

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

Институт международного образования и языковой коммуникации
Направление подготовки Оптотехника
Кафедра Междисциплинарная

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Импульсная катодолюминесценция теллурида кадмия

УДК 628.9.03:535.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154В20	Чэнь До		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Штанько Виктор Федорович	д. ф.-м. н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<i>доцент</i>	<i>Конотопский. В.Ю.</i>	<i>Кафедра менеджмента, Доцент</i>		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Кырмакова О.С.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЛиСТ	Яковлев Алексей Николаевич	к. ф.-м. н., доцент		

Томск – 2016 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

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

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

Институт международного образования и языковой коммуникации
 Направление подготовки Оптотехника
 Кафедра Междисциплинарная

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

 Яковлев А.Н.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
154В20	Чэнь До

Тема работы:

Импульсная катодолюминесценция теллурида кадмия
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15. 06. 2016г
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Литература по теме ВКР. Объект исследования- монокристаллы теллурида кадмия; модель математического моделирования процесса формирования импульсной катодолюминесценции прямозонных полупроводников. Методика импульсной спектроскопии с временным разрешением.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы: механизмы рекомбинации неравновесных электронов и дырок в прямозонных полупроводниках при варьировании уровня возбуждения. 2. Произвести измерение зависимости интенсивности импульсной катодолюминесценции от линейных размеров возбуждаемой области. 3. Произвести измерение зависимости интенсивности от плотности энергии возбуждающего электронного

	пучка. 4. Рассчитать спектральное распределение коэффициента экстинкции в теллуриде кадмия при импульсном электронном возбуждении 4. Произвести расчет изменения коэффициента экстинкции от интенсивности импульсной катодоллюминесценции.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Спектры импульсной катодоллюминесценции теллурида кадмия при изменении условий возбуждения. 2. Спектральный состав оптических потерь при импульсном возбуждении.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	

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

перевод осуществляться не будет

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	29.09.2015г
---	-------------

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154B20	Чень До		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
154B20	Чэнь До

Институт	ИМОЯК	Кафедра	ЛИСТ
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	Оптотехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Альтернативы проведения НИ</i>
4. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Конопский.В.Ю.	Кафедра менеджмента, Доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154B20	Чэнь До		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
154B20	Чэнь До

Институт	ИМОЯК	Кафедра	ЛиСТ
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	Оптехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p><i>Рабочим местом является научная лаборатория «Физэлектроники быстропротекающих процессов» кафедры лазерной и световой техники. В помещении проводятся спектрально-кинетические исследования материалов.</i></p>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p><i>Вредные факторы: монотонный режим работы, отклонение показателей микроклимата, превышение уровней шума.</i></p> <p><i>Опасные факторы: электромагнитное излучения, электрический ток, пожар.</i></p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); 	<p><i>Воздействие на окружающую среду сводится к минимуму, за счет отсутствия загрязняющих веществ, за исключением бытовых отходов, которые систематически убираются.</i></p>

<ul style="list-style-type: none"> – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p><i>Возможные чрезвычайные ситуации являются: пожары, ситуации природного характера.</i></p> <p><i>К мерам по предупреждению будут относиться:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <i>1. Планирование защиты населения и территорий от ЧС на уровне предприятия (организации);</i> <i>2. Создание запасов средств индивидуальной защиты и поддержание их в готовности;</i> <i>3. Выявление угроз пожара и оповещение персонала;</i> <i>4. Подготовка работающих к действиям в условиях ЧС;</i> <i>5. Подготовка и поддержание в постоянной готовности сил и средств для ликвидации ЧС.</i>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p><i>Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78: рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество; рабочий стул должен иметь дизайн, исключающий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте; рабочее место должно соответствовать техническим требованиям и санитарным нормам.</i></p> <p><i>В соответствии с ГОСТ 12.1.005: 88* в помещении должен быть организован воздухообмен. Для улучшения воздухообмена необходимо выполнить следующие технические и санитарно-гигиенические требования: общий объем притока воздуха в помещении должен соответствовать объему вытяжки; правильное размещение приточной и вытяжной вентиляции.</i></p>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Кырмакова О.С.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154В20	Чэнь До		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 77 с., 17 рис., 15 табл., 34 источников.

Ключевые слова: импульсная катодолюминесценция, монокристаллы полупроводники теллурид кадмия.

Объектом исследования является кристалл теллурида кадмия

Цель работы – Экспериментальное изучение импульсной катодолюминесценции монокристаллов теллурида кадмия при импульсном электронном возбуждении при изменении плотности энергии и схем регистрации

В процессе исследования проводились обработка литературных данных о характеристиках импульсной катодолюминесценции и поглощения теллурида кадмия, освоена методика измерения спектральных характеристик люминесценции, проведен экономический анализ работ.

В результате исследования получены спектральные характеристики катодолюминесценции исследуемого кристалла, определены пороговые плотности возбуждения для вынужденного распада экситонов, установлено влияние наведенного оптического поглощения на спектр вынужденного излучения

Степень внедрения: полученные результаты будут использованы при контроле гетероструктур на основе нитрида галлия для светодиодов в рамках сотрудничества с ОАО «НИИ ПП»

Область применения: разработка способов контроля свойств оптических материалов

Экономическая значимость работы обусловлена рекомендациями по оптимизации технологии получения гетероструктур и увеличение сроков службы светодиодов

В будущем планируется использовать результаты работы в ОАО «НИИ ПП» при излучении излучательных свойств гетероструктур.

Список сокращения

ИКЛ – импульсная катодолюминесценция

ИЭП – импульсный электронный пучок

ЗП – зоны проводимости

ФЛ – фотолюминесценция

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

ЛО-фононы – продольные оптические фононы

ГИН – Генератор импульсных напряжений

ДА-пара – донор-акцепторная пара

Оглавление

Введение	
1. Обзор литературы	11
1.1 Физико-химические свойства и синтез CdTe	11
1.2 Влияние примесей на электрофизические характеристики CdTe	10
1.3 Краевое оптическое поглощение в A ₂ B ₆	14
1.4 Люминесценция монокристаллов A ₂ B ₆	21
2.Методика	29
3.Экспериментальные результаты	33
4. социальная ответственность	40
5. финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	57
Заключение	73
Список используемых источников	74

Введение

Монокристаллы типа A_2B_6 широко применяются при производстве полупроводниковых лазеров с поперечной и продольной накачкой .

Изменение физических свойств полупроводниковых кристаллов при облучении ионизирующей радиацией определяется накоплением стабильных дефектов - результатом сложной совокупности протекающих во времени процессов генерации, взаимодействия и распада электронно-дырочных возбуждений и первичных структурных дефектов. В связи с этим, исследования закономерностей формирования импульсной катодоллюминесценции (ИКЛ) необходимы как для разработки способов отбраковки, так и для оптимизации технологии роста монокристалла CdTe.

Цель данной работы является экспериментальным изучением импульсной катодоллюминесценции монокристаллов теллурида кадмия при импульсном электронном возбуждении при изменении плотности энергии и схем регистрации.

1. Обзор литературы

1.1. Физико-химические свойства и синтез CdTe.

Полупроводниковые соединения CdS, CdSe и CdTe с различными радиусами ковалентной, ионной и металлической связи, кристаллизуются в кубической структуре цинковой обманки (сфалерита), гексагональной (вюрцита), и смешанной из двух первых структур. Для CdTe характерна структура цинковой обманки. В таблице 1 приведены физические и оптические характеристики кристаллов CdS, CdSe и CdTe.

