

Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки 12.03.02 «Оптотехника»  
 Отделение Материаловедения

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Просветляющие покрытия на основе CVD алмаза для германиевой ИК-оптики

УДК 666.1.031.153-032.81:535:546.289

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B51	Хохлова Анна Алексеевна		

Руководитель ВКР

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

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник ИШФВП	Зенкин Сергей Петрович	Ph.D.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент отделения социально гуманитарных наук	Николаенко Валентин Сергеевич			

По разделу «Социальная ответственность»

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

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i><b>Профессиональные компетенции</b></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><b>Универсальные компетенции</b></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 науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки 12.03.02 «Оптотехника»  
 Отделение Материаловедения

**УТВЕРЖДАЮ:**  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ С.А. Степанов  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
4В51	Хохловой Анне Алексеевной

Тема работы:

Просветляющие покрытия на основе CVD алмаза для германиевой ИК-оптики	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Литература по теме ВКР. Объект исследования – тонкоплёночное просветляющее покрытие для Ge оптики на основе CVD алмаза.
---------------------------------	---

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Обзор литературы: методики расчета просветляющих покрытий ИК диапазона; оптические свойства CVD алмаза и применимость его в качестве просветляющего материала для германия; CVD метод нанесения поликристаллического алмаза на германий. Анализ полученных результатов.
<b>Перечень графического материала</b>	Структура покрытий, осажденных на германий. Рамановские спектры покрытия из CVD алмаза и алмазоподобного покрытия. Спектры пропускания Ge окна без просветляющего покрытия и с нанесенным просветляющим слоем CVD алмаза и с просветляющим алмазоподобным слоем.

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

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

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

--

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник ИШФВП	Зенкин Сергей Петрович	Ph.D.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В51	Хохлова Анна Алексеевна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4B51	Хохловой Анне Алексеевной

Школа	Новых производственных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	12.03.02 «Оптотехника»

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	- стоимость расходных материалов; - норматив заработной платы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- коэффициент для расчета заработной платы.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	- отчисления во внебюджетные фонды; - расчет дополнительной заработной платы.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ конкурентных технических решений. Потенциальные потребители исследования. Выполнение SWOT-анализа проекта.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Определение трудоемкости выполнения работ. Разработка графика проведения научного исследования. Расчет материальных затрат НИ. Основная заработная плата исполнителей темы. Отчисления на социальные нужды. Формирование бюджета затрат научно-технического исследования.

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений
2. Календарный план-график проведения НИ
3. Расчет бюджета затрат НИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент отделения социально гуманитарных наук	Николаенко Валентин Сергеевич			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B51	Хохлова Анна Алексеевна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4B51	Хохловой Анне Алексеевной

Школа	Новых производственных технологий	Отделение (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	12.03.02 «Оптотехника»

Тема ВКР:

Просветляющие покрытия на основе CVD алмаза для германиевой ИК-оптики	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><i>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</i></p>	<p><i>Целью настоящей работы является разработка просветляющего покрытия на основе CVD алмаза для германиевой ИК-оптики.</i></p> <p><i>Данные покрытия могут применяться в различных промышленных и военных предприятиях, в отрасли пожарной безопасности и в космической и др.</i></p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>- ТК РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)</p> <p>- ГОСТ 12.2.032-78</p>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>– механические опасности (источники, средства защиты);</p> <p>– термические опасности (источники, средства защиты);</p> <p>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность:</b></p>	<p>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</p> <p>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</p> <p>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</p> <p>– наличие отходов.</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<p>– выбор наиболее типичной ЧС;</p>

	<i>– разработать профилактические меры по устойчивой работе производства.</i>
--	---

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B51	Хохлова Анна Алексеевна		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 73 с., 18 рис., 16 табл., 28 источников.

Ключевые слова: химическое газофазное осаждение (CVD), CVD-алмаз, покрытие, германий, инфракрасная оптика, просветляющие покрытия.

Объектом исследования являются просветляющие покрытия из CVD-алмаза, полученные методом химического газофазного осаждения с горячей нитью, для инфракрасной оптики.

