгое время приписывали исключительно свечению димеров таллия [20, 21, 22], а ее возбуждение в указанной области объясняли перекрытием полос поглощения парных и основных активаторных центров свечения. Бытовало мнение [23, 24], что в кристаллах NaI(Tl), содержащих менее 10^{-3} % Tl в А-, В- и С- полосах при комнатной температуре возбуждается только синяя люминесценция 415 нм, а с ростом С в указанных полосах возбуждается также и люминесценция с максимумом 330 нм, хотя ее полосы возбуждения смещены в длинноволновую сторону от А-, В- и С- полос.

Последнее утверждение справедливо для температуры 77К, однако, при 295 К свечение 330 нм одинаково хорошо возбуждается как в дополнительных А'-, В'-, С'- полосах, так и в основных активаторных полосах поглощения [25]. Предполагалось, что это является следствием частичного перекрытия полос возбуждения при комнатной температуре.

В работе Нагли [26] показано, что и с повышением температуры выше комнатной (до 457К) интенсивность полосы люминесценции 330 нм увеличивается, полосы 415 нм уменьшается, положения максимумов смещаются в противоположных направлениях, причем относительный квантовый выход (до области температурного тушения) остается постоянным.

На основании вышесказанного и по аналогии с KI(Tl) [8] внутрицентровым переходам в ионе Tl^{+} следует приписать полосу люминесценции 330 нм. Наблюдаемое же при 77 К свечение 430 нм, которое с повышением температуры сдвигается в сторону больших энергий (415 нм при 300 К), следует приписать люминесценции околоактиваторных экситонов. Они могут возникать с повышением температуры в результате делокализации активаторного возбуждения в D-люминесценцию [10].

Парные центры ориентированы в решетке вдоль направления $\langle 100 \rangle$, т.е. ионы Tl^+ разделены галоидом [28]. При этом центр молекулярного типа не образуется, наблюдается лишь видоизменение поглощения и люминесценции иона Tl^+ [73]. Ультрафиолетовая полоса обладает коротким временем высвечивания (~ 7 нс) при комнатной температуре [28]. Длинноволновая полоса парных центров несколько отличается по положению от синей люминесценции мономеров (428 нм при возбуждении в В'-полосе, против 420 нм при возбуждении в В-полосе при 180 К) [27]. Сведения о длительности свечения этой полосы в литературе отсутствуют.

По сложившейся традиции термином "сложные активаторные центры" (СЦ) мы будем называть агрегаты таллия в состав которых входит более двух ионов Tl^+ , поглощающие в полосах 315 и 268 нм (77К) и излучающие в полосе 445 нм [95].

В работе [28] показано, что рост C приводит к относительному уменьшению интенсивности свечения Tl^+ и $(Tl^+)_2$ -центров и сдвигу максимума люминесценции в длинноволновую область спектра до 460 нм (295К), а также к увеличению полуширины полосы излучения. Наблюдаемый сдвиг максимума обусловлен появлением дополнительной люминесценции, спектр возбуждения которой сдвинут относительно спектров возбуждения свечения Tl^+ -центров и находится в области 240-280 и 305-325 нм. Этот факт свидетельствует о независимом существовании в кристаллах $NaI(Tl)$ мономеров, димеров и СЦ активатора. Наличие $(Tl^+)_n$ в решетке приводит к ухудшению условий передачи энергии от решетки к центрам свечения и снижению светового выхода кристаллов [29].

В итоге большинство авторов полосу люминесценции в области 425 нм связывают с межуровневыми электронными переходами в одиночном ионе таллия [31-37].

Согласно данным, которые приводятся в работе [31], можно сделать вывод о том, энергия активации 0,026 эВ соответствует переходу с метастабильного 3P_0 на излучательный 3P_1 уровень Tl^+ центра, переходы с

которого в основное 1S_0 состояние, строго говоря, запрещены правилами отбора, и могут быть лишь частично разрешенными. Связанная с такими интеркомбинационными переходами люминесценция обладает, как правило, большой длительностью затухания.

Из представленных данных [38] следует, что более 90% от начальной интенсивности катодолюминесценции спадает при 78 К с постоянной времени 12 нс. Учитывая неизменность во времени спектрального состава люминесценции, с одной стороны, и наличие в кинетике затухания при низких температурах наносекундного компонента с постоянной времени порядка 10^{-8} с, с другой стороны, можно сделать заключение о том, что люминесценция в полосе 425 нм обусловлена разрешенными правилами отбора излучательными электронными переходами с возбужденного уровня центра свечения в основное состояние. Происхождение медленных стадий как разгорания, так и затухания следует считать обусловленным термически активированными процессами заселения этого уровня с нижележащих уровней.

В целом совокупность представленных в работе [38] результатов наиболее полно соответствует модели центра свечения, диаграмма уровней которого представлена в конфигурационных координатах на рис. 1. Облучение кристалла ионизирующей радиацией приводит к созданию ионов таллия в синглетном и триплетном возбужденных состояниях. Излучательными переходами из синглетного 1P_1 в основное 1S_0 состояние обусловлена наносекундная стадия затухания люминесценции. Микросекундная стадия экспоненциального затухания с τ_{fast} обусловлена заселением излучательного 1P_1 уровня в результате термически активированных электронных переходов $^3P_1 \rightarrow ^1P_1$ с энергией активации 0,026 эВ (левая фигурная стрелка на рис. 1).

Населенность 3P_1 уровня в свою очередь подпитывается уровнем 3P_0 . Реализацией термически активированных переходов $^3P_0 \rightarrow ^3P_1$ обусловлена, по нашему мнению, возникающая при $T \approx 130$ К стадия пострadiaционного нарастания интенсивности люминесценции в субмикросекундном временном интервале. Увеличение скорости разгорания с ростом T выше 130 К с $E_a = 0,07$

эВ связано с ростом вероятности преодоления энергетического барьера, разделяющего 3P_0 и 3P_1 состояния (правая фигурная стрелка на схеме рис. 1).

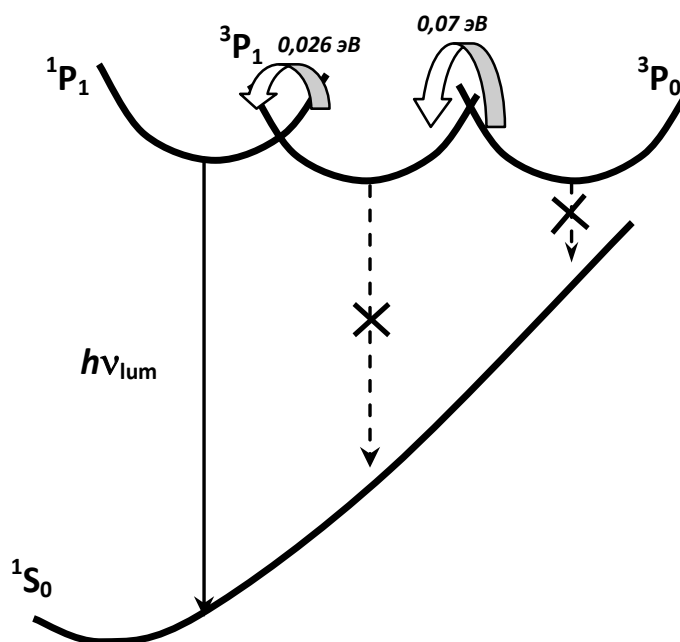


Рисунок 1 – Схема уровней центра свечения в кристалле NaI:Tl

Таким образом, спектрально-кинетические свойства люминесценции при 425 нм в кристалле NaI:Tl можно считать обусловленными внутрицентровыми конфигурационными преобразованиями возбужденного Tl^+ центра, сопровождающимися межуровневыми электронными переходами и ведущими в конечном счете к заселению излучательного 1P_1 уровня.

Исходя из данных в работе [38] можно сделать предположение о том, что сцинтилляционные вспышки NaI:Tl в области температур вблизи комнатной обусловлены внутрицентровыми электронными переходами $^1P_1 \rightarrow ^1S_0$ в ионах таллия. Стадию нарастания сцинтилляционного импульса следует считать обусловленной электронными переходами с 3P_0 на 3P_1 уровень Tl^+ центра; длительность вспышки определяется временем перехода электрона с метастабильного 3P_1 уровня в излучательное 1P_1 состояние.

1.5 Виды фотоприемников для регистрации ИК-излучения

В связи с тем, что появились предположения об люминесцентных процессах в ИК-области, связанные с процессами переноса заряда аналогично процессам в CsI:Tl, где формируется примесная подзона проводимости [41],

необходимо провести измерения по детектированию ИК-излучения в NaI:Tl. Для этого необходимо выбрать фотоприемник, соответствующий определённым требованиям.

Фотоприемники предназначены для преобразования светового излучения в электрические сигналы. В качестве фотоприемников могут быть использованы фоторезисторы, фотодиоды, фототиристоры и т. д.

При подборе фотоизлучателей и фотоприемников необходимо согласовывать их спектральные характеристики. В противном случае вследствие несовершенства существующих источников света достаточно сложно получить удовлетворительные результаты.

Фотоэлектрические явления, на основе которых строятся фотоприемники, можно разделить на три основных вида:

1. изменение электропроводности вещества при его освещении — внутренний фотоэффект,
2. возникновение ЭДС на границе двух материалов под действием света — фотоэффект в запирающем слое (используют в полупроводниковых фотоэлементах);
3. испускание веществом электронов под действием света — внешний фотоэффект (используют в вакуумных и газонаполненных фотоэлементах).

В связи с тем, что процессы протекающие в NaI:Tl основаны на внутреннем фотоэффекте, в дальнейшем будут рассмотрены только фотоприемники основанные на данном эффекте.

1.5.1 Фоторезисторы

В фоторезисторах используется явление изменения сопротивления вещества под действием инфракрасного, видимого или ультрафиолетового излучения. Основным элементом их является полупроводниковая пластина, сопротивление которой при освещении изменяется. Механизм возникновения фотопроводимости можно объяснить следующим образом. В затемненном полупроводнике в результате воздействия

тепловой энергии имеется небольшое количество подвижных носителей заряда (электронов и дырок) [39,40].

Соответственно полупроводник обладает начальной проводимостью, которая носит название темновой:

$$\sigma_0 = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p), \quad (1)$$

где q — заряд электрода; n_0 , p_0 - концентрация подвижных носителей заряда в полупроводнике в равновесном состоянии [39,40].

Под действием света концентрация подвижных носителей заряда увеличивается, причем возможны различные механизмы их генерации.

Возрастание концентрации дырок и электронов может происходить за счет того, что кванты электромагнитного излучения возбуждают электроны и переводят из валентной зоны в зону проводимости.

Кроме того, они могут вызвать переход электронов из валентной зоны на примесные уровни и увеличение только дырочной электропроводности или переход электронов с примесных уровней в зону проводимости и увеличение электронной электропроводности [39,40].

Таким образом, в полупроводнике при облучении светом концентрация подвижных носителей заряда увеличивается на величину и проводимость его резко возрастает. Иначе говоря, под действием излучения (фотонов) происходит генерация подвижных носителей заряда (электронов и дырок) => сопротивление фоторезистора уменьшается.

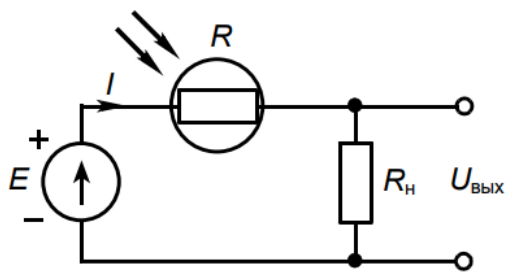


Рисунок 2 – Схема включения фоторезистора [39,40]

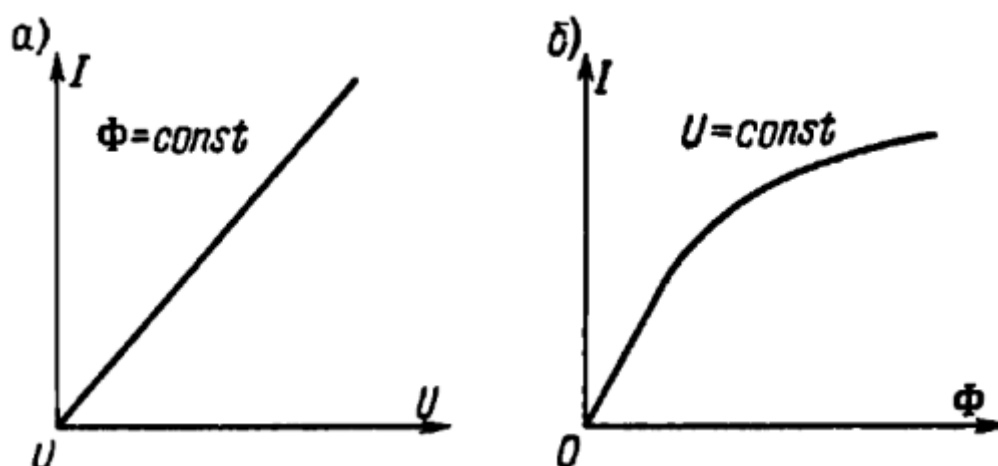


Рисунок 3 – а) ВАХ фоторезисторов; б) характеристика интегральной чувствительности [39,40]

К серьезным недостаткам фоторезисторов относятся:

- сильная зависимость сопротивления от температуры;
- большая инерционность, связанная с существенным временным рекомбинации электронов и дырок после прекращения облучения, поэтому их применяют на частотах до нескольких кГц.

1.5.2 Фототранзисторы

Фототранзистор – биполярный транзистор, в корпусе которого имеется технологическое «окно», через которое световой поток попадает на область базы. Управляя величиной светового потока (подобно току базы) можно управлять значением тока коллектора. При работе фототранзистора вывод базы может не использоваться. Включение транзистора в электрическую цепь аналогично обычному биполярному транзистору [39,40]. ВАХ фототранзистора представлена на рис. 4.

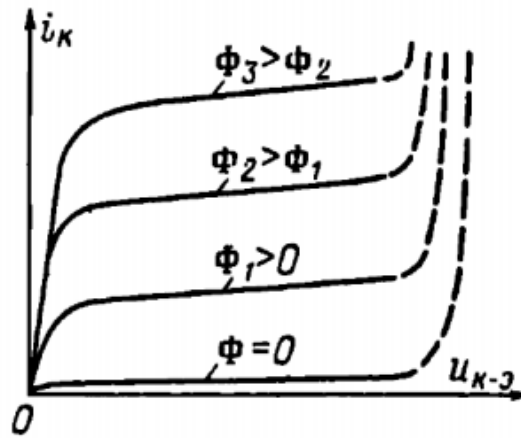


Рисунок 4 – ВАХ фототранзисторов [39,40]

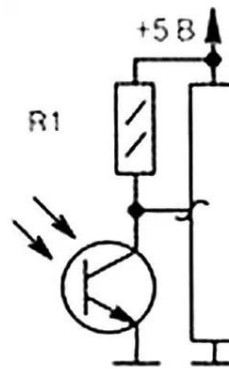


Рисунок 5 – Схема включения с общим эмиттером [39,40]

На рис.5 схема включения с общим эмиттером, по этой схеме создается сигнал выхода, переходящий от высокого состояния в низкое при падении лучей света. Схема выполнена с помощью подключения сопротивления между коллектором транзистора и источником питания. Напряжения выхода снимают с коллектора [39,40].

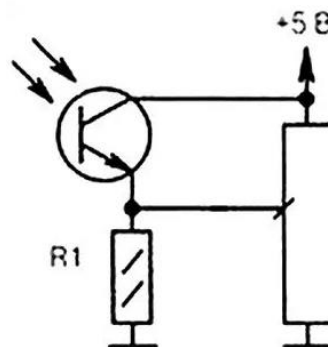


Рисунок 6 – Схема включения с общим коллектором [39,40]

На рис.6 схема включения с общим коллектором, где усилитель, подключенный с общим коллектором, создает сигнал выхода, переходящий от низкого состояния в высокое, при попадании света на полупроводник. Эта схема образуется подключением сопротивления между отрицательным выводом питания и эмиттера. С эмиттера снимается выходной сигнал.

Главное преимущество фототранзисторов, интегральная чувствительность на порядок выше, чем у фотодиодов.

1.5.3 Фотодиоды

Основным элементом фотодиода является $p-n$ -переход. При его освещении происходит генерация электронно-дырочных пар. Электрическое поле перехода разделяет неравновесные носители заряда. Ток, образованный этими носителями, впадает по направлению с обратным током $p-n$ -перехода. Поэтому вольтамперную характеристику (ВАХ) $p-n$ -перехода при освещении можно записать в виде [39,40]:

$$I = I_{нас} \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] - I_{\phi}, \quad (2)$$

где $I_{нас}$ - ток насыщения; I_{ϕ} - фототок.

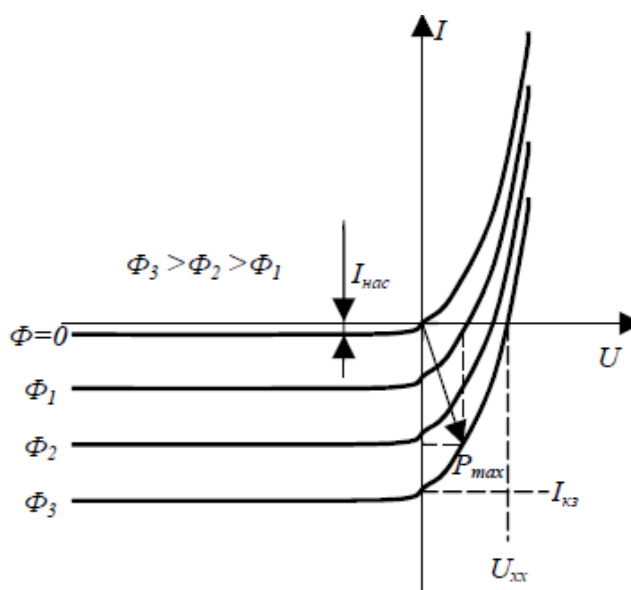


Рисунок 7 – ВАХ фотодиода [39,40]

Фотодиоды работают в двух режимах: фотодиодном – с внешним источником смещения и в вентильном – без источника смещения.

В первом диод смещается в обратном направлении, и фототок является функцией освещенности. Во втором режиме прибор работает в режиме генерации фото-ЭДС.

При работе в фотогальваническом режиме полярность фототока направлена от катода к аноду. Очевидно, что если извне не прикладывается смещение, то фототок заряжает анод положительно относительно катода. Часть фототока будет протекать в обратном направлении через фотодиод, а часть – через сопротивление нагрузки. Если цепь нагрузки не замкнута или сопротивление нагрузки исключительно высоко, то большая часть фототока протекает через диод в прямом направлении [39,40].

Фотогальванический режим характеризуется отсутствием источника внешнего напряжения в цепи. При этом внешнее сопротивление в общем случае может быть включено во внешнюю цепь. Уравнение для фотогальванического режима работы [39,40]:

$$I = \frac{\Delta\varphi}{R} = I_{\Phi} + I_s (1 - e^{\frac{-q\Delta\varphi}{kT}}) \quad (3)$$

где, в отсутствии внешнего источника тока $\Delta\varphi$ – это уменьшение высоты потенциального барьера или напряжение на выходах фотодиода, обусловленное фототоком при освещении фотодиода.

При отсутствии света и разомкнутой цепи нагрузки на p - n переходе фотодиода создается потенциальный барьер (рис. 8а). Под действием света в n -области генерируются пары «электрон-дырка». Двигаясь хаотически во всех направлениях, часть образовавшихся дырок подходит к переходу, где их захватывает поле потенциального барьера и перебрасывает в p -область, т.е. идет экстракция дырок. Электроны остаются в n -области, куда их отталкивает поле барьера, т.е. в p -области происходит накопление дырок, в n -области – электронов, а на зажимах фотодиода возникает фото-ЭДС E_{Φ} , величина которой нелинейно зависит от светового потока Φ . При подключении нагрузки в цепи

фотодиода потечет ток I_Φ , т.е. происходит непосредственное преобразование световой энергии в электрическую. При коротком замыкании фотодиода, когда сопротивление нагрузки $R_H=0$, ток фотодиода $I_{KЗ}$ линейно растет с ростом Φ [39,40].