Таблица 1 – Физико-химические и оптические характеристики кристаллов CdS, CdSe и CdTe [A,B,C]: a_0 – постоянная решетки при 300 К; $T_{пл}$ – температура плавления; χ – коэффициент теплопроводности при 25 °С; α – оптическое поглощение (объемное) при $l = 10,6$ мм; n – показатель преломления при $l = 10,6$ мм; $\lambda_{экс}$ – длина волны экситонных полос в спектре люминесценции; D – диапазон пропускания; ΔX – разность электроотрицательностей; δ – степень ионности связи.

Соед.	a_0 , нм	$T_{пл}$, °С	χ , Вт·см ⁻¹ · °С ⁻¹	α , см ⁻¹	n	$\lambda_{экс}$, нм	D мкм	ΔX	δ
CdS	0,582 сфал. 0,4135 вюрц.	1750 вюрц., 100 атм.	0,2	0,007	2,2	487 ± 2	0,5 - 16	0,8	0,24
CdSe	0,608 сфал. 0,430 вюрц.	>1350	0,04	0,0015	2,4	690 ± 2	0,8 - 23	0,7	0,21
CdTe	0,648 сфал.	1041 сфал.	0,062	0,003	2,69	795 ± 2	1 - 28	0,4	0,12

Ввиду сложности приготовления тонких образцов первые исследования спектров пропускания были выполнены преимущественно на порошках, запрессованных в полиэтиленовую пленку. С применением технологий молекулярно-лучевой эпитаксии, стало возможным получение тонких кристаллов со структурой цинковой обманки для CdS, и CdSe [1,2,3]. Межатомная связь представляет собой комбинацию ковалентного и ионного типов связи с преимуществом ковалентного. Соединения имеют степень ионности связи менее 0,3 при разности электроотрицательностей менее 1. CdS имеет самую сильную ковалентную связь[C].

Электрофизические свойства кристаллов A_2B_6 в значительной мере определяются природой и концентрацией структурных дефектов и примесей. Кристаллы A_2B_6 , выращенные методом кристаллизации из паровой фазы [4], как правило, имеют нарушенную стехиометрию состава, в частности в CdS, в сторону избытка кадмия. Величина проводимости чистых соединений может быть значительно изменена путем термообработки монокристаллов в парах компонентов. Получают сульфид кадмия взаимодействием паров кадмия и серы, осаждением из растворов под действием сероводорода или сульфида натрия, реакциями между кадмий - и сераорганическими соединениями. Тип и величина электропроводности селенида кадмия и теллурида кадмия зависят от степени отклонения их состава отстехиометрического[5]. Селенид кадмия получают сплавлением простых веществ или из газообразных кадмия и селена, а также осаждением из раствора сульфата кадмия под действием селеноводорода, реакцией сульфида кадмия с селенистой кислотой, взаимодействием между кадмий - и селенорганическими соединениями. CdTe - из Cd и Te сплавлением или взаимодействием в газовой фазе. Монокристаллы и эпитаксиальные пленки выращивают осаждением из газовой фазы или из раствора в расплаве Cd и Te. Методы выращивания из газовой фазы дают возможность использовать

более низкие температуры роста без значительного отклонения от стехиометрического состава. Тем не менее, в работе [6] монокристаллы, выращенные из газовой фазы, характеризовались некоторым ухудшением совершенства кристаллической структуры: появлялись включения теллура и увеличивается средняя плотность дислокаций.

1.2. Влияние примесей на электрофизические характеристики полупроводников A2B6.

Наличие примесей может существенно улучшить или ухудшить свойства кристаллов. Остается открытой проблема получения равномерного распределения примесей в аксиальном и радиальном направлениях. Совместное легирование, например, CdTe ванадием и германием, позволило авторам [7] значительно увеличить однородность материала и его электрофизические характеристики.

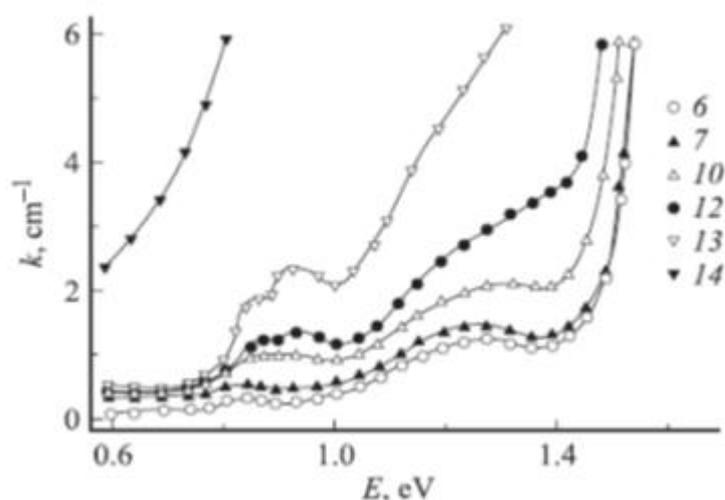


Рисунок 1 – Спектры поглощения при $T = 78$ К монокристаллических пластин, изготовленных с различных частей кристалла CdTe:V:Ge, $N_V = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, $N_{Ge} = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (нумерация отвечает положению пластин в кристалле от начала кристаллизации) [7].

При совместном легировании получается компенсированный материал теллурида кадмия р-типа проводимости. Электрические и оптические характеристики образцов, взятых с различных участков кристалла,

свидетельствуют о хорошей однородности материала, за исключением самой верхней части. В спектрах низкотемпературного поглощения (рис. 1) в области малых энергий наблюдались примесные полосы, присущие ионам ванадия и германия в различных зарядовых состояниях.

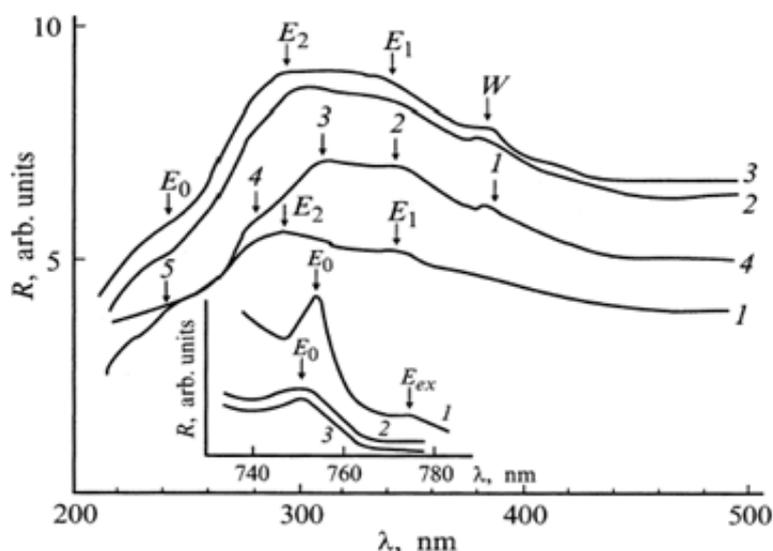


Рисунок 2 – Фундаментальное отражение в длинноволновой (вставка) и УФ области спектра образцов (1), CdTe:Cl (2,3) и Si (4). Концентрация примеси Cl: 2 – $5,0 \cdot 10^{19}$, 3 – 10^{20} см^{-3} [5].