Цель работы – получить просветляющее покрытие из CVD-алмаза для просветления германия, который применяется в инфракрасной оптике и сравнить его пропускание с алмазоподобным покрытием.

В процессе исследования проводилось напыление алмазных просветляющих покрытий на германий, затем происходил анализ покрытий с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния. Затем измерялся спектр пропускания полученных покрытий.

В результате исследования были получены образцы с алмазным (CVD) и алмазоподобным (DLC) просветляющими покрытиями. Были исследованы структуры покрытий и измерен спектр их пропускания. Спектр пропускания CVD-алмазного покрытия сопоставим со спектром пропускания алмазоподобного покрытия в диапазоне 5 – 15 мкм. В диапазоне 15 – 25 мкм CVD-алмазное покрытие имеет на 10% больше пропускание, чем германий, но меньшее пропускание, чем алмазоподобное. Это можно объяснить кристалльной структурой CVD-алмазной пленки, за счет которой у данной пленки выше шероховатость.

Область применения: германиевая инфракрасная оптика, тепловизоры, военная промышленность, пожарная сигнализация.

В будущем планируется отработка методов напыления на коммерческих образцах. Полировка алмазного покрытия и сравнение пропускания образцов с полированным и не полированным алмазным покрытием.

## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

CVD – химическое осаждение из паровой фазы;

PVD – физическое осаждение из газовой фазы;

DLC – алмазоподобный углерод;

HWCVD – химическое осаждение из паровой фазы в реакторе с горячей нитью;

Cat-CVD – каталитическое химическое осаждение из паровой фазы;

ИК – инфракрасный;

SEM – сканирующий электронный микроскоп.

Оглавление	
Введение.....	11
1. Литературный обзор.....	12
1.1. Исследование методов и параметров осаждения CVD-алмаза на германий	12
1.2. Просветляющие покрытия.....	19
2. Объект и методы исследования.....	20
2.1. Описание экспериментального оборудования.....	20
2.1.1. Химическое осаждение из газовой фазы (CVD).....	20
2.1.2. Физическое осаждение из газовой фазы (PVD).....	21
2.1.3. Очистка образцов.....	22
2.2. Методы исследования.....	23
2.2.1. Толщина покрытий.....	23
2.2.2. Рамановская спектроскопия.....	24
2.2.3. Измерение ИК-пропускания покрытий.....	25
2.2.4. Электронная микроскопия.....	25
3. Расчеты.....	27
4. Результаты проведенного исследования.....	32
4.1. Толщина покрытий.....	33
4.2. Изображения, полученные с помощью электронного микроскопа.....	34
4.3. Рамановские спектры.....	35
4.4. ИК-пропускание образцов.....	37
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	38
6. Социальная ответственность.....	56
Заключение.....	70
Список литературы.....	71

## **Введение**

Большое число новых приборов и методов, применяющиеся в современном мире относятся к классу инфракрасных. Инфракрасная оптика – это оптика, работающая в диапазоне длин волн 0,7 – 1000 мкм. Инфракрасная оптика активно исследуется благодаря применению в военном деле для создания управляемых снарядов, систем управления огнем и противовоздушной обороны, приборов тепловой разведки и многих других приборов. А также применению в промышленности. Например, для анализа природы в заводских лабораториях и различных органических веществ в жидкостях и газах. Инфракрасный приемник может сигнализировать о возникновении огня на каком-либо контролируемом объекте [1].

Германий является одним из самых популярных материалов для инфракрасной оптики, так как он прозрачен в диапазоне длин волн 1 мкм до 23 мкм и имеет высокий показатель преломления около 4,1. Но из-за такого высокого показателя преломления необходимо использовать просветляющие покрытия.

Алмаз обладает множеством ценных свойств, например, высокая прочность и теплопроводность, и, что особенно важно для данной исследовательской работы – высоким пропусканием в инфракрасной области спектра, что позволяет создавать просветляющие покрытия. Создание тонких алмазных покрытий с помощью химического осаждения из газовой фазы (CVD) дает возможность создания таких просветляющих покрытий для германия.

Целью работы является исследование оптического пропускания германия с просветляющим покрытием из CVD-алмаза.