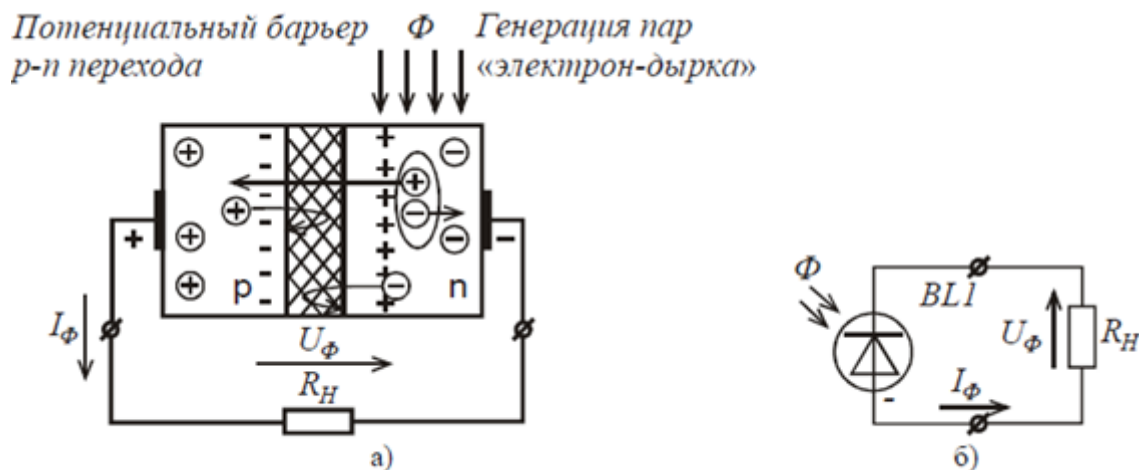


Рисунок 8 – Фотогальванический режим:

- а) работа фотодиода в фотогальваническом режиме;
- б) схема включения фотодиода в фотогальваническом режиме

При разомкнутой внешней цепи ($R=0$), для случая, когда внешнее напряжение отсутствует, ток через внешнюю цепь не протекает. В этом случае напряжение на выводах фотодиода будет максимальным. Эту величину $\Delta\phi=\phi_v$ называют напряжением холостого хода или вентиляной фото-ЭДС. Из уравнения (1), при условии $I=0$, получаем уравнение, позволяющее по известным значениям фототока I_Φ и тока нагрузки I_s рассчитать фото-ЭДС [39,40]:

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_s}{I_\Phi} + 1\right). \quad (4)$$

Фото-ЭДС можно также определить непосредственно, подключая к выводам фотодиода вольтметр, но внутреннее сопротивление вольтметра должно быть больше сопротивления р-п-перехода.

В режиме короткого замыкания напряжение на выводах фотодиода $V_G = 0$. Тогда из уравнения (2) следует, что ток короткого замыкания $I_{KЗ}$ во внешней цепи равен фототоку I_Φ :

$$I_{K3} = I_{\Phi}. \quad (5)$$

Итак, в режиме короткого замыкания определяется величина фототока.

Световая характеристика фотодиода – это зависимость фототока от светового потока при постоянном напряжении на фотодиод (рис. 9.) $I_{\Phi} = f(\Phi)$ при $U_{обр} = const$.

Сюда же относится и зависимость фото-ЭДС от величины светового потока. Количество электронно-дырочных пар, образующихся в фотодиоде при освещении, пропорционально количеству фотонов, падающих на фотодиод. Поэтому фототок будет пропорционален величине падающего на фотодиод светового потока [39,40]:

$$I_{\Phi} = K * \Phi, \quad (6)$$

где K – коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров фотодиода.

В фотогальваническом режиме при наличии внешнего сопротивления ток во внешней цепи не будет пропорционален световому потоку, так как величина $\Delta\phi$ зависит от фототока, т.е. от величины светового потока.

В фотогальваническом режиме при коротком замыкании ток во внешней цепи пропорционален световому потоку. Однако эта линейность может быть нарушена при больших световых потоках, если р- и n-области полупроводника имеют заметные сопротивления, эти сопротивления играют роль внешних сопротивлений. На рис.9 показаны световые характеристики фотодиода в разных режимах работы.

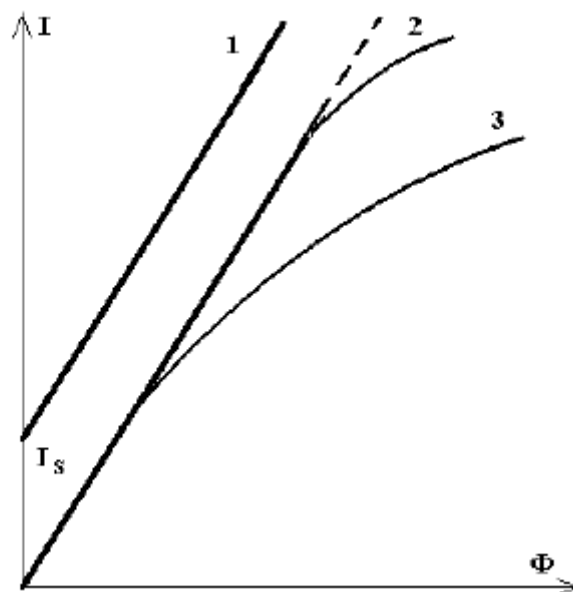


Рисунок 9 – Световая характеристика фотодиода:

- 1) фотодиодный режим;
- 2) режим короткого замыкания;
- 3) фотогальванический режим при наличии сопротивления во внешней цепи

Световые характеристики фотодиода практически линейны, причем их наклон мало зависит от приложенного напряжения $U_{ОБР}$.

ВЫВОДЫ ИЗ ГЛАВЫ 1

Исходя из данных выше изложенных статей, определяющие люминесцентные и сцинтилляционные свойства кристаллов NaI(Tl), вытекает следующее. Данные множества авторов противоречивы и не сходятся между собой относительно центров свечения в NaI:Tl. В частности считается, что при облучении кристалла NaI:Tl светом из области А-полосы поглощения возбуждаются внутрицентровые переходы в ионе Tl^{+} и именно эти переходы отвечают за активаторную люминесценцию кристалла.

Однако если бы это было так, то при увеличении температуры наблюдалось бы уменьшение интенсивности люминесценции Tl^{+} -центров из-за процессов тушения. В действительности мы, наоборот, наблюдаем значительный рост интенсивности люминесценции с повышением температуры.

Этот факт свидетельствует в пользу предположения о том, что активаторная люминесценция в NaI:Tl связана с процессами переноса заряда аналогично процессам в CsI:Tl, где формируется примесная подзона проводимости. В таком случае рост температуры способствует более активному протеканию процессов с переносом заряда (фононно-ассистированный процесс).

Для проверки этого предположения необходимо:

- изучить спектрально-кинетические характеристики люминесценции NaI:Tl при различных видах возбуждения;
- изучить температурные зависимости интенсивности люминесценции,

Что же касается исследований процессов, протекающих в ИК-области в NaI:Tl, можно сказать следующее. Для регистрирования процессов в ИК-области необходимо, выбрать приемник с хорошим временным разрешением. Под это критерий хорошо подходят фотодиоды. Также для исследований процессов нужен фотодиод, который регистрирует в диапазоне длин волн от 0,5 до 1,9 мкм. Под этот параметр подходят именно германиевые фотодиоды.

Поскольку фотодиоды могут работать в двух режимах, а именно: в фотодиодном и вентильном, дозволен тот режим, который обеспечит высокую

обнаружительную способность, то бишь вентильный режим. Именно в вентильном режиме работы, фотодиод преобразует световую энергию в электрическую, генерируя фото-э.д.с. Также это позволит определить предел линейности световой характеристики и определение временного разрешения (собственное время спада).

Также вентильный режим работы разделяется на два режима:

- холостой ход (хх),
- короткое замыкание (кз).

Режим близкий к холостому ходу используется для получения энергии от фотодиода. То есть для применения фотодиода в качестве солнечной батареи. В режиме короткого замыкания, напряжение на фотодиоде близкое к нулю, а обратный ток прямо пропорционален световому потоку. Этот режим используется для построения фотодатчиков. Соответственно для нас более приемлем вентильный режим близкий короткому замыканию.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Установка «ИМПУЛЬС – 1»



Рисунок 10 – Установка «ИПУЛЬС-1»

Метод люминесцентной и абсорбционной спектроскопии с временным разрешением (ЛАСВР), позволяет изучать кинетику создания и эволюции центров свечения и окраски, возникающих в оптически прозрачных материалах под действием коротких импульсов возбуждающей радиации. Созданная в ходе реализации этого метода установка (ее блок-схема представлена на рис.11) содержит три функциональные системы: источник импульсной возбуждающей радиации, импульсный оптический спектрометр и систему синхронизации.

Источником возбуждения служил наносекундный ускоритель электронов разработки Г. Месяца и В.Ковальчука, генерирующий пучки с параметрами $E_{cp} = 0.25 \text{ МэВ}$, $t = 3...30 \text{ нс}$. Амплитудно-временные характеристики импульса тока пучка изучались осциллографическим методом с помощью импульсного трансформатора тока ("пояса Роговского") и цилиндра Фарадея. Регулировка длительности токового импульса осуществлялась путем срезания его заднего фронта специальным разрядником, шунтирующим ток на выходном каскаде ГИНа.

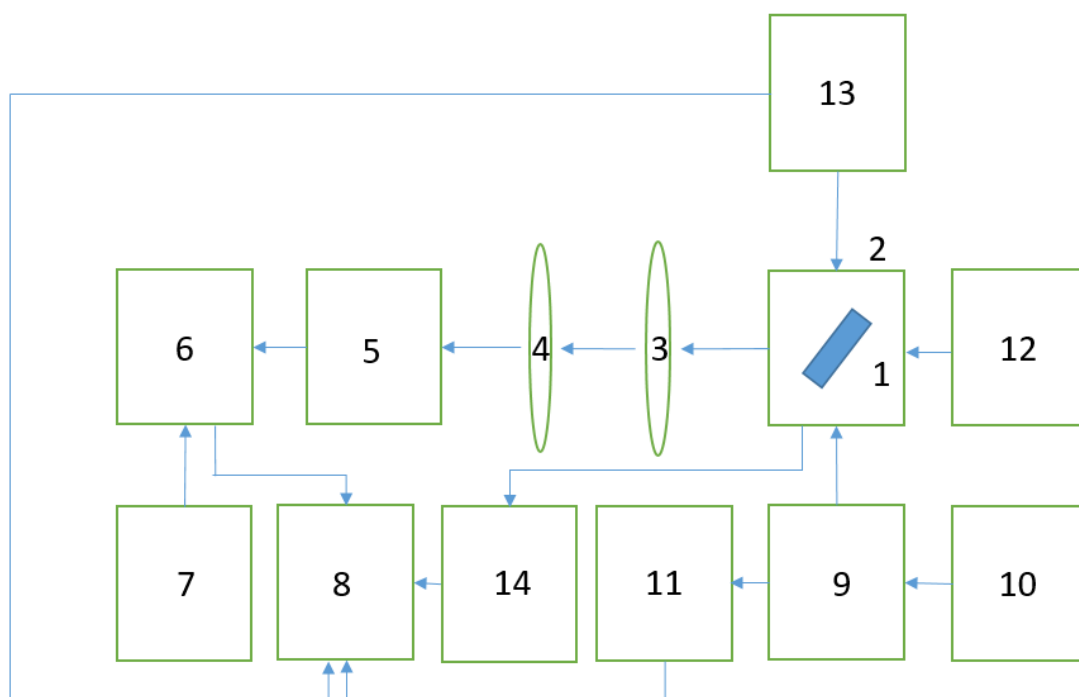


Рисунок 11 – Блок-схема установки для импульсной спектроскопии

1 – образец; 2 – криостат; 3,4 – конденсорные линзы; 5 – монохроматор МДР-3; 6 – ФЭУ для регистрации сигнала с монохроматора; 7 – блок импульсного питания ФЭУ; 8 – осциллограф многоканальный; 9 – наносекундный ускоритель электронов; 10 – блок питания ускорителя; 11 – схема сравнения и управления режимами работы установки; 12 – лампа для юстировки; 13 – N_2 лазер; 14 – ФЭУ для регистрации всего импульса

2.2 Фотодиод 9Э-111А

Для проведения исследований был выбран фотодиод 9Э-111А, предназначенный для применения в качестве приемников и датчиков инфракрасного излучения в составе оптико-электронной аппаратуры, систем фотоэлектрической автоматики и бесконтактного измерения температуры, вычислительной и измерительной техники в диапазоне длин волн от 0,5 до 1,9 мкм.

Таблица 1 – Характеристики фотодиода 9Э-111А

Тип прибора	$A_{\text{фча}}$, мм	2β , град не менее	$\Delta\lambda$, мкм	$\Delta\lambda_{\text{макс}}$, мкм	U_p , не более	I_T , мкА не более	S_u (источнику типа «А», мА/лм, (мк/Алк), не менее	$\Phi_{\text{п1}}$, лм·Гц ^{-1/2}	τ , с не более	ΔT , °С	Габаритные размеры, мм. не	Масса, г, не более
9Э-111А	Ø1,13	8	0,5 - 1,8	1,5-1,55	10	10	17	-	1, 2·10 ⁻⁷	-50 ... +50	Ø8, 3 x16	2,5

$A_{\text{фча}}$ – размер (мм) или площадь фоточувствительной площадки, мм²; 2β – плоский угол зрения, град; $\Delta\lambda$ – область спектральной чувствительности, мкм; $\Delta\lambda_{\text{макс}}$ – максимум спектральной характеристики, мкм; U_p – рабочее напряжение, В; I_T – темновой ток, мкА; τ – постоянная времени по спаду или нарастанию фототока, с; СД – емкость фотодиода, пФ; ΔT – диапазон рабочих температур, °С; S_u – интегральная токовая чувствительность, мкА/лк, А/лм или А/Вт; $\Phi_{\text{п1}}$ – пороговая чувствительность, лм·Гц^{-1/2}

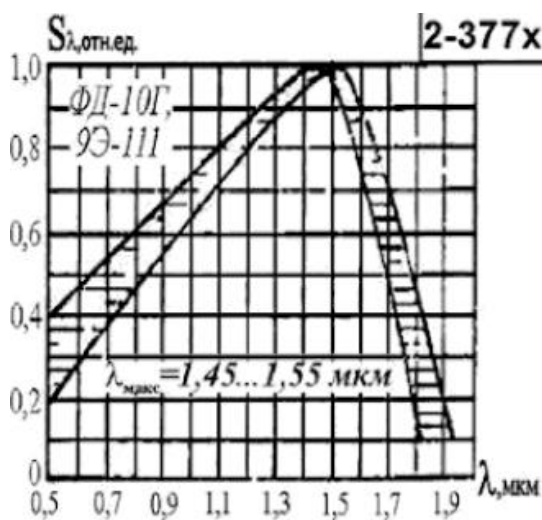


Рисунок 12 – Относительные спектральные характеристики германиевого фотодиода 9Э-111А

2.3 Схема включения фотодиода 9Э-111А

Для исследования люминесцентных свойств NaI:Tl в ИК-области, необходимо верно подключить фотодиод в схему включения. На рис. 13 изображена схема включения фотодиода в вентильном режиме. Для съема сигнала, осциллограф подключается параллельно к нагрузочному сопротивлению.

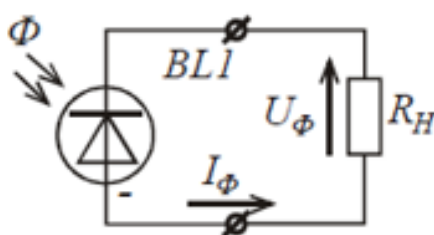


Рисунок 13 – Схема включения фотодиода в вентильном режиме [3].

На рис.14 изображена блок-схема подключения фотодиода в совокупности с наносекундным ускорителем.

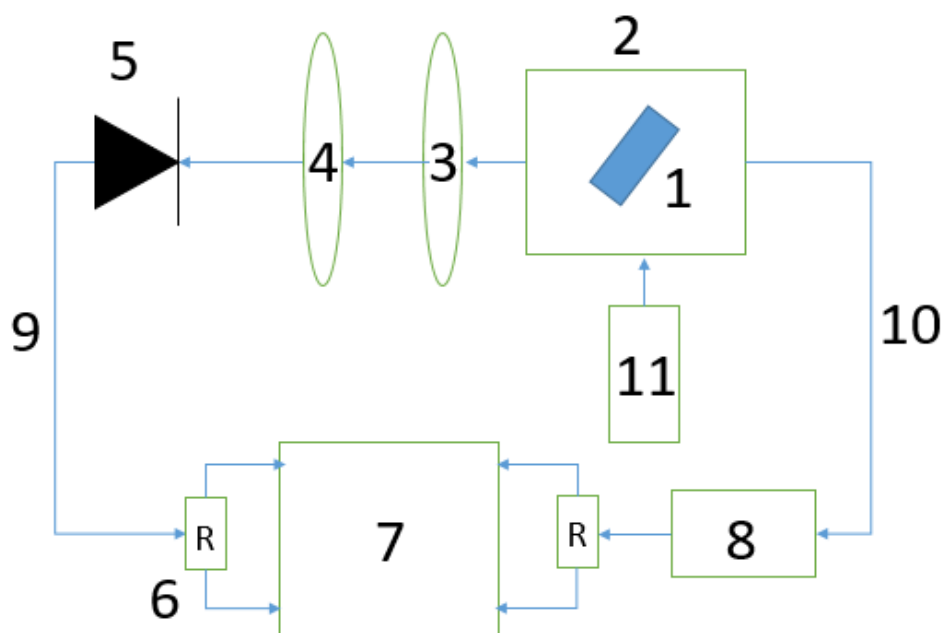


Рисунок 14 – Блок схема включения фотодиода для регистрации ИК-излучения

1 – образец; 2 – криостат; 3 – конденсорные линзы; 4 – фотофильтры ИКС; 5 – фотодиод 9Э-111А; 6 – нагрузочные сопротивления; 7 – многоканальный осциллограф; 8 – фотоумножитель; 9,10 – оптоволоконный кабель фотодиода и фотоумножителя; 11 – источник возбуждения

2.4 Методика регистрации ИК-излучения с помощью фотодиода 9Э-111А

Предполагается регистрация кинетики затухания люминесценции в ИК-области германиевым фотодиодом 9Э-111А, имеющим спектр чувствительности, подходящий для решения нашей задачи (см. рис. 12). Для предотвращения вклада в суммарный регистрируемый сигнал излучения с длиной волны короче 1000 нм дополнительно будут использованы ИК-фильтры марки НС, чья спектральная характеристика показана на рис. 17. При настройке схемы регистрации в качестве объекта использовался монокристалл CsI:Tl, т.к. он имеет сходные с NaI:Tl люминесцентные свойства и при этом негигроскопичен, что упрощает работу.

Для экспериментальной проверки пригодности использования фотодиода 9Э-111А для регистрации быстропротекающих процессов было проведено сравнение формы сигнала ФЭУ и ФД при регистрации импульса лазерного излучения (рис. 15а).

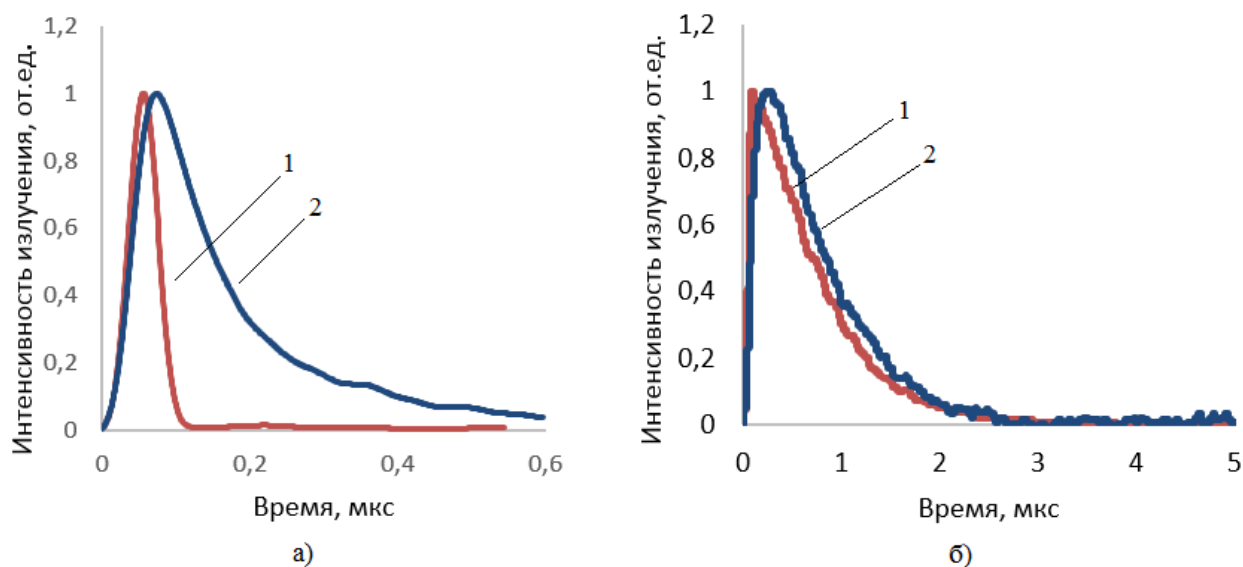


Рисунок 15 – Осциллограммы импульса излучения N₂ лазера (а) и вспышки фотолюминесценции CsI:Tl (б), регистрируемые ФЭУ (1) и ФД 9Э-111А (2)

Можно видеть, что фронты нарастания и спада импульса у фотодиода больше, что говорит о более высокой инерционности фотодиода и о том, что не

рекомендуется его использовать при регистрации быстропротекающих процессов в наносекундной области. Однако сравнение формы сигналов от ФЭУ и ФД при регистрации импульса фотолюминесценции, возбуждаемой в CsI:Tl N₂ лазером, показывает, что при изучении затухания люминесценции в микросекундном диапазоне точность измерений фотодиодом достаточна.