Поглощение на 0,85 эВ приписано внутрицентровому переходу иона V^{2+} между состояниями $4T_1(F)$ и $4A_2(F)$. Полоса поглощения на 0,94 эВ соответствует фотонейтрализации уровня ионизированного донора Ge^{3+} электроном валентной зоны. Широкую полосу в интервале энергий 1,1–1,22 эВ авторы [7] приписывают результату взаимного влияния ионизированных состояний V и Ge.

Легирование CdTe элементами III и VII группы Периодической системы приводит к их размещению соответственно в узлах подрешеток Cd и Te, где они проявляют донорные свойства. Донорные уровни находятся ниже Г-минимума зоны проводимости, являются в основном мелкими (до 0,02 эВ).

В работе [9] предложена модель «не Г-центра». Модель учитывает перестройку решетки вокруг донорных примесей. Уровни примеси Cl располагаются на 0,05 эВ выше минимума зоны проводимости вне точки Г зоны Бриллюэна (ЗБ).

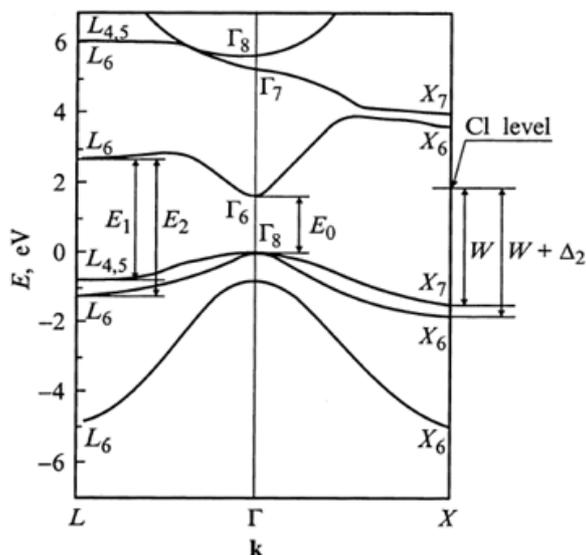


Рисунок 3 – Расположение уровней Cl в точке X зоны Бриллюэна и основные переходы, соответствующие пикам отражения в кристаллах CdTe и CdTe+Cl [9].

Для кристаллов CdTe:Cl, характерно постоянство электрофизических параметров и одинаковое спектральное распределение интенсивности низкотемпературной ФЛ по длине слитка. В спектрах фундаментального отражения чистого CdTe и CdTe+Cl (вставка на рис. 1.2) проявляется пик E_0 (переход Γ_8 - Γ_6 на рис. 1.3).

Размещение уровней хлора в точке X зоны Бриллюэна на 0,05 эВ выше Γ -минимума (рис. 1.3) позволяет объяснить природу пика W в кристаллах с $N_{Cl} > 5,0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ как переход электронов из точки X_{7v} во внецентровой минимум зоны проводимости, ассоциированный с донорной примесной зоной. Спин-орбитальное расщепление валентной зоны в точке X ($D_2=0.32$ - 0.46 эВ) приводит к «наложению» переходов $L_{4,5}$ - L_6 (E_1) и X_{6v} -внецентровому минимуму ($W+D_2$). В результате растет интенсивность пика E_1 , по сравнению с чистым CdTe возможно его смещение и некоторое

«размытие» дублетной структуры E_1 и E_2 . Таким образом, при высоком уровне легирования CdTe донорной примесью хлора зонная структура претерпевает изменения, что выражается в искажении зоны проводимости и образовании донорной примесной зоны с минимумом в точке X зоны Бриллюэна [9].

Легирование CdTe элементами IV группы приводит к образованию высокоомного материала. В работе [10] показано, что равновесные характеристики кристаллов CdTe, легированных Ge, Sn, Pb, определяются соответственно глубокими уровнями: $E_v + (0:60-0:65)$ эВ, $E_c - (0:60-0:90)$ эВ и $E_v + (0:39-0:43)$ эВ.

Компенсирующее действие Pb возрастает пропорционально содержанию примеси. Свойства кристаллов CdTe:Pb существенно отличаются от характеристик CdTe, легированного Ge и Sn, у которых при достижении определенной критической концентрации германия N_{Ge} или олова N_{Sn} свойства материала практически не зависят от N_{Ge} или N_{Sn} . Значительная часть примеси Pb пребывает в электрически неактивном состоянии, создавая, вероятно, включения. Величина и температурный ход подвижности показывают, что эти неоднородности не создают дрейфовых барьеров для протекания тока. В решетке CdTe доноры Pb_{Cd} могут взаимодействовать с собственными дефектами V_{Cd} . При значительных расстояниях между ними это приводит к понижению энергии ионизации V_{Cd} пропорционально количеству примеси. Располагаясь на соседних узлах кадмиевой подрешетки, эти дефекты создают стойкие ассоциаты [10].

Большинство мелких акцепторных примесей в CdTe недавно было идентифицировано и описано в [11].

1.3. Краевое оптическое поглощение в A2B6

Краевое поглощение полупроводников A2B6 при отсутствии возбуждения состоит, как правило, из трех участков. Например, частотная зависимость коэффициента поглощения K_n для кристаллов CdSe приведена

на рис. 1.6 [12]. В области низких частот (участок I) поглощение вызвано переходами на уровни в области хвоста плотности состояний, сформированного крупномасштабными нарушениями периодического потенциала решетки (порами, дислокациями, микротрещинами и т. д.) В данной области не обнаружено насыщения и K_n медленно растет с частотой падающего излучения [12,13,14]. В промежуточной области (участок II) наблюдается экспоненциальное увеличение K_n с энергией фотона $h\nu$ согласно правилу Урбаха. На этом участке поглощение определяется квантовыми переходами на уровни в области хвоста плотности состояний, сформированного динамическими (из-за наличия фононов в решетке) и статическими (из-за наличия точечных дефектов) мелкомасштабными нарушениями периодического потенциала кристаллической решетки.

Экспериментальные данные для CdTe по определению формы края собственного поглощения ограничены пределом пропускания [15] и подчеркивают необходимость осторожного выбора образцов высокой чистоты с химически полированными поверхностями, чтобы поглощение примесей и дефектов не маскировало край собственного поглощения. Действительно, в этой работе зависимость коэффициента поглощения от энергии фотонов росла более круто при 300 К, чем было известно до того, показывая, что непрямые процессы поглощения не могут объяснить полученный результат. Вторая работа [16] по теоретической обработке данных по оптическому поглощению, показала, что прямое экситонное поглощение с увлечением фонона должно учитываться для количественной оценки данных, зарегистрированных на этих высококачественных образцах в температурном диапазоне от 2 до 177 К. В работе также показано, что вклады $cn > 1$ (n-состояние экситона) от возбужденных состояний экситонов и процессов с участием одного либо двух фононов (для $T > 80$ К) необходимо учитывать, чтобы получить согласие с экспериментальными результатами. Дальнейший анализ показал, что сильное взаимодействие экситон-фонон в

полярных II-VI полупроводниках типа CdTe может объяснить экспоненциальную часть (правило Урбаха) края поглощения при более высоких температурах.