## **1. Литературный обзор**

### **1.1. Исследование методов и параметров осаждения CVD-алмаза на германий**

Германий прозрачен в инфракрасной области спектра и применяется для создания оптических систем, которые работают в диапазоне длин волн от 1 мкм до 23 мкм. Среди них можно выделить такие оптические элементы, как линзы, призмы, оптические окна датчиков. Главным образом эта оптика используется в военных целях и применяется в области защиты от ядерного оружия. Германиевое стекло также используется для невоенного наблюдения, ночного видения и систем мониторинга в самых разных областях, включая спутниковые системы и пожарные сигнализации [2].

Для ИК-оптики идеальным условием является высокий показатель преломления, так как он необходим для уменьшения кривизны линз и их толщины, но чем больше показатель преломления, тем больше потери на отражение от поверхности [3]. Поэтому оптические элементы, применяемые в ИК-диапазоне необходимо просветлять. Один из возможных материалов для этого - CVD-алмаз.

Появление возможности создания тонких алмазных покрытий методом химического осаждения из паровой фазы (CVD), помогло делать более прочными различные детали [4]. Также благодаря высокой теплопроводности, алмазные покрытия можно использовать для отведения тепла от микроэлектронных устройств, возможно создание просветляющих покрытий для ИК-оптики, так как алмаз обладает широкой областью пропускания от глубокого УФ вплоть до радиоволн [5].

Процесс химического газофазного осаждения (CVD-процесс) включает в себя химическую реакцию, которая протекает в газовой фазе, в результате чего происходит осаждение конечного продукта реакции на поверхность твердой подложки. Существует несколько CVD-методов, такие как термический (с

горячей нитью/проволокой), плазменный метод (высокочастотная плазма, СВЧ-плазма) и применение плазменного горения (плазменные горелки) [6].

Рост CVD-алмаза включает в себя несколько основных этапов, таких как зарождение (зародышеобразование), образование непрерывной пленки и конкурентный рост кристаллов. Полученная структура пленки, свойства и морфология поверхности тесно связаны с этими тремя этапами.

Основные параметры процесса осаждения – это входная мощность, температура подложки, концентрация метана, давление газа и расход газа. Общепринятые результаты влияния данных параметров на процесс роста [7]:

- скорость роста алмаза возрастает с увеличением микроволновой мощности, микроволновая энергия в основном влияет на плотность плазмы;
- рост зародышей алмазов и скорость роста алмазов возрастает с увеличением давления газа и концентрации метана;
- расход газа оказывает меньшее влияние на зарождение и рост алмаза;
- температура подложки существенно влияет на морфологию пленки.

Скорости роста для различных методов осаждения значительно отличаются. Высокие скорости роста обычно достигаются за счет потери качества осаждаемой пленки. Например, в методах осаждения алмазных покрытий путем сжигания углеводородов, наблюдается высокая скорость роста пленки (100 - 1000 мкм/ч), но она при этом образуется в очень малых локальных областях при плохом контроле процесса осаждения, что приводит к получению пленки низкого качества. При осаждении алмазной пленки методами горячей проволоки или плазмохимическим газофазным осаждением наблюдаются более низкие скорости роста (0,1 - 10 мкм/ч), но пленки, получаемые таким образом, обладают более высоким качеством [6].

В данной работе исследуются покрытия из CVD-алмаза в качестве просветляющего покрытия для германия в ИК-диапазоне длин волн. Германий имеет отличное пропускание в инфракрасной области, но его высокий показатель преломления (около 4), приводит к большим потерям на отражение, а алмаз обладает более низким показателем преломления (около 2) и широкой

областью пропускания, что дает возможность использовать его в качестве просветляющего покрытия. Так же алмаз способствует укреплению хрупкого германия, но его сложно осадить на германий из-за того, что германий относится к материалам, которые имеют малую растворимость углерода. Трудности возникают из-за того, что осаждение алмаза на неалмазную подложку, в отличие от алмазной, затруднено отсутствием зародышеобразования. Неалмазные поверхности часто засеивают алмазными частицами для усиления зарождения и инициирования роста. Так как различные материалы подложек имеют разные параметры, то каждый материал требует свой собственный подход к зародышеобразованию, что приводит к активному развитию разработок в данной сфере [8].