В ходе работ по монтажу измерительной схемы необходимо было определить оптимальное расстояние от источника излучения, до фотоприемника. Было проведено сравнение формы сигнала на выходе ФД при различной интенсивности приходящего на него излучения, зависящей от расстояния источник-приемник. Как видно из результатов рис. 16 форма выдаваемого фотодиодом сигнала неизменна в диапазоне возможных в установке расстояний.

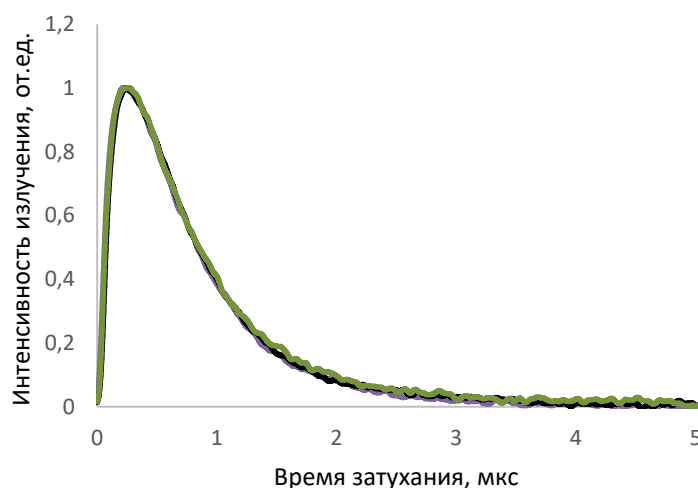


Рисунок 16 – Импульсы фотолюминесценции, зарегистрированные фотодиодом 9Э-111А при различных расстояниях источник–приемник

Для обеспечения возможности одновременной регистрации от двух каналов (ФД и ФЭУ) необходимо ослабить интенсивность падающего на ФД излучения, для чего были использованы нейтральные светофильтры марок НС-1, НС-2, НС-6, НС-7, коэффициенты пропускания которых приведены в табл. 2. На рис. 17 приведены отнормированные к 1 для удобства сравнения осциллограммы фотолюминесценции CsI:Tl при использовании каждого из этих светофильтров. Неизменность формы импульса при использовании различных

СФ и при отсутствии СФ говорит о том, что все приведенные фильтры снижают интенсивность сигнала достаточно равномерно по спектру.

Таблица 2 – Коэффициенты внутреннего пропускания стекол марки НС
в слое 2 мм в диапазоне длин волн 550-590 нм

	НС-1	НС-2	НС-6	НС-7
$\tau_i(\lambda)$	0,78	0,4	0,8	0,62

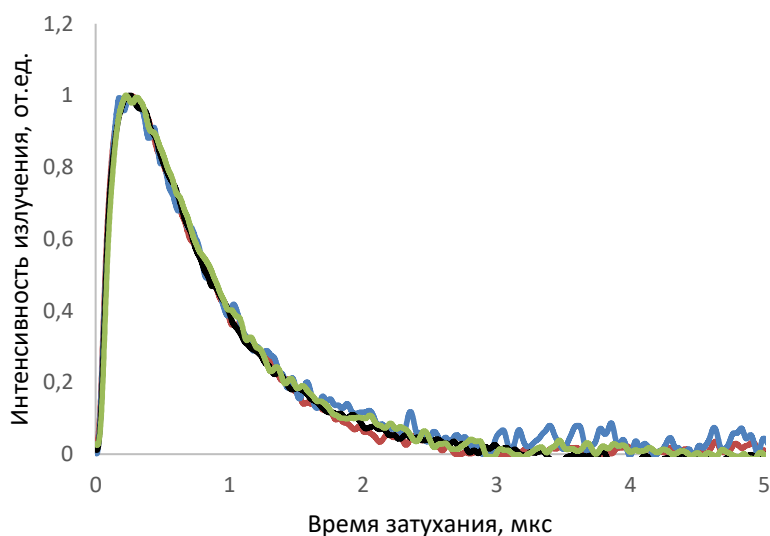


Рисунок 17 – Импульс фотолюминесценции CsI:Tl, зарегистрированный фотодиодом 9Э-111А, с применением нейтральных стекол НС-1,6,7,2

На рис. 18 в полулогарифмических координатах представлен пример кинетик затухания фотолюминесценции, полученных без светофильтра (а) и с использованием НС-6 (б). Обе зависимости хорошо описываются в области единиц микросекунд одной экспоненциальной функцией с постоянного времени затухания 0,63 мкс, в зависимости от марки стекла, есть небольшой разброс в длинноволновой области излучения.

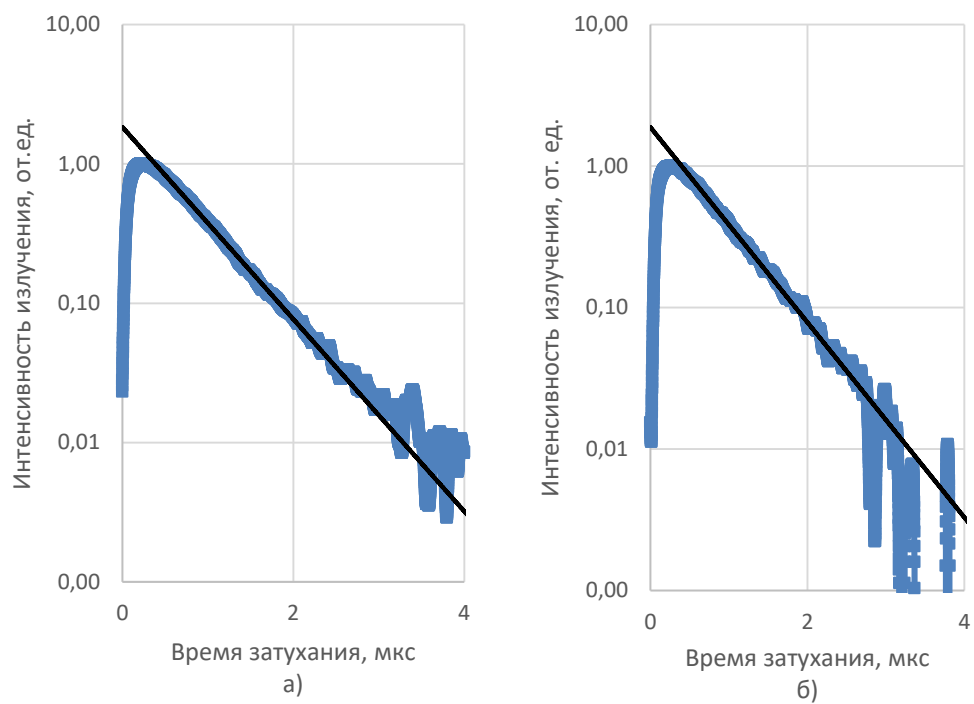


Рисунок 18 – Кинетика затухания фотолюминесценции CsI:Tl при возбуждении азотным лазером (337 нм), зарегистрированная фотодиодом 9Э-111А без нейтрального СФ (а) и с НС-6 (б).

Сплошной кривой показана аппроксимация кинетики

ВЫВОДЫ ИЗ ГЛАВЫ 2

Таким образом, исходя из полученных выше данных, для проведения исследования люминесцентных свойств NaI:Tl в области ИК-излучения, фотодиод 9Э-111А подходит. Для регистрации сигнала фотодиодом 9Э-111А была разработана схема включения, где съема сигнала его необходимо подключить в вентильном режиме.

Далее для экспериментальной проверки пригодности использования фотодиода 9Э-111А, для регистрации быстропротекающих процессов было проведено сравнение формы сигнала ФЭУ и ФД при регистрации импульса лазерного излучения с длиной волны 337 нм. При измерениях было обнаружено, что ФД обладает высокой инерционностью и о том, что не рекомендуется его использовать при регистрации быстропротекающих процессов в наносекундной области. Однако сравнение формы сигналов от ФЭУ и ФД при регистрации импульса фотолюминесценции, возбуждаемой в CsI:Tl N₂ лазером, показывает, что при изучении затухания люминесценции в микросекундном диапазоне точность измерений фотодиодом достаточна.

В ходе работ по монтажу измерительной схемы необходимо было определить оптимальное расстояние от источника излучения, до фотоприемника. Было проведено сравнение формы сигнала на выходе ФД при различной интенсивности приходящего на него излучения, зависящей от расстояния источник-приемник. Как видно из результатов рис. 16 форма выдаваемого фотодиодом сигнала неизменна в диапазоне возможных в установке расстояний.

Для обеспечения возможности одновременной регистрации от двух каналов (ФД и ФЭУ) необходимо было ослабить интенсивность падающего на ФД излучения, для чего были использованы нейтральные светофильтры марок НС, коэффициенты пропускания которых приведены в табл. 2. Неизменность формы импульса при использовании различных СФ и при отсутствии СФ говорит о том, что все приведенные фильтры снижают интенсивность сигнала достаточно равномерно по спектру.

ГЛАВА 3. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В NaI:Tl

3.1 Спектры и кинетики фотолюминесценции

3.1.1 Люминесценция при комнатной температуре

Были измерены и построены спектры фотолюминесценции ЩГК NaI:Tl при комнатной температуре при возбуждении N₂ лазером с длиной волны излучения 337 нм для свежевывколотого образца и для образца, на поверхности которого появился белый налет в результате откачки воздуха из криостата.

Как видно из данных рис. 19 (а), спектр свежевывколотого образца хорошо описывается монополосой гауссовой формы с максимумом при 2,9 эВ и шириной на полувысоте равной 0,552 эВ.

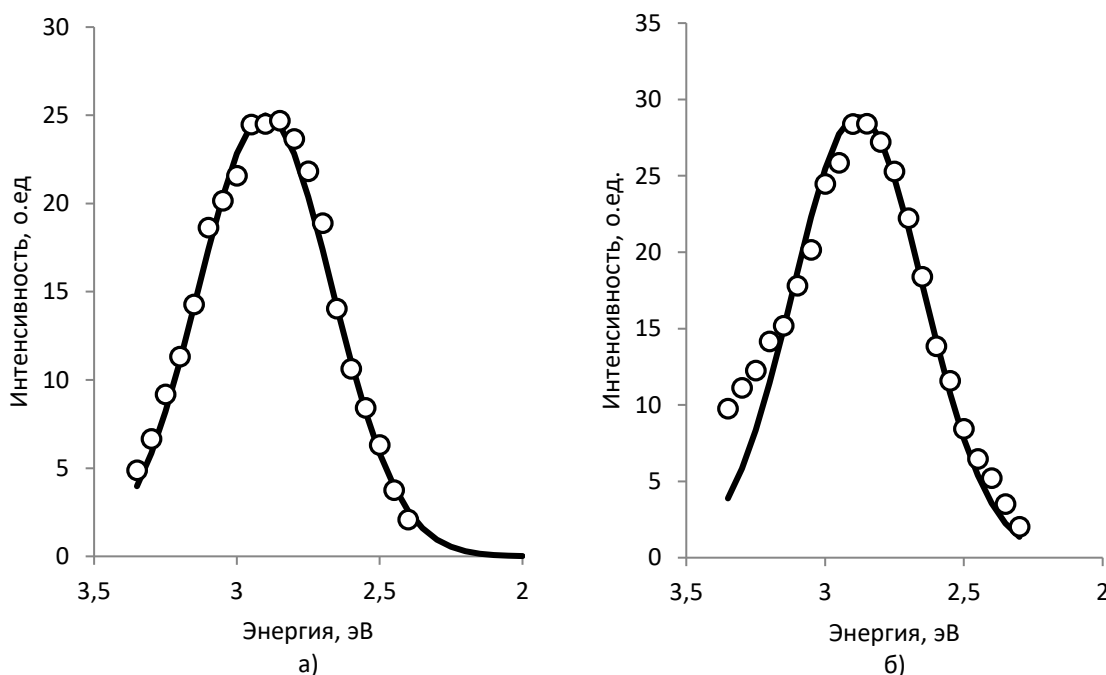


Рисунок 19 – Спектры фотолюминесценции свежевывколотого образца NaI:Tl (а) и образца с белым налетом (б) при возбуждении 337 нм при 295 К

Спектр фотолюминесценции образца с налетом (рис. 19 б) не может быть описан одной этой полосой. Можно видеть, что в коротковолновой части спектра наблюдается некоторый рост интенсивности люминесценции по сравнению со свежеотколотым кристаллом.

Были построены кинетики затухания фотолюминесценции при комнатной температуре. На рис. 20 в полулогарифмических координатах приводится кинетическая кривая люминесценции на длине волны 425 нм (2,9 эВ).

Как можно видеть данная кривая хорошо описывается суммой двух экспоненциальных компонентов с постоянными времени затухания 230 и 1200 нс.

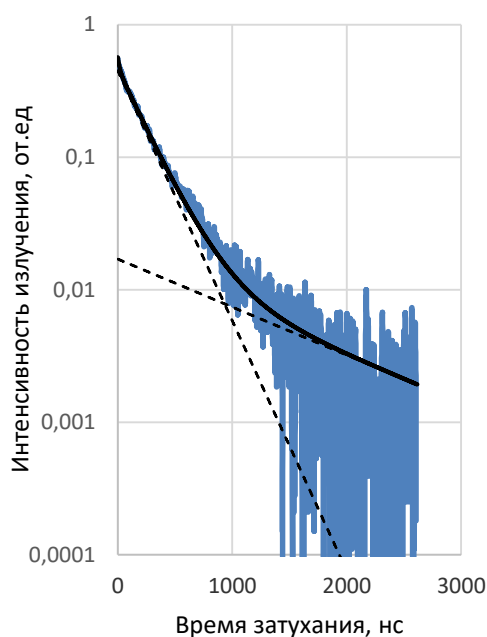


Рисунок 20 – Кинетика затухания фотолюминесценции NaI:Tl в полосе 2,9 эВ при возбуждении 337 нм при 295 К. Сплошной кривой показана аппроксимация двумя экспоненциальными компонентами (пунктирные линии)

3.1.2 Люминесценция при повышенных температурах

Были получен набор кинетик затухания фотолюминесценции в диапазоне температур от 295 К до 460 К. На рис. 21 приведена зависимость спада интенсивности фотолюминесценции NaI:Tl со временем при температуре 460 К. Данная кривая хорошо описывается суммой двух экспонент. Быстрая компонента имеет характеристическое время затухания $\tau_{\text{быстр}} = 110$ нс, медленная – $\tau_{\text{медл}} = 1200$ нс.

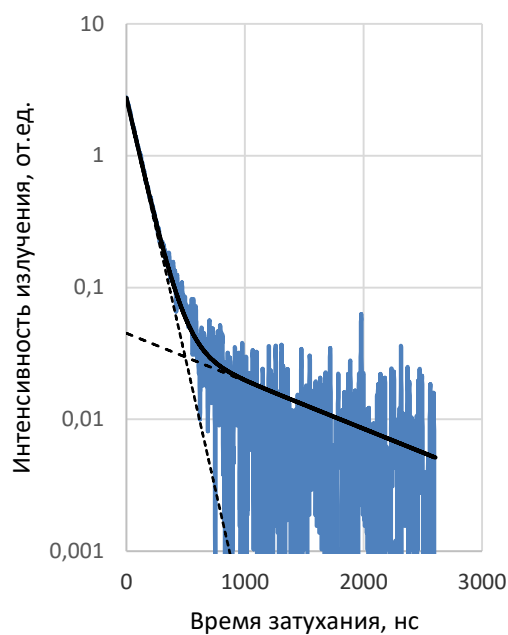


Рисунок 21 – Кинетика затухания фотолюминесценции NaI:Tl в полосе 2,9 эВ, измеренная при 460 К при возбуждении 337 нм. Сплошной кривой показана аппроксимация двумя экспоненциальными компонентами (пунктирные линии)

Сравнивая данные рис. 20 и 21 можно видеть, что повышение температуры приводит к сокращению характеристического времени затухания быстрой компоненты $\tau_{\text{быстр}}$ с 230 нс до 110 нс, однако $\tau_{\text{медл}}$ медленного компонента остается неизменным и равно 1200 нс.

3.2 Спектры и кинетики катодолюминесценции

3.2.1. Люминесценция при комнатной температуре.

Были измерены и построены спектры катодолюминесценции и рентгенолюминесценции свежевыколотого образца NaI:Tl при комнатной температуре в диапазоне длин волн от 317 нм до 620 нм.

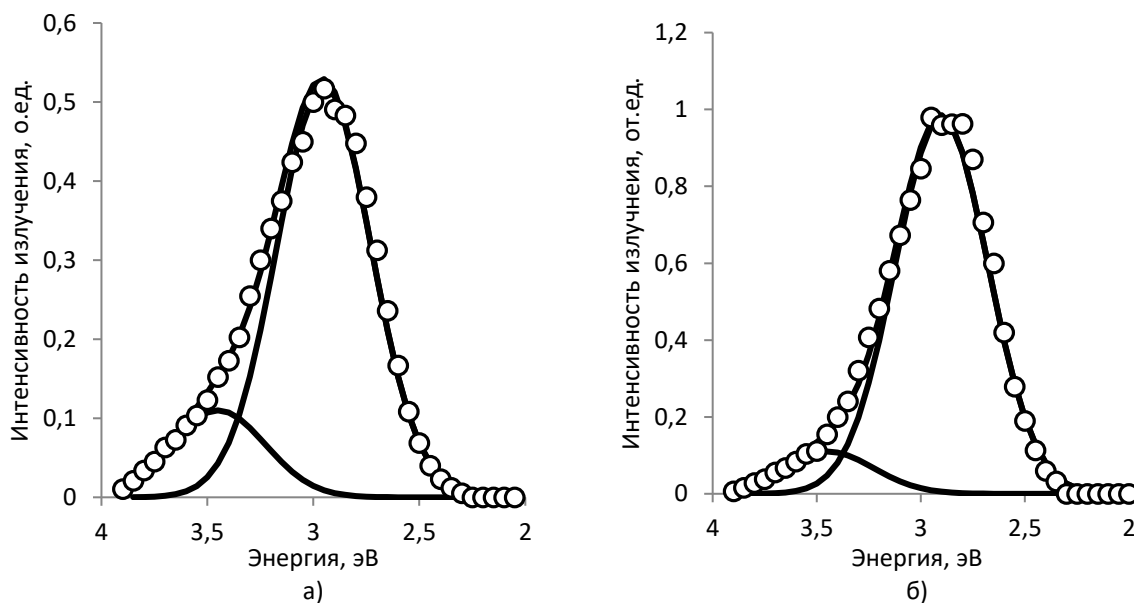


Рисунок 22 – спектр катодолюминесценции (а) и рентгенолюминесценции (б) NaI:Tl при комнатной температуре. Сплошными кривыми показана аппроксимация функции.

Как видно из рисунка 22, оба спектра состоят из двух элементарных полос гауссовой формы с максимумами при 3,45 эВ и 2,95 эВ с шириной на полувысоте равной 0,526 эВ. Это говорит о том, что процессы, протекающие в NaI:Tl при рентгенолюминесценции и катодолюминесценции, имеют сходную природу.

Так же были получены кинетики затухания КЛ в обеих полосах излучения при комнатной температуре. Спрямление кинетики в полулогарифмических координатах явно свидетельствует об экспоненциальном законе затухания. Рассчитанные по данным рис. 23 постоянные времени затухания при 2,8 и 3,8 эВ равны и составляют 210 нс. Это свидетельствует о единой природе процессов, приводящих к катодолюминесценции в обеих полосах в спектре КЛ.