Ширина запрещенной зоны E_g кристалла CdTe при температуре жидкого гелия достаточно хорошо установлена и составляет 1,606 эВ [17]. Однако при комнатной температуре широкий диапазон E_g получен множеством методов и варьируется от 1.49 до 1.529 эВ. Отдельные исследования, выполненные на высококачественных образцах CdTe, дают более точное значение запрещенной зоны - 1,513 эВ [18]. Легирование CdTe элементами III и VII группы Периодической системы приводит к их размещению соответственно в узлах подрешеток Cd и Te, где они проявляют донорные свойства. Донорные уровни находятся в основном ниже минимума зоны проводимости (ЗП), являются в основном мелкими (до 0,02 эВ) и рассчитываются при помощи водородоподобной модели.

Наиболее важным результатом исследования краевого поглощения и отражения света в CdTe является определение энергетического спектра экситонов и влияние на него различных факторов: температуры, давления и примесей. Оптические свойства экситонов в CdTe впервые исследовались в низкотемпературных спектрах отражения, в которых было обнаружено, что началу непрерывного поглощения предшествовала узкая одиночная полоса поглощения [19]. Авторами данная полоса связана с образованием экситона в основном состоянии.

Для нелегированных A_2B_6 коэффициент поглощения излучения с энергией фотонов меньших E_g (рис.1.6, участок II) экспоненциально зависит от энергии фотонов и описывается правилом Урбаха[20]:

$$K = K_0 e^{-\frac{\sigma(\hbar\omega_0 - \hbar\omega)}{\kappa T}} \quad (1.2),$$

где K_0 , $\hbar\omega_0$ - постоянные, характеризующие кристалл; σ - параметр, характеризующий наклон зависимости $\ln K$ от $\hbar\omega$. Эти зависимости при разных уровнях возбуждения [21] имеют различный наклон. Из чего следует, что изменение уровня возбуждения приводит к изменению края собственного поглощения. Правило Урбаха позволяет определить зависимость $K(\hbar\omega)$ для идеального (т. е. без дефектов) невозбужденного кристалла. Область применения правила Урбаха ограничивается в коротковолновом диапазоне длин волн коэффициентом поглощения, который не должен превышать величину порядка 10^4 см^{-1} .

Установлено, что при низких температурах правило Урбаха нарушается [20]. Для группы A_2V_6 параметр σ имеет вид:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{2kT}{\hbar\omega_\phi} \text{th} \frac{\hbar\omega_\phi}{2kT} \quad (1.3),$$

где: $\hbar\omega_\phi$ – средняя энергия фононов, участвующих в формировании края поглощения; σ – зависящий от температуры параметр, связанный обратно пропорциональной зависимостью с константой экситон-фононного взаимодействия [20].

Параметры, характеризующие краевое поглощение кристаллов CdSe, CdS и CdTe в диапазоне температур 77 - 300 К, приведены в таблице 1.4 [22].

В области высоких частот (участок III) реализуются зона - зонные переходы, для которых связь K_H с $h\nu$ (рис. 1.6, кривая 3) имеет вид:

$$K_H = A \cdot (h\nu - E_{g0})^{1/2} \quad (1.4),$$

где: A - константа $h\nu$ - энергия фотона; E_{g0} - ширина запрещенной зоны при низких интенсивностях излучения.

Для любой температуры с ростом интенсивности возбуждения наблюдался скачкообразный сдвиг края поглощения в высокоэнергетическую область и спад коэффициента поглощения [12].

Таблица 2 – Параметры, характеризующие краевое поглощение в диапазоне температур 77 - 300 К [22]

Соединение	$\hbar\omega_0$, эВ	σ_0	K_0 , см ⁻¹	$\hbar\omega_\phi$, мэВ
CdS	2,544	2,45	$1,5 \cdot 10^9$	7,6
CdSe	1,875	2,65	$8 \cdot 10^9$	21
CdTe	1,70	3,60	10^{12}	50,0

По формуле 1.2 и данным о CdTe рассчитан спектр поглощения CdTe при 300 К.

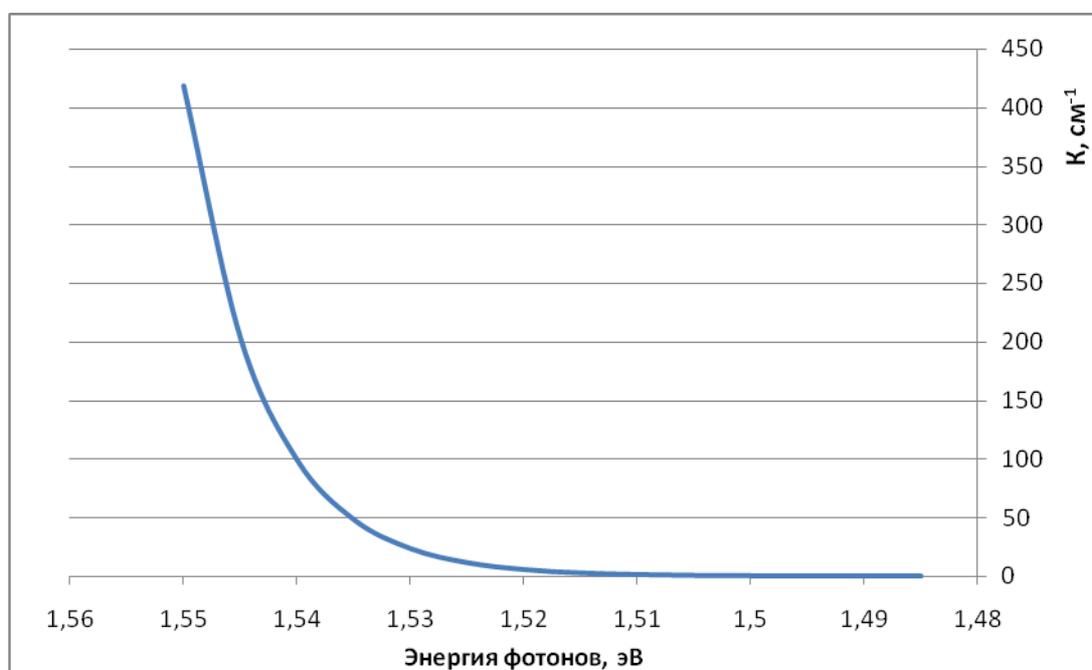


Рисунок 4 – Спектр поглощения CdTe при 300 К (расчет)

1.4 Люминесценция монокристаллов A2B6

В работе [23] дан обзор формы полос люминесценции для разнообразных процессов рекомбинации. При температуре жидкого гелия энергии излучения и рекомбинации близки друг к другу по значению для большинства излучательных процессов. Выше 80 К несоответствие между энергиями пиков излучающей эмиссии и рекомбинации в CdTe может быть несколько meV или больше. ФЛ - как результат прямой зона-зонной (e,h)

рекомбинации должна содержать пик излучения, смещенный в более высокие энергии, чем дает запрещенная зона E_g , поэтому, сравнение между измерениями поглощения или модулированного коэффициента отражения с ФЛ- измерениями должно быть сделано тщательно. Энергия фотона, при которой наблюдается максимум амплитуды (e, h)- люминесценции, соответствует $E_g + kT/2$ (k - константа Больцмана) в предположении сохранения волнового вектора. Если сохранение волнового вектора игнорируется, то зона-зонная рекомбинация дает пики ФЛ эмиссии при энергиях фотонов, которые могут быть на $2kT$ выше энергии запрещенной зоны.