В статье [9] применяется метод осаждения в реакторе с горячей нитью (HWCVD). Используются три вида подложек: монокристалл Si с эпитаксиальными слоями сплава Si-Ge толщиной 2 мкм, содержание германия составляет 13, 25, 30, 60, 100 %, монокристалл Ge со случайной ориентацией и монокристалл Ge с наплавленными барьерными слоями (толщина барьерного слоя 1 мкм, он состоит из аморфного Si, диоксида кремния или нитрида кремния). Осаждение алмаза происходило в реакторе с горячей нитью, работающем в стандартных условиях роста CVD со следующими параметрами:

- 1) 1% метана в смеси газообразного водорода при общем расходе  $200 \text{ см}^3/\text{мин}$  и давлении 30 Торр (мм.рт.ст.).
- 2) Та нить при температуре  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- 3) Скорость осаждения около  $0,5 \text{ мкм/ч}$ .

При использовании этого метода осаждения для монокристалла германия были обнаружены три проблемы: температура плавления германия (937) близка к температуре осаждения (900), что приводит к частичному плавлению поверхности Ge, германий не образует твердых карбидов и у алмаза с германием возникает несоответствие теплового расширения (у алмаза –  $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , у

германия –  $6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Эти проблемы приводят к плохой адгезии. Поэтому необходима многослойная система.

Необходимо найти барьерное покрытие, которое увеличит адгезию, не вызывая разрушения и ухудшения ИК-пропускания. Барьерные слои из кремния, которые рассматриваются в этой статье (диоксид кремния, нитрид кремния и диоксид кремния), были выбраны из-за того, что карбидообразующие свойства Si должны способствовать адгезии. Более того SiC имеет коэффициент теплового расширения между германием и алмазом ( $2,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  при 300 К и  $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  при 1000 К). Также слой кремния, с его температурой плавления (1410 °С) действует как тепловой барьер, предотвращая плавление Ge. Но так как Si плохо пропускает в ИК-диапазоне, то толщина слоя должна быть сведена к минимуму. Кремний действовал, как хороший тепловой барьер, но из-за сжимающих напряжений пленки треснули и отслоились. Отслоение происходило на границе Si – Ge. Для уменьшения эффекта напряжения использовали более тонкие пленки Si (4 нм и 0,5 мкм), но они были недостаточно толстыми для предотвращения плавления поверхности Ge.

Необходимо найти другое барьерное покрытие, иначе использование алмазной пленки для Ge будет невозможным.

В статье [10] методы, применяемые в [11] для ZnS, были применены и для Ge. Там для решения проблемы адгезии рассматриваются две методики: ультразвуковое перемешивание субстрата в суспензии, содержащей алмазный порошок, и нанесение алмазопоглощаемого полимера спиновым покрытием.

При ультразвуковом перемешивании были использованы (100) подложки Si, породы алмазного порошка номинального размера 0,25 - 4 мкм, ряд растворителей, включая метанол, ацетон и изопропиловый спирт, и периоды перемешивания от 30 минут до 24 часов. При использовании концентратов алмазного порошка, превышающих  $2,5 \text{ g l}^{-1}$ , были получены плотности зародышеобразования порядка  $10^8 \text{ см}^{-2}$ . Хотя этого достаточно, чтобы возник рост непрерывных пленок, они неизменно развивают нежелательную грубую

текстуру. Более тревожной характеристикой ультразвуковых зародышевых пленок является их относительно слабая адгезия к кремниевым подложкам.

В методе алмазопоглощаемого полимера алмазный порошок с номинальным размером зерна 0,25-0,5 мкм добавляется к 20%-ному раствору полиэтилметакрилата (РЕМА) в хлорбензоле и центрифугируется на кремниевые подложки со скоростью 2000 об/мин в течение 30 секунд. Это покрытие запекается при 80 °С в течение 10 минут для удаления растворителя перед твердой выпечкой при 120 °С в течение еще 30 минут. Адгезия, пленок с полимерными зародышами очень хороша, но у них высокая шероховатость поверхности, что ставит под угрозу их оптические характеристики. Несмотря на проблемы этого метода, сочетание хорошей адгезии и минимальное нарушение защитной прослойки делает этот метод благоприятным для будущих применений в ИК алмазов МРАСVD.