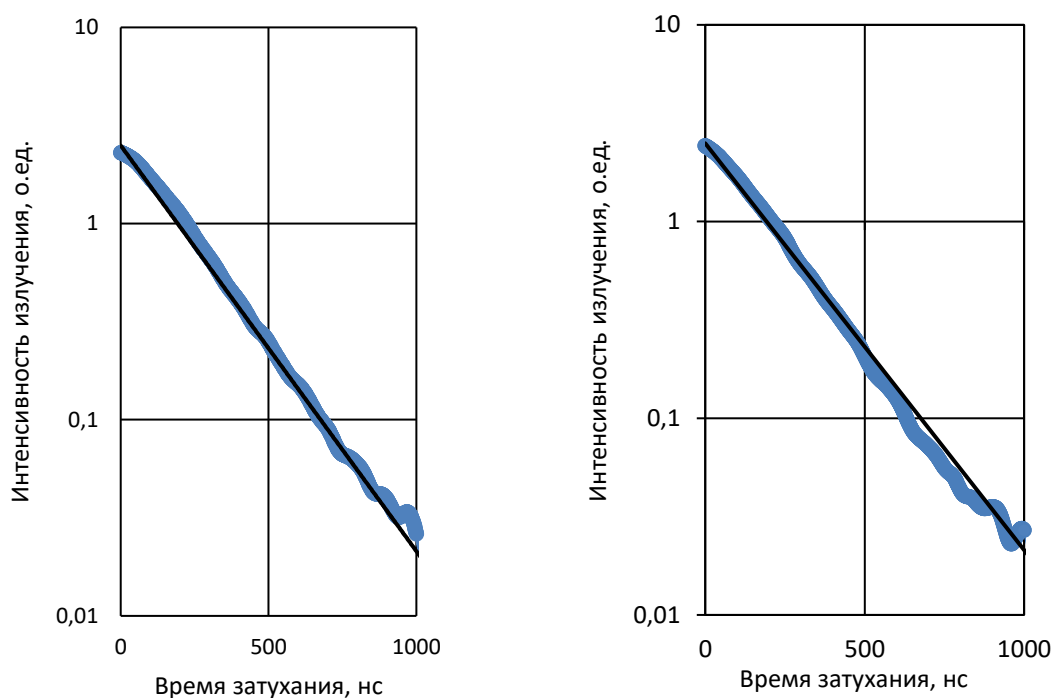


Рисунок 23 – Кинетика затухания катодолюминесценции NaI:Tl

а) при 2,8 эВ; б) при 3,8 эВ.

Сплошными кривыми показана аппроксимация функции.

3.2.2. Люминесценция при азотной температуре

Так же были измерены и построены спектр и кинетика затухания катодолюминесценции при азотной температуре. Из данных рис. 24 видно, что спектр имеет сложную неэлементарную форму с максимумом около 2,95 эВ и с нарастанием в УФ области. Полоса в видимой области удовлетворительно описывается полосой гауссовой формы с максимумом при 2,92 эВ и шириной 0,05 эВ. Параметры УФ-полосы из представленных экспериментальных данных определить не представляется возможным.

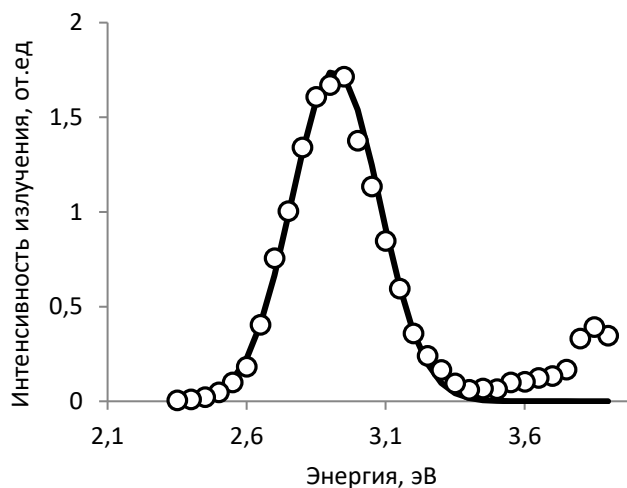


Рисунок 24 – Спектр катодолюминесценции NaI:Tl при азотной температуре

На рис. 25 построена зависимость интенсивности катодолюминесценции NaI:Tl в полосе при 2,95 эВ от времени в полулогарифмических координатах. Данная кинетика описывается тремя компонентами: двумя экспоненциальными – быстрый – около 11 нс, медленный – 5,6 мкс, а также низкоинтенсивный медленнозатухающий компонент, который невозможно описать какой-либо конкретной функцией, исходя из данных рис. 21.

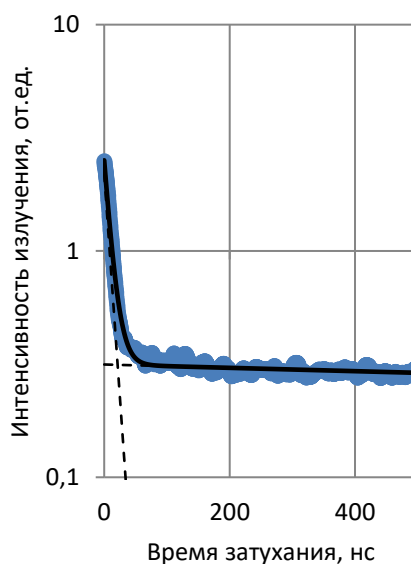


Рисунок 25 – Кинетика затухания катодолюминесценции NaI:Tl при 2,95 эВ при азотной температуре.

Сплошной кривой показана аппроксимация двумя экспоненциальными компонентами (пунктирные линии)

3.3 Температурные зависимости люминесценции

Были построены зависимости интенсивности наносекундного компонента фотолюминесценции и катодолюминесценции от температуры нагрева образца в диапазоне температур от 295К до 470К.

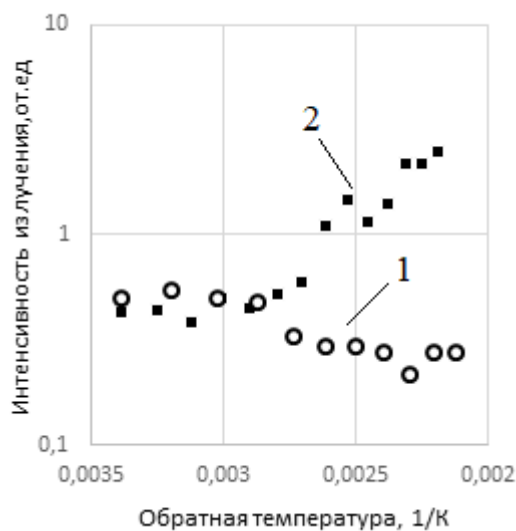


Рисунок 26 – Зависимость интенсивности КЛ (1) и ФЛ (2) NaI:Tl от температуры

Как видно из данных рис. 26 интенсивности КЛ уменьшается с ростом температуры, тогда как интенсивность ФЛ, наоборот, возрастает.

На рис. 27 представлены температурные зависимости постоянных времени для КЛ и ФЛ. В кинетиках есть 2 стадии затухания – быстрая и медленная. Время спада интенсивности быстрого компонента сокращается с ростом температуры как для КЛ, так и для ФЛ. Медленный компонент оставался примерно постоянным во всем интервале температур (около 2 мкс для КЛ и около 1,2 мкс для ФЛ) и его интенсивность была ниже интенсивности быстрого компонента на 2 и на 1 порядок величины для КЛ и ФЛ, соответственно.

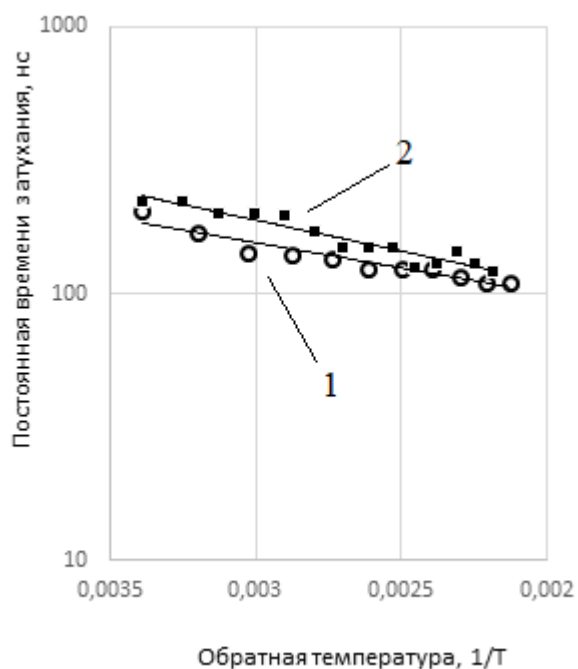


Рисунок 27 – Зависимости от температуры временных констант экспоненциального затухания КЛ и ФЛ (1 – КЛ, 2 – ФЛ)

Температурные зависимости временных констант люминесценции при 425 нм, как можно видеть, подчиняются закону Аррениуса. Найденные по углам наклона температурных зависимостей значения энергии термической активации оказались равными $E_a(\tau_{\text{ФЛ}}) = 0,048 \pm 0,09$ эВ, $E_a(\tau_{\text{КЛ}}) = 0,036 \pm 0,08$ эВ.

На рис. 28 представлены температурные зависимости интенсивности излучения и постоянной времени затухания для ФЛ. На данном рисунке можно видеть, что снижение τ с ростом температуры сопровождается увеличением интенсивности люминесценции, что может свидетельствовать о существовании интеркомбинационных переходов. Однако рост этот более быстрый, чем спад τ .

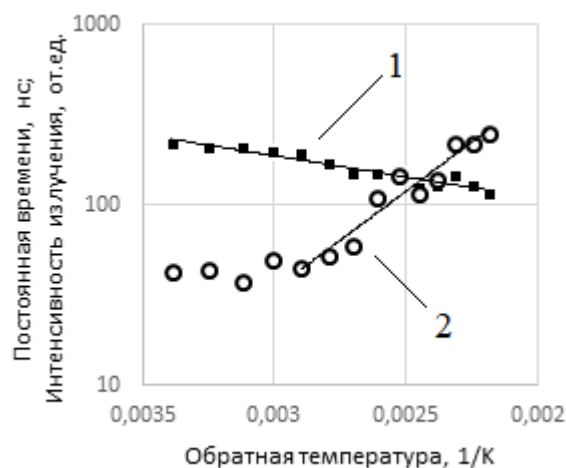


Рисунок 28 – Зависимость от температуры постоянной времени затухания (1) и интенсивности излучения (2) ФЛ

На рис. 29 (а) представлены температурные зависимости светосуммы для фотолюминесценции и катодолюминесценции в полосе 2,9 эВ. Сравнив полученные данные можно видеть, что с ростом температуры светосумма КЛ уменьшается в противоположность светосумме при селективном возбуждении светом длиной волны 337 нм.

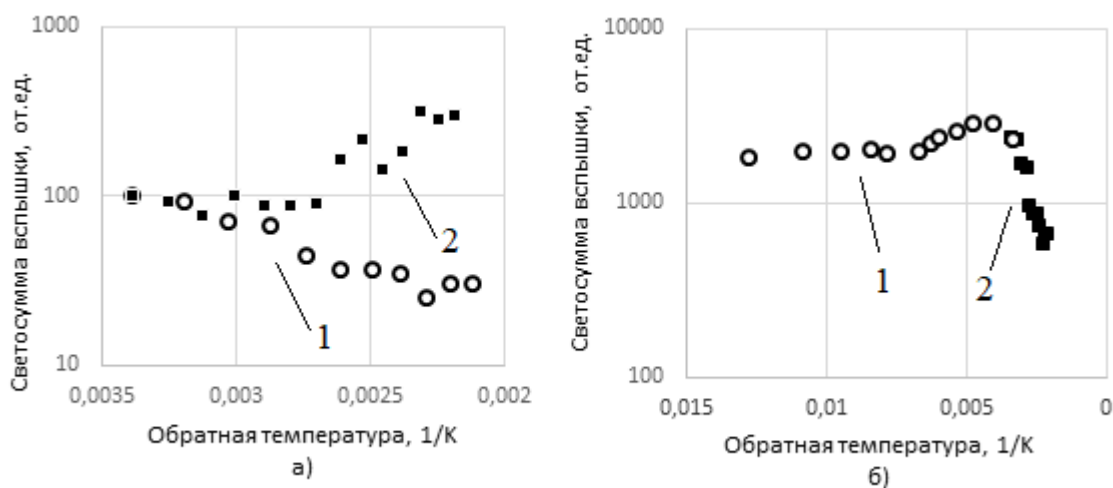


Рисунок 29 а) Зависимость светосуммы вспышки люминесценции КЛ и ФЛ
(1 – КЛ, 2 – ФЛ);
б) Температурная зависимость светосуммы КЛ в интервале
Т 65–300 К (1), 295–470 К (2)

На рис. 29 (б) изображена зависимость светосуммы катодолюминесценции от обратной температуры в более широком температурном диапазоне. Начальный участок в диапазоне температур от 65 К до 300 К взят из работы [38], участок в диапазоне температур от 295 К до 470 К – результаты, полученные в дипломной работе. Можно видеть, что полученные здесь результаты являются логичным продолжением данных работы [38]. Такое уменьшение светосуммы вспышки люминесценции возможно объяснить процессом температурного тушения люминесценции.

Если снижение светосуммы КЛ логично объяснить процессами температурного тушения, то увеличение светосуммы в импульсе ФЛ должно быть связано с неким процессом заселения излучательного состояния активаторного центра свечения.

3.4 Схемы уровней центра свечения в кристалле NaI:Tl

Исходя из полученных данных, по исследованию люминесцентных процессов в NaI:Tl можно сделать следующее заключение.

Что касается процессов происходящих при возбуждении электронным пучком, то после анализа спектрально-кинетических зависимостей было сделано предположение о природе центра свечения, ответственного за люминесценцию при 425 нм, которое является логичным продолжением представленной в работе [38] в рамках схемы уровней центра свечения в кристалле NaI:Tl (рис. 30).

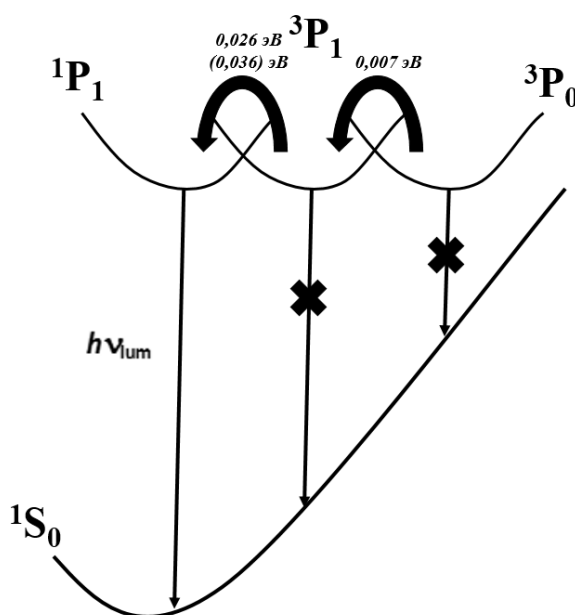


Рисунок 30 – Схема уровней центра свечения в кристалле NaI:Tl при КЛ

Согласно данным [38], энергия активации $0,026 \text{ эВ}$ соответствует переходу с метастабильного $3P_0$ на излучательный $3P_1$ уровень Tl^+ центра, переходы с которого в основное $1S_0$ состояние, строго говоря, запрещены правилами отбора, и могут быть лишь частично разрешенными. Связанная с такими интеркомбинационными переходами люминесценция обладает, как правило, большой длительностью затухания.

В работе [38], учитывая неизменность во времени спектрального состава люминесценции, с одной стороны, и наличие в кинетике затухания при низких температурах наносекундного компонента с постоянной времени порядка 10^{-8} с , авторы сделали заключение о том, что люминесценция в полосе 425 нм обусловлена разрешенными правилами отбора излучательными электронными

переходами с возбужденного уровня центра свечения в основное состояние. Происхождение медленных стадий как разгорания, так и затухания считаются обусловленным термически активированными процессами заселения этого уровня с нижележащих уровней.

Полученные в дипломной работе данные по кинетическим параметрам и температурным зависимостям хорошо согласуются с данными работы [38]. Температурная зависимость светосуммы при температурах выше комнатной является логичным продолжением температурной зависимости из [38], значения постоянных времени затухания согласуются с данными [38], энергия активации, определенная из наклона температурной зависимости τ примерно равна определенной в данной работе (0,036 эВ).

Что же касается ФЛ, то считается, что при облучении кристалла NaI:Tl светом из области А-полосы поглощения возбуждаются внутрицентровые переходы в ионе Tl^{+} и именно эти переходы отвечают за активаторную люминесценцию кристалла.

Однако если бы это было так, то при увеличении температуры наблюдалось бы уменьшение интенсивности люминесценции Tl^{+} -центров из-за процессов тушения (как это происходит при КЛ). В действительности мы, наоборот, наблюдаем значительный рост интенсивности люминесценции с повышением температуры.

Этот факт свидетельствует в пользу предположения о том, что активаторная люминесценция в NaI:Tl связана с процессами переноса заряда аналогично процессам в CsI:Tl, где формируется примесная подзона проводимости. В таком случае рост температуры способствует более активному протеканию процессов с переносом заряда (фононно-ассистированный процесс).

Итак, весь набор полученных в данной работе результатов можно объяснить следующим образом. Используемое нами для возбуждения ФЛ излучение с длиной волны 337 нм попадает на длинноволновый край поглощения Tl^{+} . Авторы [42] полагают, что при фотовозбуждении кристалла CsI:Tl в таллиевых полосах поглощения происходит перенос электрона на

свободную $6p$ орбиталь иона Tl^+ с $5p$ орбитали иона I^- , возмущенного близким ионом Tl^+ . Этот процесс приводит к созданию Tl^0 центров и появлению подвижной дырки в валентной зоне, которая автолокализуется с образованием V_K центра. Авторами [43] были проведены исследования оптических свойств Tl^0 центров в кристалле $KCl(Tl)$ и предложена схема энергетических уровней этих центров.

Так как свойства таллиевых центров в щелочных иодидах близки, то по аналогии с результатами [43] авторами [44] была предложена структура уровней Tl^0 центров в кристалле $CsI:Tl$, в рамках которой можно представить результаты, полученные для $NaI:Tl$ (см. рис. 31).

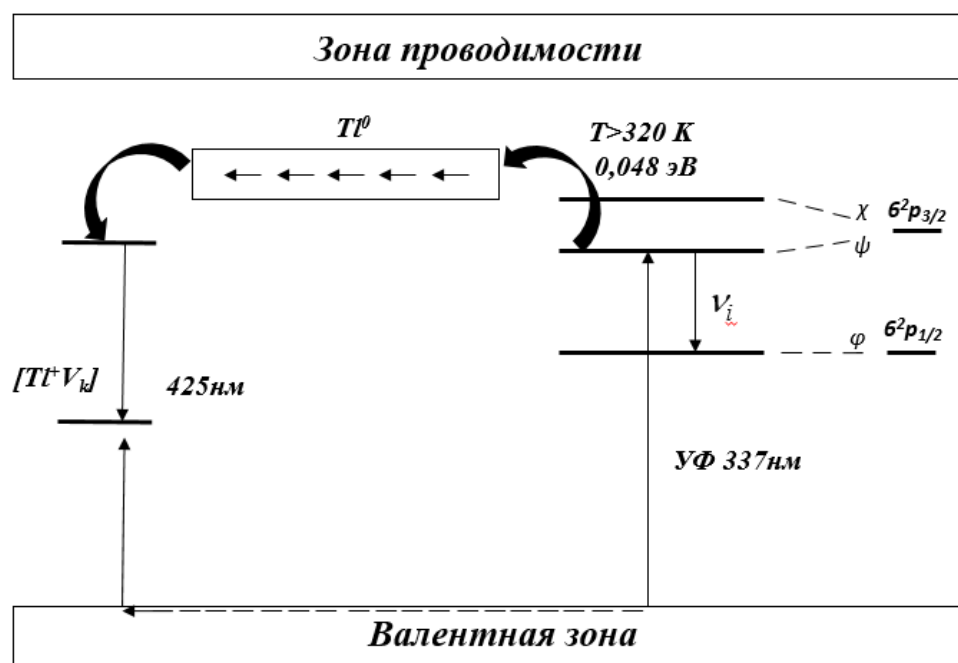


Рисунок 31 – Схема фотоиндуцированных электронных переходов в кристаллах $NaI:Tl$

Действительно, основываясь на данных работы [44] можно утверждать, что поглощение света ближнего УФ диапазона в $NaI:Tl$ соответствует переходу электронов валентной зоны на уровни Tl^0 центра с заселением ψ подуровня $6^2p_{3/2}$ состояния (стрелка «УФ 337 нм» на рис. 27) и захвату дырок Tl^+ центрами. Время жизни электрона на ψ подуровне определяется вероятностью спонтанных излучательных электронных переходов в основное состояние центра (ν_i на

рис. 27) и вероятностью термически активированных безызлучательных электронных переходов на χ подуровень $6^2p_{3/2}$ состояния Tl^0 центра (переход $P_{\psi \rightarrow \chi}$, показанный на рис. 27 фигурной стрелкой). Далее после термического заселения χ подуровня становится возможным процесс пространственного переноса заряда с последующим захватом электрона на уровне $[Tl^+V_k]$ центров с последующим испусканием активаторной люминесценции 425 нм.