Исследование ФЛ CdTe при комнатной температуре дает значения энергии запрещенной зоны $E_g = 1.513$ эВ и энергии связи свободного экситона $\epsilon_{св} = 10$ мэВ с точностью до 1 мэВ. Сильная связь экситон-оптический фонон в CdTe играет большую роль при определении формы спектров поглощения; однако, детальное рассмотрение этой связи при определении формы спектров излучения при высоких температурах (300 К) не сделано. Экситонные вклады (основное состояние и первое возбужденное состояние) должны давать эмиссию с энергией пиков ниже энергии запрещенной зоны. Индивидуальные вклады в эти полосы рекомбинационной люминесценции даются по выражениям в порядке уменьшения энергии излучения:

Зона-зонная (e, h),

$$I_{PL} = A \cdot (h\nu - E_g)^{1/2} \cdot \exp [-(h\nu - E_g) / kT] \quad (1a)$$

X, n = 2 возбужденное состояние

$$I_{PL} = B \cdot \exp [-(h\nu - E_{x2})^2 / 2\sigma^2] \quad (1б)$$

X, n = 1 основное состояние

$$I_{PL} = \exp [-(h\nu - E_{x1}) / kT \cdot \exp [-(h\nu - E_{x1})^2 / 2\sigma^2]] \quad (1в)$$

где: $h\nu$ - испускаемая энергия фотона; E_g - запрещенная зона CdTe; E_{x1} и E_{x2} - энергии рекомбинации свободных экситонов из основного ($n = 1$) и первого возбужденного ($n = 2$) состояний; σ - температурно-зависимое стандартное отклонение формы экситонной линии от гауссового распределения; k - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура (К); A , B и C - константы. Используя значение $E_g = 1.513$ эВ и энергию связи свободного экситона 10 мэВ для CdTe, энергии экситонных рекомбинаций равны: $E_{x1} = 1.503$ эВ и $E_{x2} = 1.5105$ эВ. Однако, пик энергии излучения для $n = 1$ основного состояния X_1 полосы излучения является смещенным в низкоэнергетическую область относительно действительной энергии рекомбинации. При $T = 300$ К это понижение энергии пика излучения, согласно выражения (1в), ожидается около $1/2\sigma$. Как отмечено выше, зона-зонная (e,h) - рекомбинация (см. выражение (1а)) дает полосу эмиссии с максимумом по энергии при значении на $\sim 1/2 kT$ выше E_g .

При низких температурах в ФЛ спектрах объемного CdTe наблюдается много фононных повторов в эмиссии свободного экситона. Форма линии описывается вкладами, обусловленными X-1LO и X-2LO процессами рекомбинации:

X - 1LO

$$I_{PL} = D \cdot (h\nu - E_{x1LO})^{1.5} \cdot \exp [-(h\nu - E_{x1LO}) / k T] \quad (2a)$$

X - 2LO

$$I_{PL} = E \cdot (h\nu - E_{x2LO})^{1/2} \cdot \exp [-(h\nu - E_{x2LO}) / kT]. \quad (2b)$$

E_{x1LO} - энергия излучения, соответствующая рекомбинации свободного экситона, с рождением одного продольного оптического (LO) фонона. E_{x2LO} - энергия, связанная с рекомбинацией свободного экситона, с рождением двух продольных оптических (LO) фононов. Энергия LO-фонона в CdTe - 21.3 мэВ. D и E - константы, полученные при подгонке кривых [23].

При использовании выражений (1) и (2) воспроизведена общая форма линий ФЛ *n*-типа CdTe:I и объемного CdTe образцов как при низких, так и высоких плотностях возбуждения. Результаты представлены на рис. 6.

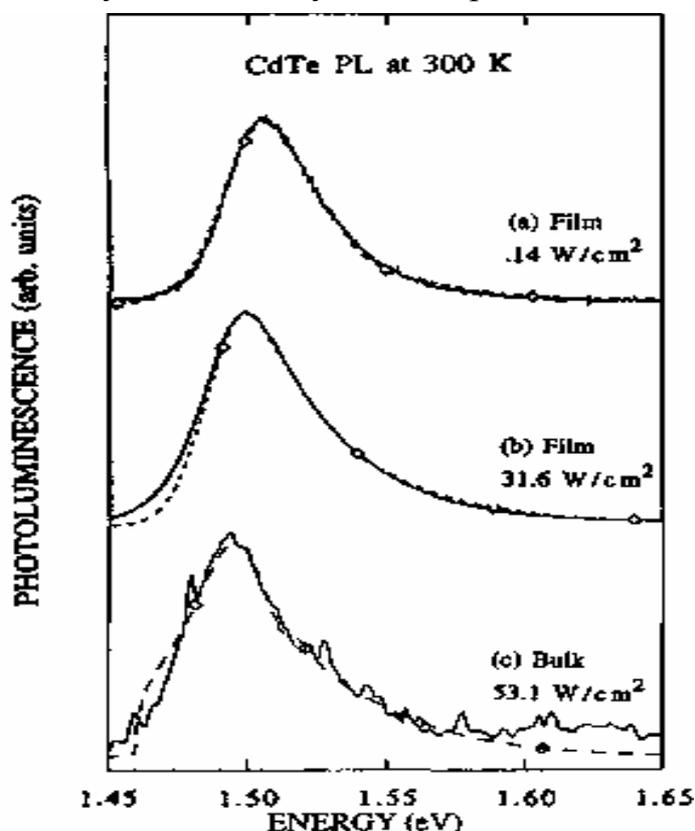


Рисунок 5 - ФЛ спектры и анализ формы линии при 300 К для: (a) CdTe:I пленки при низкой мощности возбуждения 0.140 W/cm^2 ; (b) CdTe:I пленки при высокой мощности возбуждении 31.6 mW/cm^2 ; (c) объемного с высоким удельным сопротивлением CdTe при мощном возбуждении 53.1 W/cm^2 . Твердые линии представляют ФЛ данные, а пунктирные - подгонка кривых. Сильный экситонный вклад используется, чтобы получить подгоночную кривую. Энергии пиков эмиссии - все лежат ниже E_g для CdTe. [25].

При использовании выражений (1) и (2) воспроизведена общая форма линий ФЛ *n*-типа CdTe:I и объемного CdTe образцов как при низких, так и высоких плотностях возбуждения. Результаты представлены на рис. 6.

Наилучшая подгонка получена при использовании $\sigma = 13 \text{ meV}$ как для *n*-типа

эпислоев, так и объемных образцов во всем диапазоне использованных плотностей возбуждения. Экспериментальные данные представлены сплошными кривыми, а кривые, полученные подгонкой из анализа формы линии, - пунктирными линиями.

Исследованию механизмов излучательной рекомбинации неравновесных электронов и дырок в прямозонных полупроводниках при высоких уровнях электронного и лазерного возбуждения посвящено много работ, результаты которых отражены в ряде обзоров и монографий [24,25,26]. Ниже изложена основная известная из литературы информация об излучательной рекомбинации неравновесных электронов и дырок при изменении уровня возбуждения прямозонных полупроводников. При низких уровнях возбуждения рекомбинация неравновесных электронов и дырок в полупроводниках происходит на центрах, образованных примесями, собственными дефектами кристаллической решетки, поверхностными состояниями. Именно это обстоятельство определяло значительное разнообразие в результатах исследования фото- и электролюминесценции, фотопроводимости, генерации излучения, радиационном дефектообразовании и т.д. Общие закономерности донорно-акцепторной рекомбинации проанализированы в [25].

В таблице 3 представлены энергетические параметры теллурида кадмия.