ВЫВОДЫ ИЗ ГЛАВЫ 3

На основании всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

- В ходе исследования были получены спектры, кинетики затухания ФЛ и КЛ NaI:Tl при температурах 78 – 460 К, температурные зависимости интенсивности и светосуммы вспышки активаторной люминесценции в полосе 425 нм при 295 – 470 К;
- Спектрально-кинетические свойства КЛ при 425 нм в кристалле NaI:Tl можно считать обусловленными внутрицентровыми конфигурационными преобразованиями возбужденного Tl^+ центра, сопровождающимися междуровневыми электронными переходами и ведущими в конечном счете к заселению излучательного 1P_1 уровня.
- Активаторная ФЛ в NaI:Tl связана с процессами переноса заряда, с формированием примесной подзоны проводимости. Рост температуры способствует более активному протеканию процессов с переносом заряда (фононно-ассистированный процесс).

ГЛАВА 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Предпроектный анализ

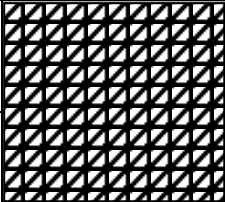
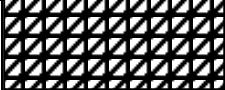
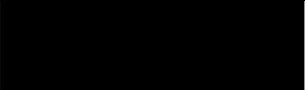
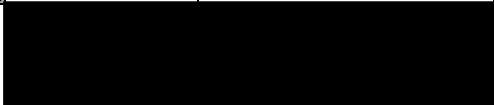
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Исследование, которое посвящено данной работе, представляет собой изучение люминесценции кристаллов NaI:Tl при возбуждении электронным пучком.

Исходя из особенностей исследования, можно судить о круге лиц, которые потенциально будут заинтересованы в работе. Целевым рынком нынешнего исследования являются производственные предприятия, основной деятельностью которых является создание спектрометрических систем лабораторного и промышленного назначения для проведения качественного и количественного анализа гамма излучающих радионуклидов. Все компании, нуждающиеся в определении местоположения источников гамма и нейтронного излучения в реальном времени с земли и воздуха. Однако, в силу направленности работы на исследовательскую деятельность, работа может быть интересна также для лиц, занимающихся научно-исследовательской деятельностью, связанной с детектированием гамма излучения, ИК-излучения.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данных расчетов. Результат сегментирования представлены на таблице 3.

Таблица 3 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию детекторов
на основе NaI:Tl.

		Вид предприятий по использованию детекторов			
		Медицинские предприятия	Исследовательские институты	Дефектоскопия	Атомные электростанции
Размер компании	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				



Фирма А



Фирма Б



Фирма В

4.1.2 Анализ конкурентных решений

Данное исследование ЩГК NaI:Tl уникальное в своем роде, открывает новые возможности использования детекторов в ИК-диапазоне. Поэтому в качестве конкурентов были рассмотрены похожие решения по отдельным компонентам. К примеру, компании, занимающиеся исследованием материалов для детектирования в ИК-диапазоне, или любое предприятие (институт), где реализована исследовательская направленность в области детектирования гамма и ИК-излучения. В конечном итоге, в качестве конкурирующих решений были выбраны следующие компании:

1. Саратовский государственный университет» [45]
2. ОАО «Кристалл» [46]
3. ООО «Азимут Фотоникс» [47]

Экспертная оценка основных технических характеристик данных продуктов представлена в таблице 4.

Таблица 4 – оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

№	Критерии оценки	Вес критерия	Баллы				Конкурентоспособность			
			Бф	Бк1	Бк2	Бк3	Кф	К1	К2	К3
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Технические критерии оценки ресурсоэффективности										
1	Повышение производительности труда пользователя	0,2	5	2	2	3	1	0,4	0,4	0,6
2	Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	5	3	2	4	0,75	0,45	0,3	0,6
3	Помехоустойчивость	0,02	4	3	4	5	0,12	0,09	0,12	0,15
4	Энергоэкономичность	0,01	4	5	5	4	0,04	0,05	0,05	0,04
5	Надежность	0,06	5	3	3	5	0,2	0,15	0,15	0,25
6	Потребность в ресурсах памяти	0,05	4	4	4	3	0,15	0,2	0,2	0,15
7	Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,1	5	1	1	2	0,5	0,1	0,1	0,2
8	Простота эксплуатации	0,1	5	2	2	4	0,5	0,2	0,2	0,4
9	Качество образцов	0,81	4	1	1	5	0,28	0,07	0,07	0,35
Экономические критерии оценки эффективности										
1	Конкурентоспособность продукта	0,05	5	2	2	4	0,05	0,02	0,02	0,04
2	Уровень проникновения на рынок	0,04	1	4	3	1	0,01	0,04	0,03	0,01
3	Цена	0,02	4	2	2	2	0,36	0,18	0,18	0,18
4	Послепродажное обслуживание	0,05	5	2	2	4	0,4	0,16	0,16	0,32
5	Финансирование научной разработки	0,05	5	5	4	3	0,2	0,2	0,16	0,12
6	Срок выхода на рынок	0,01	4	5	5	5	0,04	0,05	0,05	0,05
	Итого	1	63	44	42	54	4,6	2,36	2,19	3,46

Исходя из проведенного анализа можно заключить, что уязвимость конкурентных технологических решений связана, прежде всего с отсутствием повышения производительности труда, то есть предоставляемые системами возможности не достаточны, для реализации успешного процесса автоматизации. Реализации первых двух конкурентов очень схожи, СГУ и ООО «Кристалл», поэтому коэффициенты их конкурентоспособности едва различимы. Данные компании обладают практически единственным более-менее значительным достоинством – это уровень их проникновения на рынок, они располагают широкой базой тайных покупателей из разных регионов страны, а многие предприятия пользуются их услугами.

Наиболее сильным конкурентом можно считать стандартный функционал системы от разработчика ООО «Азимут Фатоникс». Его основными достоинствами являются надежность и помехоустойчивость, удобность в использовании, однако, как и два предыдущих конкурента, данная компания не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системе, необходимой для автоматизации процессов.

Преимуществом собственного исследования является то, что, она в десятки раз сокращает время выполнения процесса, также можно считать то, что данное исследование на рынке является уникальным. Аналогов данного исследования не существует.

4.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Матрица составляется на основе анализа рынка и конкурентных технических решений, и показывает сильные и слабые стороны проекта, возможности и угрозы для разработки.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, далее идет второй этап, в котором идет выявление соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского

проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. Соотношения параметров представлены в таблице 5 – 8.

Таблица 5 – Интерактивная матрица проекта, сильные стороны

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	-	-	0	+
	B2	+	-	-	+	+
	B3	-	+	+	-	0
	B4	-	+	+	+	-
	B5	-	-	-	-	-

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта, слабые стороны

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		СЛ1	СЛ2	СЛ3
	B1	-	-	+
	B2	-	-	-
	B3	-	-	-
	B4	-	+	+
	B5	0	-	0

Таблица 7 – Интерактивная матрица проекта, сильные стороны

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

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта, слабые стороны

Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		СЛ1	СЛ2	СЛ3	СЛ4	СЛ5
	У1	+	-	+	+	-
	У2	+	-	+	+	0

В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая представлена в таблице 9.

Таблица 9 – SWOT-анализ

		Сильные стороны	Слабые стороны
		С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии..	СЛ1. Потребность в больших объемах вычислительных ресурсов (мощностей компьютера)
		С2. Реализация исследований на практике	СЛ2. Большие затраты человеческих ресурсов (человека-часы)
		С3. Экологичность технологии	СЛ3. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ
		С4. Бюджетное финансирование	
		С5. Квалифицированный персонал.	
Возможности			
В1	Использование результатов исследований на практике	В1С5. Благодаря квалифицированному персоналу, есть возможность реализации исследований на практике	В1СЛ3 Трудность введении новых исследований для производства усовершенствованного продукта
В2	Использование инновационной инфраструктуры ТПУ	В2С4. Благодаря бюджетному финансированию, есть возможность закупать и усовершенствовать установку ИМПУЛЬС-1 для исследований	В2СЛ1. Пользование установкой ИМПУЛЬС-1 разрешено в определенное время, т.к. принадлежит ТПУ
В3	Получить финансирование	В2В5С4С5. Закупка образцов из ближнего зарубежья по низкой стоимости	В3В2В5СЛ3. Вероятность отсутствия финансирования может пресечь закупки за рубежом
В4	Появление дополнительного спроса на новый продукт	В4С2С3С4. Новые исследования позволят усовершенствовать, уже имеющийся продукт на рынке	
В5	Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследований		
Угрозы			
У1	Отсутствие спроса на новые технологии производства	У1У2С2С3С4. Своевременное финансирование повысит шансы на спрос на новый продукт на рынке	У1У2СЛ1СЛ2СЛ3.Несвоевременное финансирование, высокие мощностные и денежные затраты могут привести к остановке развития научного исследования, что в будущем полностью может потерять актуальность.
У2	Несвоевременное финанс.обеспеч. научн. исслед. со стороны государства		

4.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка необходимо оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в табл. 10.

Таблица 10 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

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

13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	50	40

Итоговые значения проработанности научного проекта и знания у разработчика лежат в диапазоне от 40 до 50, что говорит о средней перспективности проекта. Многие аспекты вывода продукта на рынок не были учтены, а также проявляется недостаток знаний. Следовательно, требуется дополнительные затраты на наём или консультации у соответствующих специалистов.

4.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Перспективность данного научного исследования выше среднего, поэтому не все аспекты рассмотрены и изучены. Таким образом, для организации предприятия этого недостаточно (пункт 4 – 8 не подходят из табл.7). Но так как основной научно-технический задел определен, этого достаточно для коммерциализации для следующих методов (пункты 1 – 3 из табл.7). Торговля патентной лицензией, инжиниринг, передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия. Степени проработанности научного проекта и уровень знаний разработчика достаточно для реализации пунктов, которые были выбраны.

4.2 Инициация проекта

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта.

4.2.1 Цели и результаты проекта

Перед определением целей необходимо перечислить заинтересованные стороны проекта. Информация по заинтересованным сторонам представлена в таблице 11:

Таблица 11 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Исследовательские университеты	Получение новых результатов по данной тематике
Компании	Получение нового продукта и прибыли с него
Научный руководитель, студент	Выполненная выпускная квалификационная работа

Цели и результат проекта представлены в таблице 12

Таблица 12 – Цели и результаты исследования

Цель исследования:	Установление физических процессов, протекающих в кристаллах NaI(Tl) при импульсном возбуждении
Ожидаемые результаты проекта:	• Разработать новую схему регистрации сигнала в ИК-области • Подобрать фотоприемник под необходимые задачи • Произвести расчет стоимости исследования • Реализовать схему включения фотодиода 9Э-111А в установку ИМПУЛЬС-1 • Произвести тестирование.
Критерии приемки результата проекта:	• Работоспособная схема регистрации сигнала в ИК-области • Правильно выбрать фотоприемник для регистрирования ИК-излучения • Рассчитать стоимость научного исследования • Работоспособная схема включения фотодиода 9Э-111А в установку ИМПУЛЬС-1 • Успешное регистрирование ИК-излучения NaI:Tl и последующий анализ результатов данных
Требования к результату проекта:	Требование:

	• Точность соблюдения эксперимента, а именно: - быстрое помещение кристалла в криостат - юстировка всех конденсорных линз - настройка лазера N₂ - настройка импульсного электронного пучка • Анализ всех полученных данных
--	--

4.2.2 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Эту информацию представить в табличной форме (табл. 13).

Таблица 13 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения
1.2.3.1 Бюджет проекта	-
1.2.3.1.1 Источник финансирования	НИТПУ
1.2.3.2 Сроки проекта	01.01.2018 – 31.05.2019
1.2.3.2.1 Фактическая дата утверждения плана управления проектом	12.12.2018
1.2.3.2.2 Плановая дата завершения проекта	31.05.2018

4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

4.3.1 Иерархическая структура работ проекта

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

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

- иерархическая структура работ проекта;
- контрольные события проекта;
- план проекта;
- бюджет научного исследования.

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



Рисунок 28 – Иерархическая структура по ВКР

В данном проекте будет использована иерархическая структура проекта, так как она подходит больше, потому что исследования являются новыми и не исследуемыми ранее, сложность проекта высока. Пример проектной структуры изображен на рисунке 38.

4.3.2 План проекта

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде табл. 14 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 14 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код работ ы (из ИСР)	Вид работ	Исполнит ели	Т _к , ч.	Продолжительность выполнения работ																
				Янв.			Февр.			Март			Апр.			Май.			Июн ь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	
1	Выбор направления исследования	Р, С	5	■																
2	Описание требований	Р	10	▨																
3	Патентный поиск	С	10		■															
4	Составление технического задания	Р	10	▨	▨															
5	Обзор литературы	С	40			■														
6	Эксперименты по люминесценции	С	20				■													
7	Анализ полученных данных	С	20				■													
8	Выбор приемника ИК-излучения	С	20				■													
9	Проектирование схемы включения ИК-приемника	С	40				■	■												
10	Юстировка оборудования с ИК-приемником	С	80						■	■	■									
11	Проведение эксперимента с ИК-приемником	С	40									■	■							
12	Анализ полученных данных	С	20										■	■						

Таблица 15 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, тыс.руб.	Общая стоимость оборудования, тыс.руб.
1.	Персональный компьютер	2	25000	50000
2.	Установка ИМПУЛЬС-1	1	100000	100000

4.3.5 Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда). Расчет основной заработной платы сводится в табл. 16.

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., руб.	Всего заработная плата по тарифу, руб.
1	Составление темы ВКР и курирование магистранта	Руководитель	144	708,3	17000
2	Написание ВКР	Магистр	144	100	2400
Итого:				19400	

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}} \quad (4.6)$$

где $T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн. (таблица 16);

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

Значит, для руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = 708,3 \cdot 144 = 102000 \text{ рублей}$$

Для магистров:

$$Z_{\text{осн}} = 100 \cdot 144 = 14400 \text{ рублей}$$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = (Z_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}} \quad (4.7)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб. (в качестве месячного оклада магистра выступает стипендия, которая составляет 2400 руб);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

$M=6$ месяцев, 6 - дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный полугодовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях). Тогда,

Для руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{17000 \cdot 6}{144} = 708,3 \text{ рублей}$$

Для дипломника:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{2400 \cdot 6}{144} = 100 \text{ рублей}$$

Баланс рабочего времени представлен в таблице 17.

Таблица 17 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистр
Календарное число дней	144	144
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	24	24
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- невыходы по болезни	—	—
Действительный полугодовой фонд рабочего времени	144	144

Таблица 18 – Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	З _б , руб.	k _р	З _м , руб	З _{дн} , руб.	T _р , раб. дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель	17000	1,3	17000	708,3	144	102000
Магистр	2400	1,3	2400	100	144	14400
Итого по статье З _{осн} :						116400

4.3.6 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (116400 + 0) = 34920 \text{ руб.} \quad (4.10)$$

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

Накладные расходы

В эту статью относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от

суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (4.11)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot (116400 + 0) = 34920 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления

В данную статью входят погашение стоимости основных фондов предприятия (оборудования), изнашивающихся в процессе работы и от времени.

Годовая амортизация будет составлять:

$$A_{\text{год}} = S/T,$$

где S – это стоимость оборудования, T – срок службы

$$A_{\text{год}} = 100000/5 = 20000 \text{ руб.}$$

Амортизация всего проекта:

$$A_{\text{проект}} = (A_{\text{год}}/12) \cdot n,$$

где, n – срок проекта в месяцах

$$A_{\text{проект}} = (20000/12) \cdot 6 = 10000 \text{ руб.}$$

Суммарные амортизационные отчисления составляют

$$A_{\text{сумм}} = A_{\text{год}} + A_{\text{проект}}$$

$$A_{\text{сумм}} = 20000 + 10000 = 30000 \text{ руб.}$$

В результате было получено, что бюджет затрат НТИ составит 216240 руб. При этом затраты у конкурентов, а именно у СГУ составляют 280000 рублей, у ООО «Кристалл» 306000 руб., ООО «Азимут Фотоникс» 314000 руб., из чего можно сделать вывод что полученный продукт будет экономичней, чем у конкурентов, данные представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Группировка затрат по статьям

Вид работ	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты (руб.)	Специальное оборудование для научных работ (экспериментальных) работ (руб.)	Основная заработная плата (за срок проекта) (руб.)	Отчисления на социальные нужды (руб.)	Накладные расходы (руб.)	Итого плановая себестоимость (руб.)
1.	фотодиод 9Э-111А – 5000	Установка «Импульс -1» - 100000 руб.	116400	34920	34920	216240
2.	Фотодиоды – 10000	Спектрометрическая установка – 150000	150000	45000	45000	280000
3.	Фотодиоды – 12000	Спектрометрическая установка – 160000	160000	48000	48000	306000
4.	Фотодиоды – 15000	Спектрометрическая установка – 200000	165000	49500	49500	314000

4.4 Организационная структура проекта

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная.

Для выбора наиболее подходящей организационной структуры можно использовать табл. 20.

Таблица 20 – Выбор организационной структуры научного проекта

Критерии выбора	Функциональная	Матричная	Проектная
Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня	Высокая	Средняя	Низкая

В данном случае выбор лежит к проектной структуре проекта из-за особенностей разработки. Также основной причиной выбора проектной структуры является то, что исследования являются новыми, и имеются ограниченные сроки реализации.

4.4.1 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта. Пример плана управления коммуникациями приведен в табл. 21.

Таблица 21 – Пример плана управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Руководитель проекта	Представителю заказчика	Ежеквартально (первая декада квартала)
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель проекта	Участникам проекта	Еженедельно (пятница)
3.	Документы и информация по проекту	Ответственное лицо по направлению	Руководителю проекта	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Исполнитель проекта	Руководителю проекта	Не позже дня контрольного события по плану управления

4.4.2 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информацию по данному разделу необходимо свести в таблицу 22.

Таблица 22– Реестр рисков

№	Риск	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Потеря актуальности	2	5	средний	Публикация статей и обсуждения темы в научных кругах	Научные исследования в этой области ведутся постоянно
2	Неточность результатов измерения	4	5	высокий	Точное соблюдение эксперимента согласно регламенту	Образец гигроскопичен, может впитать много кислорода
3	Получение отрицательного результата при внедрении в производство	2	4	средний	Согласование и контакт с возможными покупателями исследования	Отсутствие контакта с возможными покупателями исследования
4	Низкое качество поставленного оборудования	2	4	средний	Заказ качественного оборудования известных фирм-производителей	Использование оборудования, выполненное из дешевых материалов

4.5 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

4.5.1 Оценка абсолютной эффективности исследования

Динамические методы оценки инвестиций базируются на применении показателей:

- чистая текущая стоимость (**NPV**);
- срок окупаемости (**D_{PP}**);
- внутренняя ставка доходности (**IRR**);
- индекс доходности (**PI**).

Все перечисленные показатели основываются на сопоставлении чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности, и их приведении к определенному моменту времени. Теоретически чистые денежные поступления можно приводить к любому моменту времени (к будущему либо текущему периоду). Но для практических целей оценку инвестиции удобнее осуществлять на момент принятия решений об инвестировании средств.

4.5.2 Чистая текущая стоимость (NPV)

Данный метод основан на сопоставлении дисконтированных чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности.

Если инвестиции носят разовый характер, то **NPV** определяется по формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+i)^t} - I_0,$$

где $ЧДП_{опt}$ – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета ($t=0, 1, 2 \dots n$);

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Чистая текущая стоимость является абсолютным показателем. Условием экономичности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение следующего неравенства: **NPV** > 0.

Чем больше **NPV**, тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.

Таким образом, инвестиционный проект считается выгодным, если **NPV** является положительной табл. 23.

Таблица 23 - Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Выручка от реализации, тыс.руб.	0	88,184	88,184	88,184	88,184
2.	Итого приток, тыс.руб.	0	88,184	88,184	88,184	88,184
3.	Инвестиционные издержки, тыс.руб.	-66,296	0	0	0	0
4.	Операционные затраты, тыс. руб. С+Ам+ФОТ	0	43,824	43,824	43,824	43,824
5.	Налогооблагаемая прибыль		55,360	55,360	55,360	55,360
6.	Налоги, тыс. руб Выр-опер=донал.приб*20%	0	13,072	13,072	13,072	13,072
7.	Итого отток, тыс.руб. Опер.затр.+налоги	-66,296	56,896	56,896	56,896	56,896
8.	Чистый денежный поток, тыс. руб. ЧДП=Пчист+Ам Пчист=Пдонал.-налог	-66,296	62,290	62,290	62,290	62,290
9.	Коэффициент дисконтирования (приведения при $i=20\%$)	1,0	0,833	0,694	0,578	0,482
10.	Дисконтированный чистый денежный поток, тыс.руб. (с8*с9)	-66,296	53,557	46,289	40,223	35,203
11.	То же нарастающим итогом, тыс.руб. (NPV =68,976 тыс.руб.)	-66,296	-42,739	4,550	43,773	68,976

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 70000 тыс. рублей, что позволяет его эффективности.

Дисконтированный срок окупаемости

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости.

Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (см. табл. 24).

Таблица 24 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Дисконтированный чистый денежный поток ($i=0,20$)	-66,296	63,557	46,289	40,223	45,203
2.	То же нарастающим итогом	-66,296	-33,500	3,550	33,773	58,976
3.	Дисконтированный срок окупаемости	$PP_{дск} = 1 + 33,500 / 36,289 = 0,924$ года				

Внутренняя ставка доходности (IRR)

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому,

чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности инвестиций на практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR).

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость. Эта зависимость следует из таблицы 25 и графика, представленного на рисунке 40.

Таблица 25 - Зависимость **NPV** от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	
1	Чистые денежные потоки	-66,296	89,184	89,184	89,184	89,184	
2	коэффициент дисконтирования						
	$i=0,1$	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	$i=0,2$	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	$i=0,3$	1	0,769	0,592	0,455	0,35	
	$i=0,4$	1	0,714	0,51	0,364	0,26	
	$i=0,5$	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	$i=0,6$	1	0,625	0,39	0,244	0,095	
	$i=0,7$	1	0,588	0,335	0,203	0,07	
	$i=0,8$	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	$i=0,9$	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	$i=1$	1	0,5	0,25	3,00	0,006	
3	Дисконтированный денежный поток, тыс. руб						
	$i=0,1$	-66,296	72,887	66,232	60,218	54,766	177,807
	$i=0,2$	-66,296	66,793	55,648	46,346	38,649	131,14
	$i=0,3$	-66,296	61,661	47,469	36,484	28,064	97,382
	$i=0,4$	-66,296	57,251	40,894	29,187	20,848	71,884
	$i=0,5$	-66,296	53,483	35,602	23,654	15,876	52,319
	$i=0,6$	-66,296	50,115	31,272	19,565	7,617	32,273
	$i=0,7$	-66,296	47,148	26,862	16,277	5,613	19,604
	$i=0,8$	-66,296	44,582	24,777	13,711	7,617	12,391
	$i=0,9$	-66,296	42,177	22,211	11,707	6,174	5,973
	$i=1$	-66,296	40,092	20,046	10,023	0,481	5,654

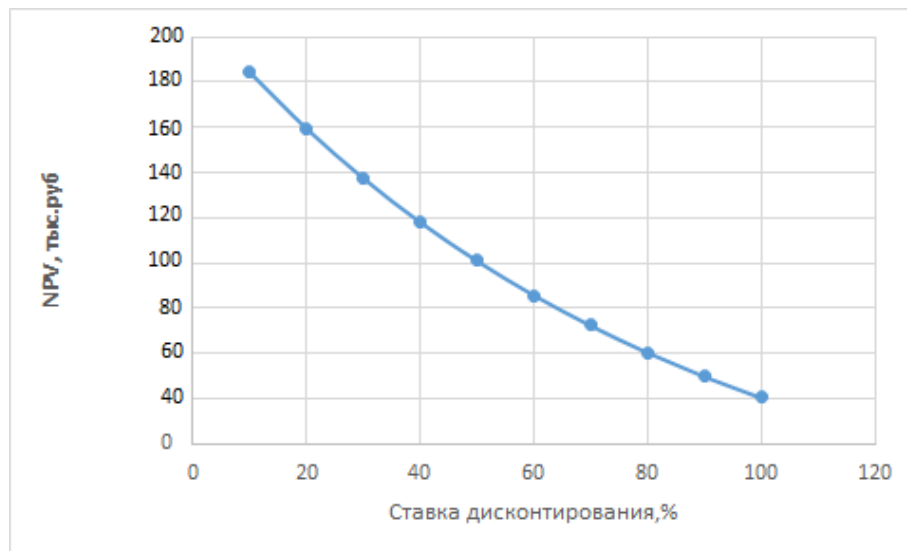


Рисунок 32 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования.

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой **NPV** обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,93.

Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (PI)

Индекс доходности показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций.

Расчет этого показателя осуществляется по формуле

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧПД_t}{(1+i)^t} / I_0,$$

где I_0 – первоначальные инвестиции.

$$PI = \frac{43,557 + 36,289 + 30,233 + 25,203}{126,253} = 1,05$$

$PI = 1,05 > 1$, следовательно, проект эффективен при $i = 0,2$;

NPV = 131,14 тыс. руб.

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты табл.26.

Таблица 26 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Данные полученные по кристаллу NaI:Tl были получены более 40 лет назад	Более глубокое изучение люминесцентных свойств кристалла NaI:Tl
Отсутствие статей и публикаций на тему ИК-области NaI:Tl	Получение новых данных связанных с ИК-областью в NaI:Tl
Отсутствие исследований и технологий по регистрированию ИК-излучения NaI:Tl	Появление новых технологий с использованием этого кристалла

4.5.3 Оценка сравнительной эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или 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 определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (5.13)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

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:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (5.14)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (табл. 27).

Таблица 27 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	3	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	2	3
3. Помехоустойчивость	0,15	3	3	3
4. Энергосбережение	0,20	4	3	3
5. Надежность	0,25	4	4	4
6. Точность анализа	0,15	4	4	4
ИТОГО	1	25	19	22

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_i^p}{\Phi_{\max}} = \frac{5}{25} = 0.2$$

$$I_{\phi}^a = \frac{\Phi_i^a}{\Phi_{\max}} = \frac{4}{19} = 0.21$$

$$I_T^p = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 = 3,94$$

$$I_{T1}^a = 3 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,15 = 3,15$$

$$I_{T2}^a = 4 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,05 = 3,5$$

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_T^p}{I_{\phi}^p} = \frac{3.94}{0.2} = 19.7$$

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_T^a}{I_{\phi}^a} = \frac{3.15}{0.21} = 15$$

$$\Xi_{\text{cp}} = \frac{I_{\text{ф}}^{\text{p}}}{I_{\text{ф}}^{\text{a}}} = \frac{0.2}{0.21} = 0.95$$

Таблица 28 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	СГУ	ОАО «Кристалл»	ООО «Азимут Фотоникс»	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,21	0,21	0,22	0,2
2	Интегральный показатель ресурсоэффектив ности разработки	3,15	3,14	3,13	3,94
3	Интегральный показатель эффективности	15	14	15	19,7
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,95	0,94	0,93	1,05

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В ходе проведения анализа показателей эффективности инвестиций была получена чистая текущая стоимость (NPV) – 70 тыс. руб. Таким образом, данный инвестиционный проект можно считать выгодным, NPV является положительной величиной. Дисконтированный срок окупаемости проекта ($PP_{\text{дск}}$) составляет 0.92 года. Внутренняя ставка доходности (IRR) – 0,85, что позволяет признать инвестиционный проект экономически оправданным, так как выполняется условие неравенства $IRR > i$. Индекс доходности (PI) – 2,410, и, основываясь на том, что данная величина превышает единицу, можно утверждать, что данная инвестиция приемлема.

ВЫВОДЫ ИЗ ГЛАВЫ 4

Исходя из проделанной работы можно сделать вывод, что чаще всего детекторы используют медицинские предприятия.

Далее, исходя из анализа конкурентных решений, можно выделить 3 самых крупных предприятия по использованию ЩГК NaI:Tl – это СГУ, ОАО «Кристалл» и ООО «Азимут Фотоникс». Экспертная оценка основных технических характеристик данных продуктов представлена в таблице 5.2.

Также из анализа можно заключить, что уязвимость конкурентных технологических решений связана, прежде всего с отсутствием повышения производительности труда, то есть предоставляемые системами возможности не достаточны, для реализации успешного процесса автоматизации. Реализации первых двух конкурентов очень схожи, СГУ и ООО «Кристалл», поэтому коэффициенты их конкурентоспособности едва различимы. Данные компании обладают практически единственным более-менее значительным достоинством – это уровень их проникновения на рынок, они располагают широкой базой тайных покупателей из разных регионов страны, а многие предприятия пользуются их услугами.

Наиболее сильным конкурентом можно считать стандартный функционал системы от разработчика ООО «Азимут Фотоникс». Его основными достоинствами являются надежность и помехоустойчивость, удобность в использовании, однако, как и два предыдущих конкурента, данная компания не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системе, необходимой для автоматизации процессов.

Преимуществом собственного исследования является то, что, она в десятки раз сокращает время выполнения процесса, также можно считать то, что данное исследование на рынке является уникальным. Аналогов данного исследования не существует.

Проведя SWOT – анализ были выявлены сильные и слабые стороны проекта.

Сильные стороны:

- Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.
- Реализация исследований на практике
- Экологичность технологии
- Бюджетное финансирование
- Квалифицированный персонал.

Слабые стороны:

- Потребность в больших объемах вычислительных ресурсов (мощностей компьютера)
- Большие затраты человеческих ресурсов (человека-часы)
- Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ

Также проведена оценка готовности проекта к коммерциализации. Итоговые значения проработанности научного проекта и знания у разработчика лежат в диапазоне от 40 до 50, что говорит о средней перспективности проекта. Многие аспекты вывода продукта на рынок не были учтены, а также проявляется недостаток знаний. Следовательно, требуется дополнительные затраты на наём или консультации у соответствующих специалистов.

Исходя из оборудования для научных исследований требуется обычное оборудование в виде персонального компьютера и новый фотодиод 9Э-111А, остальные комплектующие, а также установка ИМПУЛЬС – 1 принадлежат ТПУ и не требуют дополнительных затрат.

Далее построив зависимость NPV от ставки дисконтирования, можно сделать вывод, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,93. В ходе проведения анализа показателей эффективности инвестиций была получена чистая текущая стоимость (NPV) – 60 тыс. руб. Таким образом, данный инвестиционный проект можно считать выгодным, NPV является

положительной величиной. Дисконтированный срок окупаемости проекта ($PP_{дск}$) составляет 0.92 года. Внутренняя ставка доходности (IRR) – 0,85, что позволяет признать инвестиционный проект экономически оправданным, так как выполняется условие неравенства $IRR > i$. Индекс доходности (PI) – 2,410, и, основываясь на том, что данная величина превышает единицу, можно утверждать, что данная инвестиция приемлема.

ГЛАВА 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

5.1 Предпроектный анализ

Исследование, которое посвящено данной работе, представляет собой изучение люминесценции монокристаллов при возбуждении электронным пучком. При выполнении данной работы большая часть времени проводилась в научно-исследовательской лаборатории № 024 166 учебного корпуса НИ ТПУ. В этой аудитории проводилось облучение установкой Импульс-1 монокристаллов.

Исходя из особенностей исследования, можно судить о круге лиц, которые потенциально будут заинтересованы в работе. Целевым рынком нынешнего исследования являются производственные предприятия, основной деятельностью которых является создание спектрометрических систем лабораторного и промышленного назначения для проведения качественного и количественного анализа гамма излучающих радионуклидов. Все компании, нуждающиеся определение местоположения источников гамма и нейтронного излучения в реальном времени с земли и воздуха. Однако, в силу направленности работы на исследовательскую деятельность, работа может быть интересна также для лиц, занимающихся научно-исследовательской деятельностью, связанной с детектированием гамма излучения, ИК-излучения.

5.2 Организационные мероприятия по обеспечению безопасности

Основной задачей регулирования проектных решений разрешается за счет соблюдения законов (налоговое законодательство, трудовой и гражданский кодексы). Руководитель (ответственный) принимает обязательства выполнения и организации правил эвакуации и соблюдение требования безопасности в помещении.

Требования к размещению лазерной установки, организации рабочих мест и помещениям – в соответствии с настоящим стандартом и ГОСТ 12.3.002–2017.

- Расстояния между установками должны обеспечивать безопасные условия труда и удобства при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте.
- Открытые траектории в зоне возможного нахождения человека должны располагаться значительно выше уровня глаз. Минимальная высота траектории 2,2 м.
- Рабочее место обслуживающего персонала, взаимное расположение всех элементов (органов управления, средств отображения информации, оповещения и др.) должны обеспечивать рациональность рабочих движений и максимально учитывать энергетические, скоростные, силовые и психофизиологические возможности человека.
- Следует предусматривать наличие мест для размещения съемных деталей, переносной измерительной аппаратуры, хранения заготовок, готовых изделий и др.
- Помещения должны соответствовать требованиям пожарной безопасности и иметь необходимые средства предотвращения пожара и противопожарной защиты.
- Отделку помещений следует выполнять только из негорючих материалов. Не допускается применение глянцевых, блестящих, хорошо

(зеркально) отражающих материалов (коэффициент отражения рекомендуется не более 0,4).

- Высота помещений должна быть не менее 4,2 м. Коммуникации (вода, электроэнергия, воздух, вакуум системы, инертные газы и др.) следует прокладывать под полом в специальных каналах с защитными коробами (возвышение над уровнем пола не допускается) или подвешивать кабели на высоте не менее 2,2 м от пола.
- Помещения должны иметь приточно-вытяжную вентиляцию. При необходимости, рабочие места должны быть оборудованы местной вытяжкой с целью исключения попадания в рабочее помещение продуктов взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемыми материалами.
- Любая часть защитного устройства, при снятии или смещении которой возможен доступ персонала к лазерному излучению должна иметь табличку с надписью: «Внимание! При открывании – лазерное излучение».
- Органы управления должны быть размещены и сгруппированы с учетом последовательности операций таким образом, чтобы при регулировке и работе не происходило облучение персонала ионизирующим излучением с уровнем, превышающим ДПИ для класса 1. Формы органов управления должны легко идентифицироваться.
- Для предотвращения потери информации вследствие влияния внешнего освещения индикаторы и указатели должны быть снабжены специальными защитными экранами или колпаками.

В целях общего поддержания безопасности создаются следующие мероприятия:

- Планирование защиты населения и территорий от ЧС на уровне организации;
- Создание запасов средств индивидуальной защиты и поддержание их в готовности;

- Выявление угроз пожара и оповещение персонала;
- Подготовка работающих к действиям в условиях ЧС;
- Подготовка и поддержание в постоянной готовности сил и средств для ликвидации ЧС.

5.3 Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

В данном пункте приведены вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении исследований в лаборатории, при разработке или эксплуатации проектируемого решения.

Для идентификации потенциальных факторов был использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в таблице 1.

Таблица 29 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [7].
2.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+		Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНИП 23-05-95*[8].
3.Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+		
4. Повышенная пульсация светового потока		+	+	
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 система стандартов безопасности труда (сбт). Электробезопасность.

замыкания, которая может пройти через тело человека				Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с изменением n1) [55].
6. Риск поражения электрическим током на установке «Импульс-1»			+	ГОСТ ИЕС 61140-2012 защита от поражения электрическим током. Общие положения безопасности установок и оборудования (с поправкой) [56].
7. Повышенный уровень УФ-радиации установки «Импульс-1»	+	+	+	СанПиН 5804-91 «санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» [57].

5.4 Анализ опасных и вредных факторов, которые могут возникнуть при использовании установки Импульс-1 и их обоснования по снижению воздействия.

5.4.1 Отклонение показателей микроклимата.

Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 [54] показатели микроклимата должны обеспечивать сохранение теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма. Характеризующие параметры такие как температура воздуха, температура рабочих поверхностей, влажность воздуха скорость движения воздуха и интенсивность теплового облучения являются показателями микроклимата в производственных помещениях.

Допустимые микроклиматические условия не вызывают повреждений или нарушения состояния здоровья человека, но приводят к возникновению теплового дискомфорта, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности. Допустимые значения температуры воздуха на рабочих местах при перепаде температуры по высоте, должен быть не более 3⁰С. Перепад воздуха по горизонтали не должно превышать 4⁰С.

Таблица 30 – Допустимые параметры микроклимата на рабочем месте (СанПиН 2.2.4.548-96) [54].

Период года	Температура воздуха, °С		Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с.	
	Диапазон ниже оптим. величин	Диапазон выше оптим. величин			Ниже оптим. Величин не более	Выше оптим. Величин не более
Холодный	20,0-21,9	24,1-25,0	19,0-26,0	15-75	0,1	0,1
Теплый	21,0-22,9	25,1-28,0	20,0-29,0	15-75	0,1	0,2

Таблица 31 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96) [54].

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат. Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22-24	21-25	60-40	0,1
Теплый	Ia (до 139)	23-25	22-26	60-40	0,1

При наличии теплового облучения рабочих, температура воздуха на рабочих местах не должна превышать 25⁰С. Температура в рабочей зоне поддерживается отоплением в холодные периоды и вентиляцией в теплые периоды.

5.4.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Создание и назначение искусственного освещения таковы, чтобы создать благоприятные условия и сохранить хорошее самочувствие человека на рабочем месте, при этом уменьшить утомляемость глаз. Искусственное освещение отличается от естественного спектральным составом. При искусственном освещении предметы окружающие человека выглядят иначе. При изменении положения и интенсивности излучения предметы начинают бликовать.

Недостаточное освещение рабочего места, приводит к быстрой усталости и боли в глазах, происходит притупление внимательности и следствии этого падает производительность труда, что в свою очередь увеличивает вероятность несчастных случаев на производстве.

Естественное освещение осуществляется за счет прямого и отраженного солнечного света, проходящего через светопропускающие элементы. Естественное освещение различается на боковое – проходящее через проемы окон в наружных стенах и верхнее естественное освещение, проходящее через световые проемы, расположенные на верхней части здания (крыше), через светопропускающие элементы.

Как известно, что чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и рези в глазах.

Неправильные направления светового потока могут создавать тени, блики и дезориентировать рабочего в пространстве. Все эти факторы могут привести к несчастным случаям и профзаболеваниям.

По СП52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение [55], норма освещенности в местах с малой точностью при комбинированном освещении в лаборатории, на горизонтальной поверхности места работы обслуживающего персонала, должна быть не менее 200 лк.

5.4.3 Повышенная пульсация светового потока

У людей, находящихся подолгу на рабочих местах в помещениях с пульсирующим искусственным освещением, выявляются следующие симптомы:

- усталость глаз;
- повышение утомления;
- болевые ощущения в глазах;
- потеря концентрации;
- снижение работоспособности

Такие показатели рассматривают в СП 52.13330.2016 [55]. Максимально допустимые значения коэффициента пульсации для общего освещения составляет 10%.

В нашей лаборатории в целях уменьшения пульсации ламп, были установлены светодиодные лампы с низким уровнем пульсации, а также их рациональное расположение по лаборатории с учетом замера освещенности люксметром.

5.4.4 Повышенное значение напряжения в электрической цепи замыкания, которая может пройти через тело человека

Несчастные случаи, наиболее часто вызванные поражением электрическим током, происходит среди работников, занимающихся электрическими работами, дежурных электриков, электромонтеров, энергетиков и т.д. Чаще всего травмы такого рода связаны с пренебрежением правил при использовании использованием электрических установок, изолирующих свойств материалов электрической части, отсутствием заземления и т.п. Исходы таких травм связаны с условиями, которые зависят от разных факторов: от состояния организма человека при получении травмы, от характера тока, от обстановки , при которой произошла травма и поражение электрическим током. Как известно поражение переменным электрическим током гораздо более опаснее, чем поражение постоянным током такого же напряжения. Все источники питания в тепличном комплексе подключены на переменный ток, а драйвера конвертируют и выпрямляют переменный ток в постоянный для подключения светодиодных световых приборов.

Сила тока, напряжение, длительность воздействия и путь по которому может пройти ток через тело человека, зависят в какой мере тяжести будет исход от электротравмы. Также психическое состояние и общая реактивность организма и момент воздействия тока, являются важными значениями для исхода электротравмы. При силе переменного тока в 0,015 А, опасности для человеческого организма не представляет, но при воздействии более 0,015 А

возможны тяжелые последствия, которые могут привести к летальному исходу. Величина отпускающей силы тока принята 0,01 А, токи силой в 0,09 – 0,1 А и выше, являются смертельными для человеческого организма.