Таблица 3 - Энергетические параметры теллурида кадмия[25]

Энергии фононов, мэВ				Показатель преломления (n)	$(E_g/\Delta T) \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$	m_n^*	m_p^*	Литература
LO	TO	LA	TA					
21,3	17,4	13,0	8,0	2,67-2,75	-4,1	0,11	0,35	[27]

С понижением температуры, когда термический выброс с мелких примесных уровней маловероятен, определяющей становится межпримесная рекомбинация, обусловленная переходами электронов, захваченных мелкими донорами (Д – междоузельный Cd, вакансии V_{Te}) на один из нейтральных соседних акцепторов (А).

При низких уровнях возбуждения рекомбинация неравновесных электронов и дырок в полупроводниках происходит на центрах, образованных примесями, собственными дефектами кристаллической решетки, поверхностными состояниями. При фиксированной температуре увеличение уровня возбуждения сопровождается более быстрым насыщением излучения в длинноволновой области спектра, т.к. далекие ДА-пары насыщаются быстрее из-за меньшей вероятности соответствующего межцентрового перехода.

В случае невысоких уровней возбуждения становится существенным термическое перераспределение электронов через зону от "долгоживущих" конфигураций к "короткоживущим". В результате увеличение температуры приводит к спаду интенсивности на длинноволновом краю и некоторому росту коротковолновой части спектра.

Увеличение плотности возбуждения полупроводников сопровождается сменой механизмов рекомбинации: эффективность рекомбинации на дефектах уменьшается и начинает доминировать собственная излучательная рекомбинация. Как и в случае низких уровней возбуждения, в спектрах люминесценции кроме линий, обусловленных излучательной аннигиляцией свободных и локализованных на дефектах экситонов, обычно наблюдаются дополнительные группы полос, интенсивность которых определяется технологией роста и термических обработок кристаллов в парах собственных компонентов и в вакууме. Природа этих групп полос связана с исходными примесными и собственными дефектами, ассоциированными, в кластерные структуры различного состава [15,29].

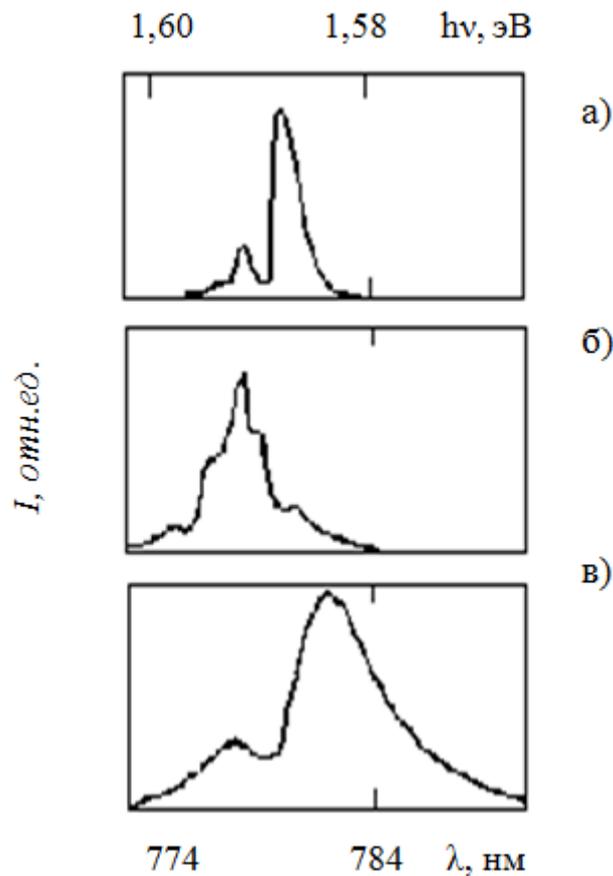


Рисунок 6 – Спектры ФЛ кристалла CdTe с составом близким к стехиометрическому (n – тип, $n = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при $T=77,3 \text{ К}$) при разных температурах [41]: а- 4,2; б- 20,4; в- 77,3 К [27].

При высоких уровнях возбуждения концентрация экситонов достигает $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и выше. При высоких областях энергии возбуждения начинает сказываться взаимодействие электронов и дырок, образующих экситон, с другими неравновесными носителями и экситонами, что приводит к экранированию кулоновского взаимодействия в экситоне; экситонный газ становится неидеальным [30].

При увеличении уровня возбуждения максимум спектра спонтанного излучения смещается в длинноволновую область. Такое смещение может быть обусловлено тем, что дырки, захваченные на уровень примеси, рекомбинируют с электронами, находящимися в ямах потенциального рельефа, создаваемого неоднородным распределением заряженных примесей [31].

С ростом интенсивности возбуждающего излучения величина запрещенной зоны E_g вначале увеличивается, а затем рост замедляется вследствие процессов вынужденной рекомбинации.

С ростом плотности возбуждения и температуры в кристаллах CdTe наблюдается появление дополнительных полос, которые связаны с локализацией экситонов на крупномасштабных дефектах; увеличение интенсивности полос ФЛ, обусловленное излучением экситонов на донорах [32].

Увеличение плотности возбуждения CdTe до $50-80 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-2}$ сопровождается ростом коэффициента отражения до 9-10 % по сравнению с исходной величиной. Данный факт обусловлен испарением легколетучего компонента соединения.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1 Импульсный оптический спектрометр

В качестве основного метода исследований в настоящей работе использован метод импульсной оптической спектроскопии с наносекундным разрешением [5,8,9] который позволяет изучать кинетику создания и эволюции центров люминесценции и поглощения под действием коротких импульсов возбуждающей радиации. Блок-схема установки представлена на рисунке 2.1 и содержит три функциональные системы: источник радиации, оптический спектрометр и систему синхронизации. Источником радиации служит ускоритель электронов конструкции Г.А. Месяца, Б.М. Ковальчука [10,11]. Генератор импульсных напряжений (ГИН) ускорителя собран по схеме Аркадьева-Маркса. Он состоит из четырнадцати ступеней, каждая из которых в качестве емкостных накопителей содержит один конденсатор типа К15-10[5].

Питание емкостного накопителя осуществляется от высоковольтного источника, включающего генератор импульсов тока, импульсный высокочастотный трансформатор, нагруженный на утроитель напряжения, схему сравнения и схему запуска. При достижении заданного напряжения срабатывает схема сравнения и синхроимпульс через тиристорную схему и импульсный трансформатор поступает на управляющую сетку тиратрона, на анод которого подается высокое напряжение. Запуск ускорителя происходит при открытии тиратрона и закорачивании на землю сетки трехэлектродного разрядника. Измерение спектров в режиме фотоэлектрической регистрации требует многократного облучения образцов и, как следствие, стабильности параметров ИЭП. Обычно, при зарядке ускорителя, аналоговый сигнал с высоковольтного выпрямителя через делитель подается на ключевую схему сравнения на транзисторах, которая задает порог срабатывания. Изменение

разрядника, оптического кабеля и ФЭУ-79. Источниками зондирующего света при регистрации короткоживущего поглощения служили импульсные лампы (ИФП-600, -800), а долгоживущего - галогенные (КГМ-100, -250) и газоразрядные (ДДС-30) лампы с блоками стабилизированного питания. Использован набор фотоумножителей (ФЭУ-97, -106), позволяющий перекрыть область длин волн (200-1100) нм, и осциллограф С8-12, -13. При облучении ИЭП ФЦЗМ интенсивно люминесцируют [33,34]. Интенсивность вспышек люминесценции сравнима с пиковой интенсивностью трубчатых импульсных ламп, используемых в качестве источников зондирующего света при измерении спектров поглощения. С целью исключения влияния искажений, вносимых вспышками люминесценции, обычно используется способ концентрации световой энергии на образце, а фотоприемник удаляется на большое расстояние. Однако это не всегда приносит результат. Используемые оптические схемы измерений приведены на рисунке 2.2. Интенсивность люминесценции убывает пропорционально квадрату расстояния от образца. Установка круглой диафрагмы D_1 малого сечения (4-5 мм²) в плоскости действительного изображения источника зондирующего света позволяет ослабить искажения, вносимые вспышками люминесценции. При значительном удалении диафрагмы D_1 от образца через нее проходит параллельный пучок люминесценции. Дополнительное рассеяние люминесценции можно осуществить путем установки короткофокусной линзы L_4 и диафрагмы L_3 . Ход лучей люминесценции и зондирующего света показан пунктирными и сплошными линиями на рисунке 2.2,б.