Сравнительно малые напряжения 110 – 230 В, при кратковременном воздействии на грудную клетку могут вызвать сердечно мышечные спазмы. 60 мА для переменного тока, 300 – 500 мА для постоянного тока. Также находясь под напряжением, у человеческого организма могут произойти сбои в нервной системе, приводящие к беспорядочному сокращению мышц, повторяющиеся удары могут вызвать невропатию. Острая электротравма может стать причиной нарастающей асистолии. Возможна потеря сознания, при попадании электрического тока в район головы. При высоких напряжениях возможны электрические дуги, которые приводят к термическим ожогам.

Напряжения и токи, протекающие через человеческий организм при неаварийном режиме электроустановки, не должны превышать значений ГОСТ 12.1.038-82 [56], ниже указанных в таблице 32.

Таблица 32 Предельно допустимые значения напряжения и токов

Род тока	Напряжение, В	Сила тока, мА
	не более	
Переменный ток, 50 Гц	2,0	0,3

5.4.5 Риск поражения электрическим током на установке «Импульс-1»

Правила безопасности эксплуатации электроустановок потребителей.

1. Область применения «Правил».

Правила электрической безопасности рассматриваются следующими нормативными документами: ГОСТ 12.1.030–81 ССБТ [56], ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ [57], ГОСТ 12.1.045–84 ССБТ [58]. В настоящих Правилах изложены основные требования безопасности при эксплуатации электроустановок.

Требования правил распространяются на всех работников, обслуживающих действующие электроустановки потребителей и являются

обязательными для всех потребителей и производителей электроэнергии независимо от их ведомственной принадлежности и форм собственности на средства производства.

2. Обязанности лица, ответственного за эксплуатацию, электроустановок потребителей.

Данное лицо обязано обеспечить:

- 1) Надежность и безопасность работы электроустановки;
- 2) Разработка и внедрение мероприятий по экономии электроэнергии;
- 3) Внедрение новых технологий, способствующих более надёжных и экономических работ электроустановок;
- 4) Организация и проведение своевременных плановых ремонтов и профилактических испытаний электроустановок;
- 5) Контроль нагрузок в часы максимумов нагрузок энергосистемы;
- 6) Обучение, инструктирование и проверку знаний персонала энергослужбы;
- 7) Расчет расхода электроэнергии;
- 8) Проверка на наличие средств защиты;
- 9) Ведение технической документации, разработка инструкций и положений.

3. Организация безопасности эксплуатации электроустановок.

Руководитель обязан обеспечить эксплуатацию и обслуживание электроустановок в соответствии с требованиями нормативных документов.

- Назначить ответственное лицо за исправное состояние и эксплуатацию электрохозяйства, имеющее соответствующую подготовку и прошедшего проверку знаний в установленном порядке;
- Обеспечить необходимое количество работников электротехнических служб;
- Утвердить положение об энергетической службе предприятия, а также дополнить инструкции по охране труда;

- Установить порядок для работников, для тщательного наблюдения работы электрооборудования и его обслуживания;
- Обеспечить проверку знаний сотрудников, имеющих работу с электроустановками;
- Обеспечить проверку электрооборудования противоаварийных и профилактических испытаний;

Обеспечить проведение технического освидетельствования электроустановок.

5.4.6 Экологическая безопасность

В установке Импульс-1 используются лампы ДнАТ для калибровки оптической оси. У ламп данного типа содержится внутри не только натрия и алюминий, но и вредные для окружающей среды пары ртути. Среди группы токсичных веществ, ртуть занимает особое место и обладает уникальными свойствами, обусловленными повышенной опасностью распространения в окружающей среде и разносторонним негативным воздействием на живые организмы при относительно малых дозах экспозиции. Ртуть относится к 1 – классу токсичных отходов и является чрезвычайно опасной по ГОСТ 17.4.1.02-83 [60]. В соответствии с «Санитарно-эпидемиологическими требованиями к атмосферному воздуху» предельно допустимая концентрация ртути (ПДК) в атмосферном воздухе – 0,0003 мг/м³. Лампу типа ДнАТ при выходе из строя запрещается выбрасывать вместе с бытовыми отходами. Существуют фирмы по утилизации ламп. Индивидуальные предприниматели обязаны сдавать лампы данного типа на переработку и разрабатывать паспорт опасного отхода.

Установка Импульс-1 экологически безопасна. Данная установка позволяет сохранить окружающую среду, без специальных условий утилизации. Конструктивно не содержащая вредных, ядовитых и опасных веществ и материалов.

Материалы, благодаря которым изготовлены комплектующие элементы установки, при нагревании не выделяют вредных веществ. Благодаря этому для

обслуживания и утилизации комплектующих не потребуется создания специальных условий.

Утилизация электронных компонентов, схем, блоков питания должна выполняться с требованиями всех государственных нормативов и законов. Выбрасывать электронные компоненты, электронные схемы, блоки питания нельзя вместе с бытовыми отходами, следует передать в структуры, занимающиеся утилизацией электронных отходов по Федеральному закону № 89 от 1998г. «Об отходах производства и потребления».

5.4.7 Повышенный уровень УФ-радиации установки «Импульс-1»

В установке Импульс-1 используется лазер ЛГИ-505. Предназначены для применения в составе микроэлектронных установок. За счет небольшой длины волны имеется возможность сфокусировать пучок излучения в пятно очень малых размеров, что, в свою очередь, позволяет производить обработку элементов с уровнем долей микрометров.

Таблица 33 Характеристики лазера ЛГИ-505

Характеристики лазера	
длина волны излучения	337 нм
энергия импульса излучения	120 мкДж
длительность импульса по уровню 0.5	30 нс
частота повторения импульсов	до 1 кГц
размеры лазерного пучка	1,5 мм
средняя мощность излучения	до 100 мВт
потребляемая мощность (220 В)	1000 Вт
габариты и вес лазера	600x220x125 см, 20 кг

Согласно СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» [61], в зависимости от рабочей длины волны, используемый в данной работе лазер относится к II - группе ($380 < \lambda \leq 1400$ нм).

Излучение, испускаемое рассматриваемым лазером, относится к ультрафиолетовому излучению. УФ-излучение может стать причиной острых и хронических поражений. Особенно подвержены действию УФ-излучения глаза и кожа. Для коллективной защиты от излучения рекомендуется применить следующие способы:

- экранирование источников излучения и рабочих мест;
- удаление обслуживающего персонала от источников УФ-излучения (дистанционное управление);
- рациональное размещение рабочих мест;
- специальная окраска помещений.

Среди средств индивидуальной защиты предлагается использование рукавиц, спецобуви, защитные очки и щитки со светофильтрами, а также предохранительные средства, такие как пасты и мази [9].

На рабочем месте присутствует предупреждающий об опасности знак (рис. 4.2).



Рисунок 33 – Предупреждающий знак опасности [61]:
«Опасно. Лазерное излучение»

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайными ситуациями (ЧС) принято называть обстоятельства, возникающие при стихийных бедствиях, авариях и катастрофах. Факторы военного, социального и политического характера заключающиеся в резком отклонении от норм протекающих явлений и процессов и оказывающих воздействие на жизнедеятельность людей.

Источники возникновения чрезвычайных ситуаций делятся на природные, техногенные и биолого-социальные. В свою очередь ЧС делятся по опасным природным явлениям, опасным техногенным событиям и опасным биологическим проявлениям.

Пожарная безопасность

К пожарам и возгораниям при монтаже и неисправности электрических установок чаще всего приводят короткие замыкания, возникновение которых происходит за счет соприкосновения между собой оголенных проводов, обрыва фаз или соприкосновение не заизолированного фазного провода с землей.

При плохой изоляции токоведущих проводов могут произойти короткие замыкания во внутренней части провода. Короткое замыкание может произойти в результате прохождения тока между проводами не соприкасающихся между собой, но электрические соединения вследствие соприкосновения с металлическими предметами, несущими частями конструкции, водопроводными трубами и т.д, могут привести к КЗ. Также КЗ между токоведущими проводами могут происходить из-за влажности окружающей среды, например, такой как в теплице.

Пожарную опасность могут представлять между собой неплотные соединения контактов, присоединение проводов к приборам, или при стыковке наращенных проводов. Неплотные, не заизолированные контакты могут окисляться и приводить к большому сопротивлению. При окислении идет большой нагрев соединения и вызывают воспламенение изолирующего слоя провода. Также неплотные соединения контактов может привести к созданию искры на данных контактах, что может послужить причиной возникновения пожароопасной ситуации [57].

Причины возникновения пожара не электрического характера:

- Халатное обращение с приборами нагревательного типа, использование открытого огня;

Причины возникновения пожара электрического характера:

- Короткое замыкание, перегрузки по максимально допустимому току, искрение, электрические дуги и т.д

Для локализации или ликвидации возможных очагов возгорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. К

простейшим средствам тушения относятся ручные огнетушители, песок, грунт и т.д. Первичные средства обычно применяются до прибытия пожарной бригады.

Тушение происходит за счет изоляции очага возгорания от кислорода за счет применения средств первичной ликвидации очага возгорания. Первичные средствами являются огнетушители типа ОУ-2, ОУ-3 и т.д. Данные огнетушители предназначены для тушения воспламенённых предметов и электрических установок под напряжением до 1000 В. Порошковые огнетушители применяются для тушения документов и бумажной продукции. При тушении токоведущих частей электроустановок, применяются пеносодержащие огнетушители типа ОП-5.

При возникновении чрезвычайной ситуации, нужно:

1. Отключить электропитание по возможности доступа к выключателю;
2. Вызвать пожарную охрану по номеру «112», «01»;
3. Определить места возгорания;
4. Оповестить сотрудников о пожаре;
5. Покинуть помещение, используя основные и эвакуационные пути;

При необходимости вызвать службу скорой помощи по номеру «03».

ВЫВОДЫ ИЗ ГЛАВЫ 5

В разделе «Социальная ответственность» был проведен анализ опасных и вредных факторов, разработаны мероприятия по обеспечению безопасных условий труда, рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности труда. Рассмотрена экологическая безопасность воздействия установки «Импульс-1» окружающую среду, а также утилизация компонентов данной системы.; отклонения показателей микроклимата; отсутствие или недостаток естественного света; недостаточную освещенность рабочей зоны; повышенная пульсация светового потока; защиту от лазерного излучения установки «Импульс-1».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kroger F.A. Some Aspect of the Luminescence of Solids // New York-Amsterdam-London-Brussels. - 1948. - 419 p.
2. Ohaka R., Fuita I, Fukuda A. V_K -center in alkali halides // J. Phys. Soc. Japan. - 1963. - V.19. - Suppl. 2. - P.263-268.
3. Lamansch H., Rossel J., Saurer E. Localized and self-trapped excitons in CsI // Phys. Stat. Sol. - 1970. - V. 41. - P. 98-107.
4. Lamantsch H., Rossel J., Saurer E. Kinetics of localized exciton recombination in CsI // Phys. Stat. Sol. (b). - 1971. - V.46. - No 2. - P.687-695.
5. Wakita S. Luminescence of KBr-KI solid solution // J. Phys. Soc. Jap. - 1971. - V.31. - No 5. - P.1505-1512.
6. Валбис Я.А. Люминесценция связанных экситонов в щелочно-галогидных кристаллах с примесями катионов первой группы // Оптика и Спектр. - 1966. - Т.21, № 2. - С.181-187.
7. Seitz F. Speculation on the properties of silver halide crystals // Rev. Mod. Phys. - 1951. - V.23. - No 4. - P.328-352.
8. Klick C.C., Patterson D.A. Low Temperature Coloration in KCl and KBr Near the Fundamental Edge // Phys. Rev. - 1962. - V.130. - No 6. - P.2169-2176.
9. Rosenstok H. Alpha and Gamma Bands in Alkali Halides // Phys. Rev. - 1963. - V.131. - No 3. - P.1111-1113.
10. Tomusk T. Optical Absorption and Luminescence of the α -center in KBr // J. Phys. Chem. Sol. - 1965. - V.26. - No 5. - P. 236-241.
11. Церцвадзе А. Энергия экситонного поглощения в области γ -полосы в щелочно-галогидных кристаллах // ФТТ. - 1961. - Т. 3, № 2. - С.336-341.
12. Панова А.Н, Мустафина Р.Х, Быкова Е.М. Электронные центры окраски в кристаллах NaI(Tl) // Монокристаллы и техника, - Харьков, ВНИИ монокристаллов. - 1973. - Вып. 1(8). - С. 33-42.

- 13.Розман Г.А., Колбасовская Н.Г., Плевина Г.А. Новая полоса поглощения экситона, локализованного вблизи диполона // Оптика и Спектр. - 1982. - Т.53. - № 5. - С. 782-784.
- 14.Измайлов С.В., Розман Г.А. Оптические процессы в кристаллах щелочных галогенидов, вызванные диполонами (нейтральными вакансионными парами) // Тез. докл. Всес. конф. "Физика диэлектриков и перспективы ее развития": М.- 1973. - С.81-83.
- 15.Donahue J., Teeqarden K. Luminescence from Perturbed Exciton States // J. Phys. Chem. Sol. - 1968. - V.29. - No 12. - P.2141-2151.
- 16.Illingworth R. Luminescence decay of KI(Tl), KBr(Tl) and KCl(Tl) // Phys. Rev. - 1964. - V.13. - N 2A. - P.508-517.
- 17.Валбис Я.А. Люминесценция щелочногалоидных кристаллов, обусловленная излучательной аннигиляцией локализованных экситоноподобных возбуждений // Автореферат дисс... канд. физ.-мат. наук: Рига. - 1966. - 17 с.
- 18.Панова А.Н., Ширан Н.В. Центры свечения в CsI(Na) // Изв. АН Латв. ССР, сер. физ. и техн. - 1972. - № 2. - С. 118-122.
- 19.Панова А.Н., Ширан Н.В. Исследование фото- и радиolumинесценции кристаллов CsI(Na) // Тез. докл. III межд. конф. по люминесценции. Л.: - 1972.- С. 35-36.
- 20.Иванова Н.И., Тарасова Л.И. Спектры люминесценции щелочно-галоидных фосфоров со смешанными основаниями // В сб. "Люминесценция" М.: Изд-во АН СССР. - 1963.- № 1. - С.167-174.
- 21.Жуковский А.Н. О возможности сосуществования в щелочногалоидных кристаллах центров люминесценции типа комплексов // Автореферат дисс... канд. хим. наук. Л. - 1966. - 17 с.
- 22.Абдусадыхов Т.А. // Труды ИФА АН ЭССР. - 1959. - № 10. - С. 97-137.
- 23.Yuster P.H., Delbecq C.J. Thallium Dimers in KI-Tl Crystal // J. Chem. Phys. -1953. - V.21. - No 4. - P. 892-900.

24. Tsuboi T., Kato R. Thallium cluster in KI(Tl) crystals // J. Phys. Soc. Japan. - 1968. - V.24.- No 2. - P.427
25. Ляпидевский В.К. Сцинтилляционный метод детектирования излучений // М.: Изд. МФТИ. - 1981. - 88 с.
26. Гарбер П.Р. Люминесценция ЩГК с повышенным содержанием примеси // Автореферат дисс... канд. физ. -мат. наук. Новосибирск. - 1968. - 23 с.
27. Маароос А.А. О физико-химической структуре центров в ЩГК, активированных таллием // Дисс... канд. хим. наук., Тарту. - 1972. - 150 с.
28. Гиндина Р.И, Эланго А.А, Хаав А.А, Маароос А.А, Цирк А.А. О физико-химической природе центров люминесценции в щелочногалоидных кристаллах // Оптика и Спектр. - 1973. - Т. 34, Вып.1. - С.117-123.
29. Forro M. // Z. Physik. - 1929. - Bd.58. – No 5. - S. 613-620.
30. Вайданич В.И. Фотолюминесценция кристаллов NaI(Tl) и CsI(Tl) при низких температурах // Автор. дис... канд. физ.-мат. наук., Львов. - 1966. - 10 с.
31. Плявинь И.К. // Оптика и спектроскопия.-1959.-Т. 7, вып. 1.-с. 71-77.
32. Nishimura H., Kubota T., Tomura M. // Journal of Physical Society of Japan.-1977.-Vol.42, №1.-p.175-183.
33. Alexandrov B.S., Ianakiev K.D., Littlewood P.B. // Nucl. Instr.and Meth. in Phys. Res. A.-2008.-Vol.586.-p.432-438
34. Ishikane M., Kawanishi M. // Jap. J. of Appl. Phys.-1975.-Vol.14, №1ю-p. 64-69.
35. Kaufman R.G. Hadley W. B., Hersh H.N. // IEEE Trans. Nucl. Sci.-1970.-Vol.17, №3.-p.82-88.
36. Fontana M.P, Van Sciver W.I. // Phys. Rev.-1968.-Vol.168, №3.-p.960-964.

37. Deich R.G., Abdrakhmanov M.S., D.P. Erts, Kuyanov A.P. // Sol. Stat. Com.-1991.-Vol. 80, №1, p. 63-66.
38. В.Ю.Яковлев, Л.Н.Трефилова, А.А.Карнаухова//Известия высших учебных заведений, 2013, Индекс УДК: 535.37
39. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. М.: Мир, 1984, Т.1. 455 с.; Т.2. 455 с.
40. Пикус Г.Е. Основы теории полупроводниковых приборов / Г.Е. Пикус. М.: Наука, 1965, С. 352–365.
41. V. Yakovlev, L.Trefilova, A.Meleshko, V.Alekseev, N.Kosinov - Charge transfer processes in CsI:Tl using near-UV light
42. V. Babin, K. Kalder, A. Krasnikov et al.// Journal of Luminescence.-2002.- № 96.-p. 75-85
43. L.F. Mollenauer, N.D. Viera, and L. Szeto.// Physical Review B.-1983.-Vol. 27;№ 9.-p. 5332-5346
44. Яковлев В.Ю., Трефилова Л.Н., Мелешко А.А., Косинов Н.Н. Фотоиндуцированные процессы переноса заряда в кристаллах CsI(Tl) // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56 - №. 7/2. – С. 116-121
45. СГУ: [Электронный ресурс], 2019. URL: <https://www.sgu.ru/>. (Дата обращения: 10.05.2019)
46. ОАО «Кристалл»: [Электронный ресурс], 2019. URL: <http://detectors.ru/index.html#main>. (Дата обращения: 10.05.2019)
47. ООО «Азимут Фотоникс»: [Электронный ресурс], 2019. URL: <http://www.azimp.ru/>. (Дата обращения: 10.05.2019)
48. Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 29.07.2017) "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" Глава 3 , Статья 9.
49. ГОСТ 12.1.007–76. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (с Изменениями N 1, 2)

- 50.ГОСТ Р МЭК 60598-2-3-99 ФБУ “Ростовский ЦСМ” испытательный центр электрооборудования (ИЦ ЭО).
- 51.ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
- 52.ГОСТ 12.3.002-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Процессы производственные. Общие требования безопасности.
- 53.СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
- 54.СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 55.СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*
- 56.ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
- 57.ГОСТ ИЕС 61140-2012 Защита от поражения электрическим током. Общие положения безопасности установок и оборудования (с Поправкой).
- 58.ГОСТ 12.1.030–81 ССБТ Защитное заземление, зануление. – М.: Стандартиформ, 1982. – 9 с.
- 59.ГОСТ 12.1.045–84 ССБТ. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. – М.: Стандартиформ, 2000. – 31 с.
- 60.ГОСТ 17.4.1.02-83 [60]. «Санитарно-эпидемиологическими требованиями к атмосферному воздуху»
- 61.СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров»
- 62.ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны

ПРИЛОЖЕНИЕ А

CHAPTER 1 GENERAL IDEAS OF LUMINESCENT ALKALI HALIDE CRYSTALS

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4BM72	Новоселов А.А.		

Консультант школы отделения _____ (ИШНПТ, отделения материаловедения) _____ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Карнаухова А.А.	к.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения _____ (отделения иностранных языков):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Рыбушкина С.В.			

CHAPTER 1. GENERAL IDEAS OF LUMINESCENT ALKALI HALIDE CRYSTALS

1.1 Main data on monocrystal NaI:Tl

The monocrystal of sodium iodide activated by thallium was discovered by R. Hofstadter more than seventy years ago. This scintillator has a high light output — about 25 eV is spent in it on formation of one photon, that provides a wide range of applications. The luminescent spectrum has good correspondence with spectral response of standard photocathodes of photomultiplier. The monocrystal has high transparency to light of its own radiation and is rather simple in manufacture. A large lack of the crystal is its high hygroscopicity.

Today there are spectroscopical data and energy reasons in favor of the fact that in the activated alkali halide Na:Tl crystal the luminescence centers are the self-trapped excitons in the first coordination sphere of an activator ion. These exciton states are perturbed by an activator ion, which leads to change of a spectral distribution of a luminescence in comparison with the self-trapped excitons in a pure crystal.