Основные параметры установки импульсной спектроскопии.

Максимальная энергия электронов	0.28 МэВ
Длительность импульса (тока) на полувывоте	12 нс
Временное разрешение	7 нс
Частота следования импульсов	($3 \cdot 10^{-2}$ - 10^{-3}) Гц

Спектральный диапазон измерений		(200-1100) нм
Интервал температур		(80-700) К
Диапазон значений флюенса энергии ИЭП		(2-500) мДж/см ²
Обратная линейная дисперсия монохроматора		
МДР-23 в области	(200-600) нм	1.3 нм/мм
	(600-1200) нм	2.6 нм/мм

2.2 Схемы измерения импульсной катодолюминесценции

Для изучения спектров импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) использовалась схема, представленная на рисунке 2.2.

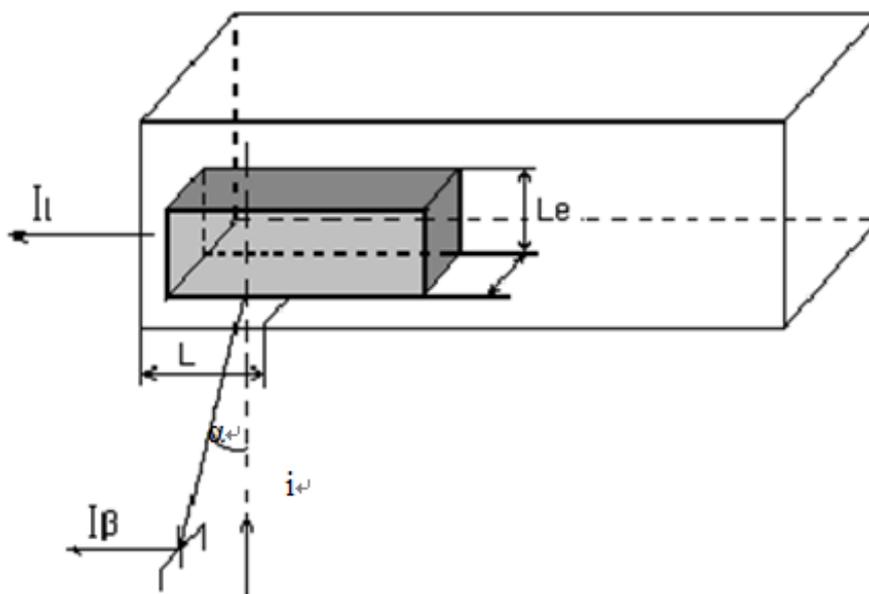


Рисунок 2.2 – Схема возбуждения и регистрации ИКЛ.

Облучение проводилось при возбуждении ИЭП в направлении i . Регистрация импульсной катодолюминесценции производилась с грани образца, в направлении, перпендикулярном направлению падения ИЭП (I_{\perp}) и под острым углом к облучаемой поверхности (I_{β}). Изменение уровня возбуждения кристалла осуществлялось изменением плотности тока ИЭП путем диафрагмирования. Облучение проводилось при температуре 300К.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Не размещается в соответствие с требованиями

(ПРИКАЗ № 43/од от 22.04.2016)

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки.

В данном разделе мы попытаемся проанализировать разработанную программу математического моделирования нагрева высокоомных материалов во время воздействия сильнофокусированного электронного пучка с позиции конкурентно способности, технологичности, ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

4.1 Планирование этапов и выполнение работ по НИОКР

4.1.1 Планирование этапов работ

Научные исследования выполнила группа, в состав которой входили научный руководитель и студент.

Выполнение и планирования работы по теме "Расчет изменения температуры материала во время воздействия импульсного электронного пучка" было разделено на следующие этапы, как показано на таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Исполнители
Выдача задания	1	Составление и утверждение задания	науч. рук.
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	науч. рук., студ.
	3	Выбор направления исследований	науч. рук.
	4	Календарное планирование работ	науч. рук.

		по теме	
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	студ.
	6	Разработка программного продукта позволяющего производить расчет нагрева высокоомных материалов во время воздействия импульсного электронного пучка при варьировании его параметров в широких пределах	студ.
Обобщение и оценка результатов	7	Обобщение результатов расчета ,проведен экономический анализ работ, определены мероприятия по технике безопасности	студ.
	8	Регистрация программы расчета изменения температуры материала за время воздействия импульсного электронного пучка	науч. рук., студ.
	9	Научное обоснование результатов и выводы	науч. рук., студ.
Оформление отчета по НИР	10	Разработка плана по оформлению работы	науч. рук., студ.
	11	Оформление отчета по работе	студ.
Защита отчета	12	Защита ВКР	студ.

4.1.2 Определение трудоемкости выполнения работы

Важнейшей составляющей процесса формирования научной работы является определение трудоемкости мероприятий по выполнению работ.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$, используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;
 $t_{\min i}$, – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой

работы, чел.-дн.; $t_{\max i}$, – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i},$$

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

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

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

4.1.3 Техническая готовность темы

Определение технической готовности темы позволяет дипломнику точно знать, на каком уровне выполнения находится определенный этап или работа. Показатель технической готовности темы характеризует отношение продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что период дипломного проектирования составляет примерно 6 месяцев, включая производственную практику, и дипломник выступает в качестве основного исполнителя.

Для начала следует определить удельное значение каждой работы в общей продолжительности работ:

$$У_i = \frac{T_{pi}}{T_p} \times 100\%$$

где $У_i$ – удельное значение каждой работы в %;

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

T_p – суммарная продолжительность темы, раб.дн.

Тогда техническую готовность темы $Г_1$, можно рассчитать по формуле:

$$\Gamma_1 = \frac{\sum T_{pi}}{T_p} \times 100\%$$

где $\sum T_{pi}$ – нарастающая продолжительность на момент выполнения i -той работы.

Результаты расчетов удельной работы и технической готовности сводятся в табл. 3.