All electronic exaltations arising in the crystal under ionizing irradiation can participate in energy transfer from the host lattice to activator dopant: the electrons, holes and excitons which are both in the free and in the self-trapped state. The light electron is not capable to self-trapping, though can be localized on rather deep traps. But the exciton or a hole having big effective weight pass very quickly into the self-trapped state. So, the energy transfer from the host lattice to the impurities centers can be carried out by the self-trapped two-haloid holes (V_K -centers), exciton polarons and conduction band electrons.

1.2 Activation of a luminescence in AHC

Luminescent characteristics of the activated crystals are usually interpreted when using concepts of direct and indirect activation of a luminescence by Kreger [1].

In case of direct activation, absorption and exaltation spectra are specific to this activator and are caused by radiative transitions between its energy levels.

Direct activation of luminescence manifests in AHC with a wide band gap and a quite small gap between energy levels of the activator. An example of systems with direct activation are AHC activated by mercury-like ions.

In case of indirect activation of a luminescence, spectral characteristics of AHC poorly depend on activator and are specific to this host substance. Luminescence is caused by radiating annihilation of the bound or STE of haloid (X_2^{2-}) at lattice defects of the impurity or structural character [2-6]. Exaltation of this luminescence is carried out on recession of fundamental exciton absorption, as their creation near defects of a lattice in most cases requires smaller energy than in undisturbed places of a lattice.

The exaltations arising near an anionic vacancy or the F-center – α - and β -band are experimentally proved. α - and β -band properties are in detail considered by Zeytts [7], in work [8] γ -band which is located in more high-energy area in comparison with α - and β -bands is found. According to [9] this band is caused by exaltation of the haloids which are in the second coordination sphere in relation to an anionic vacancy. A radiative annihilation of α - and γ -exaltations is proved in works [10, 11]. At the same time the luminescence on the properties similar to α - luminescence is excited in γ -band, but its maximum is shifted to more long-wave spectral range approximately by 0.1 eV. α -luminescence In crystals of NaI is excited at temperature of 77K in area of 224 and 238 of nanometer and radiated in a band with the maximum of 480 nanometers [12].

In theoretical works [13, 14], it is shown that couples of vacancies of the opposite sign – a dipolons, and also single vacancies can serve as the centers of trapping of exciton exaltations. The experimental observation of a luminescence of the trapped excitons at a cationic vacancy is made in work [13]. The trapped excitons arising near the mercury-like ions in AHC lattice are known as D-exaltation [15, 16].

The impurity indirect activation of phosphor, according to [17], is observed in systems with isovalent impurity, cation (anion) of which possesses high ionization potential (smaller electron affinity) in comparison with cation (anion) of a matrix with a width of the band gap smaller in comparison with the host matrix.

Striking example of a system with indirect type of activation is effective scintillation material on the basis of CsI(Na) crystals where the luminescence arises due to a radiative annihilation of the near-activator excitons [18,19].

1.3. AHC, activated by mercury-like ions

Mercury-like ions have a configuration of the outer electronic shell of s^2 and in excited state - sp . These configurations correspond to a ground level 1S_0 and a number of excited levels 1P_1 , 3P_0 , 3P_1 , 3P_2 . In the field of a cubic symmetry transitions $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ (A) and $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ (C) are allowed, and in the field of a tetragonal symmetry also transition $^1S_0 \rightarrow ^3P_2$ (B). Transition $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ is allowed only in the field of lower symmetry.

There is a genetic linkage of absorption bands of AHC containing mercury-like ions with the corresponding transitions in the free ions of the activator [20-24]. In absorption spectra of AHC activated by mercury-like ions A-, B- and C-bands are observed. In exaltation spectra of luminescence, except these bands, also the D-band located on the edge of exciton absorption of a host is observed (according to work [24]).

At exaltation in A-, B- and C-absorption bands at room temperature only the A-emission band, due to nonradiative transitions $^1P_1 \rightarrow ^3P_1$ and $^3P_2 \rightarrow ^3P_1$ is observed usually in radiation spectra of the activated AHC. The quantum yield of an intracenter luminescence of such crystals is constant and close to unit. Besides, also long-wave luminescence which is compared with D-radiation [16] is excited in the A-absorption band at low temperatures.

With increase in concentration of the activator, spectral characteristics of AHC change: there are additional absorption and radiation bands, related to the complex activated centers: pair, threefold etc. Absorption, radiation, and exaltation spectra of a luminescence of AC are, as a rule, shifted to a long-wave spectral range in relation to the corresponding ranges of the main centers [20-22]. Respectively, the intensity of their absorption and a luminescence bands depending on the concentration of the activator changes under the square, cubic etc. law. As these additional centers arise and

increase in number, both at increase of concentration of the activator, and under the actions increasing number of host lattice defects, there are representations that either couple of ions of the activator, or an ion or couple of ions of the activator and point defect of a lattice (vacancies, impurity) is a part of the complex centers [20-22].

Studying of the complex centers was begun by Yuster and Delbek [25] who on the system (KITl) showed that there are pair centers which contains two ions of thallium. The intensity of their absorption increases with increase in concentration of thallium according to the square law.

Except the pair centers, at the increased concentration of the activator even more complex centers can be formed. So, the luminescence found at a temperature of 77K with a maximum of 490 nanometers in KI(Tl) crystals in work [24] is due to defect of a lattice which contains more than three thallium ions.

In strongly doped by Cu, Pb, Tl, Sn impurities AHC the luminescence was observed at room temperatures, which coincides with a luminescence of haloid salts of the corresponding activators at low temperatures. That was the basis for the conclusion [26] that this luminescence is due to a phase of the activator salt dispersed in a crystal lattice.

The detailed research of thallium aggregate centers is conducted in works of Gindina [27, 28] in the systems KCl(Tl) and KBr(Tl) in which the concentration of the activator didn't exceed solubility limit. In the specified systems several types of the luminescence centers were revealed: individual, pair, threefold and more complex which contain 1, 2, 3 and more cations of thallium divided by haloid, respectively. The structure of exaltation spectra of AC repeat in structure the exaltation spectra of the main centers, in it the genetic linkage with transitions in the free ion of Tl^+ is well shown. In emission spectra (A-radiation) of the aggregate centers two bands, one of which (short-wave) is due to radiative transitions in Tl^+ ions perturbed by the other neighboring activator ions, are found, and other (long-wave) is attributed to electronic transitions in the ions of haloid which are a part of these centers (D-emission type). Duration of decay of an intra center luminescence of AC is of the same order, as the Tl^+ centers, while D-radiation is shown only at low temperatures and has only the long

component. At very high concentrations of the activator when the largest aggregates are formed, spectral characteristics of AC approach to spectral characteristics of haloid salt of the activator.

Increase in number of AC is followed by decrease of number of the single centers Tl^+ . Besides, in the crystals containing AC derogation from strictly statistical distribution of impurity is observed, that is caused by power advantage of formation of Tl^+ associates, owing to partially homopolar nature of bond of $Tl^+ - X^- - Tl^+$. As homeopolarity of thallium - haloid bond increases in a homologous series of anions of Cl^- , Br^- , I^- , upon transition from chlorides to iodides of alkali metals, formation of the complex centers has to happen at rather smaller concentration of the activator.

1.4 The activated centers of a luminescence in crystals $NaI(Tl)$

Absorption spectra of crystals $NaI(Tl)$ are characterized by A-, B- and C-bands with maxima at 293, 250 and 234 nanometers [29]. The D-band is shown at 229 nanometers [30].

The range of the activated photoluminescence has a complex character, and the spectrum shape strongly depends on temperature and the concentration of the activator in a crystal and also on the specified band of excitation.

However, there are several points of view concerning the nature of the luminescence center and also the processes which cause stages of a increase and decrease of a scintillation pulse intensity at room temperature.

So, for example, in works of Van Skayvera it is shown [17] that at a temperature of 5K the luminescence of 330 nanometers is excited in the A-absorption band. This luminescence decays exponentially with time constant $\tau = 10$ nanoseconds. With the same decay time of the same luminescence is observed after its excitation at 5K in C- and D-absorption bands. Along with this band a six times less intensive luminescence of 430 nanometers is excited in a D-band. With the temperature increase the intensity of a luminescence in a band of 330 nanometers is suppressed (with quenching activation energy of 0.045 eV). At the same time brightness of a luminescence of 430 nanometers amplifies. The total light yield of a photoluminescence remains invariable.

At a temperature of 77K in A-, B- and C - bands, irrespective of C, the same luminescence with a maximum of 430 nanometers is excited [18, 19]. With temperature increase to room and above its maximum is anomalously shifted to the short-wave range from 430 nanometers to 410 nanometers (320 K) [135]. In spite of the fact that also weak luminescence of 330 nanometers which intensity grows with temperature increase is excited in the specified bands at 77K, this band for a long time was attributed only to a luminescence of thallium dimers [20, 21, 22], and its exaltation in the specified area was explained by overlapping of absorption bands of pair and the main activator centers of a luminescence.

There was an opinion [23, 24] that in crystals NaI(Tl) containing less than 10^{-3} % of Tl in A-, B- and C - bands at room temperature only the blue luminescence of 415 nanometers is excited, and with rise of C in the specified bands luminescence with a maximum of 330 nanometers is excited as well, though its exaltation bands are displaced in the long-wave range from A-, B- and C- bands.

The last statement is fair for temperature 77K, however, at 295 K a luminescence of 330 nanometers both in additional A'-, B'-, C'-bands, and equally well is excited in the main activated absorption bands [25]. It was supposed that it is a consequence of partial overlapping of exaltation bands at room temperature.

In Nagli work [26] it is shown, as with temperature increase above room (to 457K) the intensity of luminescence band of 330 nanometers increases, bands of 415 nanometers decreases, positions of maxima are displaced in opposite directions, and the relative quantum yield (to the field of temperature suppression) remains constant.

On the basis of the aforesaid and by analogy with KI(Tl) [8] intra center transitions in an ion of Tl^{+} should attribute a band of a luminescence of 330 nanometers. Observed at 77 K luminescence of 430 nanometers which with temperature increase moves towards larger energies (415 nanometers at 300 K), it is necessary to attribute luminescence the near-activator excitons. They can arise with temperature increase as a result of a delocalization of activated excitation in a D-luminescence [10].

The pair centers are focused in a lattice along the direction $\langle 100 \rangle$, i.e. ions of Tl^{+} are divided by haloid [28]. At the same time the center of molecular type isn't

formed, only modification of absorption and a luminescence of an ion of Tl^+ is observed [73]. The ultraviolet band possesses short decay time (~ 7 nanoseconds) at room temperature [28]. The long-wave band of the pair centers differs by position from a blue luminescence of monomers a little (428 nanometers at exaltation in B' - band, against 420 nanometers at excitation in the B-band at 180 K) [27]. Data on duration of a luminescence of this band are absent in literature.

By convention the term "complex activated centers" (AC) we will call thallium aggregates containing more than two ions of Tl^+ absorbing in bands of 315 both 268 nanometers (77K) and emitting in a band 445 nanometers [95].

In work [28] it is shown that increase of C leads to the relative decrease of intensity of a luminescence of Tl^+ and $(\text{Tl}^+)_2$ of the centers and shift of a maximum of a luminescence to a long-wave spectral range up to 460 nanometers (295K) and also to increase in half-width of an emission band. The observed shift of a maximum is caused by emergence of an additional luminescence which range of exaltation is shifted concerning ranges of excitation of a luminescence of Tl^+ - the centers and is to areas 240-280 and 305-325 of nanometer. This fact demonstrates independent existence in crystals (NaTl) of monomers, dimers and STs of the activator. $(\text{Tl}^+)_n$ in a lattice leads to deterioration in conditions of power transmission from a lattice to the centers of a luminescence and decrease in a light yield of crystals [29].

As a result, most of authors connect a luminescence band in the field of 425 nanometers with inter-level electronic transitions in a single ion of thallium [31-37].

According to data which are provided in work [31], it is possible to draw a conclusion that activation energy of 0.026 eV corresponds to transition from metastable $^3\text{P}_0$ to the radiative $^3\text{P}_1$ Tl^+ level of the center, transitions from which to the basic $^1\text{S}_0$ state, strictly speaking, are forbidden by selection rules, and can be allowed only partially. The luminescence due to such intercombination transitions, has, as a rule, the big decay time.

It follows from the provided data [38] that more than 90% of initial intensity of a cathodeluminescence decays at 78 K with a time constant of 12 nanoseconds. Considering the invariance in time of a spectral distribution of a luminescence, on the

one hand, and existence of a nanosecond component with a time constant about 10^{-8} in an attenuation kinetics at low temperatures, on the other hand, the conclusion can be made that the luminescence in a band of 425 nanometers is caused by the radiative electronic transitions allowed by selection rules from an excited level of the center of a luminescence to a ground state. The origin of slow stages of both increase and decrease should be considered caused by thermally activated processes of a population of this level from underlying levels.

In general, the set of [38] results presented in work fully corresponds to model of the center of a luminescence which diagram of levels is submitted in configuration coordinates in fig. 1. Irradiation of a crystal with the ionizing radiation leads to creation of ions of thallium in singlet and triplet excited states. Radiative transitions from singlet 1P_1 to the basic 1S_0 a state cause a nanosecond stage of luminescence decay. The microsecond stage of an exponential decay with τ_{fast} is caused by a population of radiative 1P_1 levels as a result of thermally activated electronic transitions $^3P_1 \rightarrow ^1P_1$ with activation energy 0.026 eV (the left-hand figured arrow in fig. 1).

The population of 3P_1 level is in turn fed by the 3P_0 level. Realization of thermally activated transitions $^3P_0 \rightarrow ^3P_1$ causes arising at $T \approx 130$ K stage of post-radiation increase of a luminescent emission in a submicrosecond times. Increase in speed of a intensity increase with rise of T higher than 130 K with $E_a = 0.07$ eV are due to rise of probability of overcoming the energy barrier dividing 3P_0 and 3P_1 states (the right figured arrow on the diagram of fig. 1).

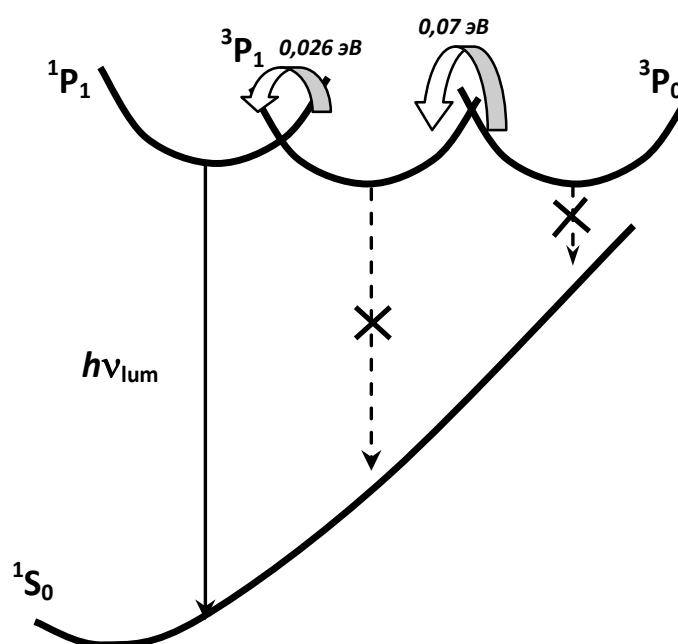


Figure 1 – The scheme of levels of the center of a luminescence in crystal NaI:Tl

Thus, spectral and kinetic properties of a luminescence at 425 nanometers in crystal NaI:Tl can be considered as caused by intra center configuration transformations of excited Tl center which are followed by inter-level electronic transitions and leading eventually to population of radiative 1P_1 level.

It is possible to make the conclusion from data in work [38] that scintillation of NaI:Tl at near-room temperatures are caused by intra center electronic transitions $^1P_1 \rightarrow ^1S_0$ in thallium ions. The stage of increase of a scintillation pulse should be considered caused by electronic transitions from 3P_0 to 3P_1 level of Tl^+ center; duration of flash is defined by time of electron transition from metastable 3P_1 levels to a radiative 1P_1 state.

1.5 Types of photodetectors for filing of infrared radiation

Because there were assumptions of luminescent processes in the IR-area, the due to processes of charge transfer is similar to processes in CsI:Tl where the activator subband of conduction [41] is formed, it is necessary to take measurements on detecting of infrared radiation in NaI:Tl. For this purpose, it is necessary to choose the photodetector conforming to particular requirements.

Photodetectors are intended for transformation of light radiation to electric signals. As photodetectors photoresistors, photo diodes, photo thyristors etc. can be used.

At selection of photoradiators and photodetectors it is necessary to coordinate their spectral characteristics. Otherwise owing to imperfection of the existing light sources it is rather difficult to receive satisfactory results.

Photoelectric phenomenas on the basis of which photodetectors are under construction can be divided into three main types:

1. change of an electrical conductivity of substance at its irradiating — an inner photoemissive effect,
2. emergence of EMF on border of two materials under the influence of light — photoeffect in a barrier film (use in semiconductor photo cells);
3. emission by substance of electrons under the influence of light — an outer photoemissive effect (use in vacuum and gas-filled photo cells).

Because the processes proceeding in NaI:Tl are based on an inner photoemissive effect, only the photodetectors based on this effect will be considered further.

1.5.1 Photoresistors

In photoresistors the phenomenon of change of resistance of substance under the influence of an infrared, visible or ultra-violet radiation is used. Their basic element is the semiconductor plate which resistance when irradiating changes. The origins of a photoconduction can be explained as follows. In the darkened semiconductor as a result of influence of thermal energy there is a small amount of the mobile charge carriers (electrons and holes) [39,40].

Respectively the semiconductor has initial conduction which carries the name the dark:

$$\sigma_0 = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p), \quad (1)$$

where q – is an electrode charge; n_0, p_0 - is concentration of the mobile charge carriers in the semiconductor in an equilibrium state [39,40].

Under the influence of light concentration of the mobile charge carriers increases, and various mechanisms of their oscillation are possible.

Increase of a hole concentration and electrons can happen because quanta of an electromagnetic radiation excite electrons and transfer from a valence band to a conduction band.

Besides, they can cause transition of electrons from a valence band on the impurity levels and increase only in a hole conduction or transition of electrons from the impurity levels to a conduction band and increase in an electron conduction [39,40].

Thus, in the semiconductor at radiation by light concentration of the mobile charge carriers increases by size and its conduction sharply increases. In other words, under the influence of the radiation (photons) there is an oscillation of the mobile charge carriers (electrons and holes) => resistance of a photoresistor decreases.

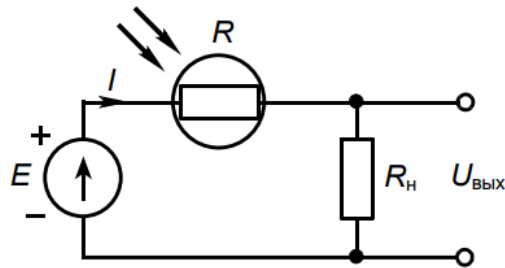


Figure 2 – Scheme of inclusion of a photoresistor [39,40]

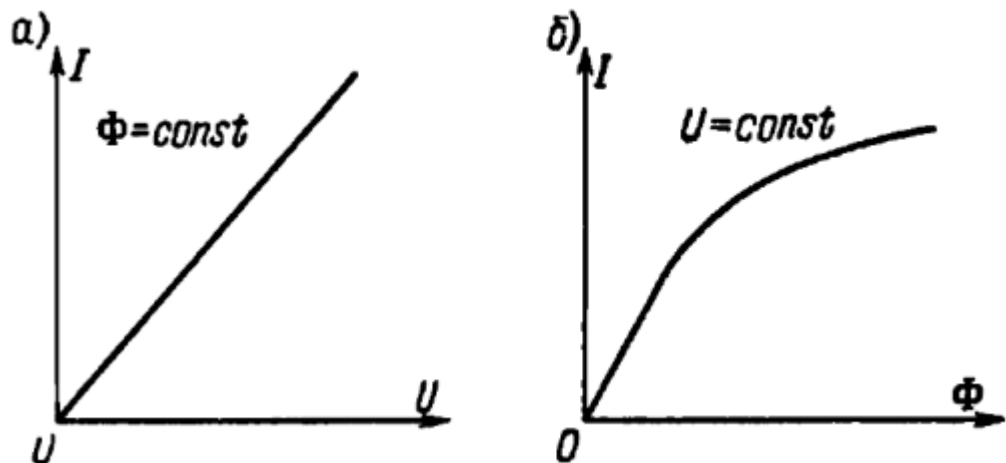


Figure 3 – a) current-voltage characteristic of photoresistors; b) characteristic of integrated sensitivity [39,40]