4.1.4 Разработка календарного плана работ

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

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

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}$$

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

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

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

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

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

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

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

Временные показатели проведения данного научного исследования представлены в таблице 4.2 (научный руководитель (р), студент(с)):

Таблица 4.2 - Временные показатели проведения научного исследования

Название	Трудоёмкость работ	Исполни	T_{pi} , дни	T_{ki} , дни
----------	--------------------	---------	----------------	----------------

работы	$t_{\min i}$, чел- дни		$t_{\max i}$, чел-дни		$t_{\text{ожі}}$, чел-дни		тели					
	р	с	р	с	р	с	р	с	р	с	р	с
Составление и утверждение задания	7	-	15	-	10	-	+	-	10	-	12	-
Подбор и изучение материалов по теме	20	20	70	70	61	61	+	+	61	61	75	75
Выбор направления исследований	6	-	15	-	10	-	+	-	10	-	12	-
Календарное планирование работ по теме	-	7	-	15	-	10	-	+	-	10	-	12
Проведение теоретических расчетов и обоснований	20	-	50	-	40	-	+	-	-	40	-	48
Разработка программного продукта	-	25	-	55	-	43	-	+	-	43	-	54
Обобщение результатов расчета ,проведен экономический анализ работ, определены мероприятия по технике безопасности	-	6	-	10	-	8	-	+	-	8	-	10
Регистрация программы расчета	-	11	-	23	-	16	-	+	-	16	-	20

изменения температуры материала за время воздействия импульсного электронного пучка													
Научное обоснование результатов и выводы	4	4	14	14	10	10	+	+	5	5	6	6	
Разработка плана по оформлению работы	1	1	5	5	3	3	+	+	1,5	1,5	2	2	
Оформление отчета по работе	-	15	-	30	-	15	-	+	-	15	-	18	
Итого	58	89	169	222	134	166			87,5	119,5	107	245	

4.1.5 Календарный план-график в виде диаграммы Ганта

№	Вид работ	И с п - л и	Т _к , кал, дн.	Продолжительность выполнения работ																																					
				сен.				окт.				Ноя.				дек.				янв.				фев.				март				апр.				май				июнь	
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2				
1	Составление и утверждение задания	Р	12		■																																				
2	Подбор и изучение материалов по теме	С + Р	75 75																																						
3	Выбор направления исследований	Р	20 0																																						
4	Календарное планирование работ по теме	С	12																																						
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	С	48																																						
6	Разработка программного продукта	С	55																																						

Таблица 4.3 - Календарный план-график в виде диаграммы

4.2 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.2.1. Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i},$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, занесены в таблицу 4.4

Таблица 4.4 - Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы, (З _м), руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Бумага	шт.	5	5	5	160	160	160	800	800	800
Итого								800	800	800

4.2.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НТИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$Z_{об} = (Ц \cdot F_{\phi}) / (F_{н} \cdot F_{сс}),$$

где Ц – цена оборудования, р.; F_н – номинальный фонд времени (рабочее время в году), ч; F_{сс} – срок службы оборудования, год; F_ф – фактическое время занятости оборудования в НИР, ч. F_н = 365 – 104 – 11 = 250 дней = 2000 ч.

4.2.3 Основная заработная плата

Исходными нормативами заработной платы данных категорий работающих является оклад, определяющий уровень месячной заработной платы в зависимости от объема и ответственности работ.

Таблица 4.5 - Расчет основной заработной платы

№	Наименование этапов			Исполнители по категориям			Трудоемкость, чел.-дн.			Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.			Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Ис.п.1	Ис.п.2	Ис.п.3	Ис.п.1	Ис.п.2	Ис.п.3	Ис.п.1	Ис.п.2	Ис.п.3	Ис.п.1	Ис.п.2	Ис.п.3
1	разработка	разработка оптимизир	разработка	Р	Р	Р	10	20	10	1,8	1,8	1,8	18	36	18

	упро- щено й физ. модел и	ованной физ. модели	упро- щено й физ. модели												
2	разви- ботка алгор итма без отлад ки	разработка алгоритма с отладкой	разви- ботка алгори тма с отладк ой	С	С	С	15	30	30	0,6	0,6	0,6	9	18	18
3	разви- ботка кода	разработка оптимизир ованного кода	разви- ботка кода	С	С	С	30	60	30	0,6	0,6	0,6	18	36	18
4	разви- ботка текст ового интер фейса	разработка графическ ого интерфейс а	разви- ботка графич еского интерф ейса интерф ейса	С	С	С	15	30	30	0,6	0,6	0,6	9	18	18
Итого:													54	108	72

Основная заработная плата рассчитывается по формуле:

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

где Z – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 4.3);

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

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

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

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

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

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно- технического персонала, раб. дн. (табл. 4.6).

Таблица 4.6 - Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени, дни	Руководитель	Студент
Календарное число дней в году	365	365
Количество нерабочих дней		
Выходные	104	104
Праздники (фактически по каждому году)	13	13
Планируемые потери отпуска	48	48
Действительный годовой фонд	200	200

Месячный должностной оклад работника:

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

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

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

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

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

Таблица 4.7 - Расчет основной заработной платы

Исполнители	Разряд	k_t	Z_{tc} , руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	Профессор	1	50000	0,3	0,2	1,3	97500	5070	87,5	443625
Студент		1	10000	0,3	0,2	1,3	19500	1014	119,5	121173
Итого $Z_{осн}$										564798

4.2.4 Дополнительная заработная плата

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Подставив в формулу известные численные значения, получим:

4.2.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 30%

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

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

Таблица 4.8 - Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.			Дополнительная заработная плата, руб.		
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Руководитель	443625	887250	443625	53235	106470	53235
Студент	121173	242346	118760	14540	29080	21810
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	30					
Итого						
Исполнение 1	822344					
Исполнение 2	1644688					
Исполнение 3	827359					

4.2.6 Накладные расходы

Накладные расходы – расходы на организацию, управление и обслуживание процесса производства товара, оказания услуги; носят

комплексный характер, т.е. включают различные экономические элементы затрат.

Накладные расходы составляют 50% от суммы основной, дополнительной заработной платы и от страховых взносов, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}},$$

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

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

4.2.7 Смета затрат на разработку

Все вышеперечисленные затраты включаются в смету, которая приведена в таблице 4.9.

Таблица 4.11 -Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечани е
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
1. Материальные затраты НИИ	800	800	800	Пункт 4.3.4.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных работ	-	-	-	Пункт 4.3.4.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	111540	223080	141960	Пункт 4.3.4.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	13384	26768	16638	Пункт 4.3.4.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	33854	60708	50781	Пункт 4.3.4.5
6. Затраты на научные и производственные командировки	-	-	-	нет затрат

7. Контрагентские расходы	-	-	-	нет затрат
8. Накладные расходы	26704	52108	34800	Пункт 4.3.4.6
9. Бюджет затрат НИИ	186282	363464	244979	Сумма ст. 1-8

4.3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

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).

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

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

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Таблица 4.10 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	2	5	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	2	5	4
3. Помехоустойчивость	0,15	3	5	4
4. Энергосбережение	0,20	5	3	3
5. Надежность	0,25	5	3	3
6. Материалоемкость	0,15	4	4	4
ИТОГО	1	3,8	3,95	3,55

Таблица 4.11 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,5	1	0,67
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	1	0,6	0,6
3	Интегральный показатель эффективности	7,6	3,95	5,29
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,92	1	1,34

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволило определить сравнительную эффективность проекта, по таблице 4.13 наиболее целесообразный вариант исполнения 1.

5 Социальная ответственность

Не размещается в соответствии с требованиями

(ПРИКАЗ № 43/од от 22.04.2016)

Заключение

Не размещается в соответствии с требованиями
(ПРИКАЗ № 43/од от 22.04.2016)

Список литературы:

Не размещается в соответствие с требованиями

(ПРИКАЗ № 43/од от 22.04.2016)