Но данным способом на германий можно наносить алмаз толщиной до 10 мкм, если толщина алмазного покрытия будет больше 10 мкм, то подложка будет разрушаться из-за возникающего большого напряжения термического расширения.

В статье [12] применяются два метода нанесения CVD-алмаза. В одном из них осаждение производилось в микроволновой фокусированной плазменной установке, а во втором – в линейной антенной микроволновой плазменной системе. Осаждение происходило напрямую на германиевую подложку, а также на германиевую подложку, с нанесенным на нее барьерным аморфным кремниевым слоем (a-Si толщиной 20 - 30 нм), который был получен обогащенной силаном радиочастотной плазмой при комнатной температуре. До роста алмаза германиевые подложки без барьерного слоя и с барьерным слоем подвергались ультразвуковой обработке в суспензии порошка наноалмаза на водной основе. Эта обработка привела к высокой плотности семян алмаза, которая необходима для равномерного роста алмазной пленки.

Для микроволновой фокусированной плазменной установки осаждение проводили в газовой смеси метана и водорода (1% CH<sub>4</sub> в H<sub>2</sub>) при 2000 Па и

мощности СВЧ 1100 Вт в течении 18 часов при температуре подложки 400 °С. Для линейной антенной микроволновой плазменной системы рост алмаза производился со следующими условиями: газовая смесь из метана, диоксида углерода и водорода (2,5% CH<sub>4</sub> + 10% CO<sub>2</sub> в H<sub>2</sub>), давление 10 Па и мощность СВЧ 2 × 1200 или 2 × 1700 Вт с использованием двух антенн. Общее время осаждения 20 ч, а температура подложки составляла 250 °С или 360 °С (в зависимости от мощности).

Процесс осаждения в фокусированной плазменной системе при температуре 400 °С приводил к травлению поверхности Ge. Даже при температуре осаждения 250 °С в линейной антенной системе подложки Ge выявили особенности плавления, а рост алмаза был недостаточно эффективным. Применение 20-30 нм тонкого аморфного кремния в качестве барьерного слоя стабилизировало подложку Ge и привело к получению однородного алмазного покрытия с хорошим качеством. В отличие от фокусированной микроволновой плазмы, линейная антенная плазма была показана как более подходящая для покрытия неплоских и крупных подложек.

Для сравнения пропускания будет произведено напыление DLC-покрытия.

DLC-покрытие – пленки аморфного углерода, содержащие как sp<sup>2</sup>, так и sp<sup>3</sup>-связь и, как правило, некоторое количество водорода, иногда называемого «алмазоподобным» углеродом (DLC). Нанесение происходит магнетронным распылением.

Магнетронное распыление представляет собой катодное распыление мишени в плазме магнетронного разряда. Распыляемое вещество образуется в следствии бомбардировки мишени ионами рабочего газа, которые образуются в плазме магнетронного разряда. Под мишенью находятся постоянные магниты, создающие магнитное поле. В результате с катода выбиваются электроны, которые захватываются магнитным полем, и совершают в этом поле под действием силы Лоренца спиралевидное движение. Электроны, захваченные магнитным полем, проводят дополнительную ионизацию атомов инертного газа,

что увеличивает, таким образом, интенсивность ионной бомбардировки поверхности катода и, соответственно, вызывает повышение скорости распыления.

Для диагностики полученных покрытий будет использоваться рамановская спектроскопия. Для оценки качества CVD-покрытия будет использоваться спектр монокристалла алмаза. Спектр комбинационного рассеяния алмазного монокристалла (верхний спектр на рисунке 1) характеризуется четкой линией на  $1332,5 \text{ см}^{-1}$  на плоском фоне [13].

Для DLC-покрытия характерен спектр (нижний спектр на рисунке 1), который разлагается на D и G полосы. Полоса D соответствует sp<sup>2</sup>-гибридизации, а полоса G – sp<sup>3</sup>-гибридизация. Ширина пиков D и G зависит от твердости, износа и электрических характеристик пленки. А положение пика зависит от структуры пленки, источника света рамановской спектроскопии и т.д. [14].

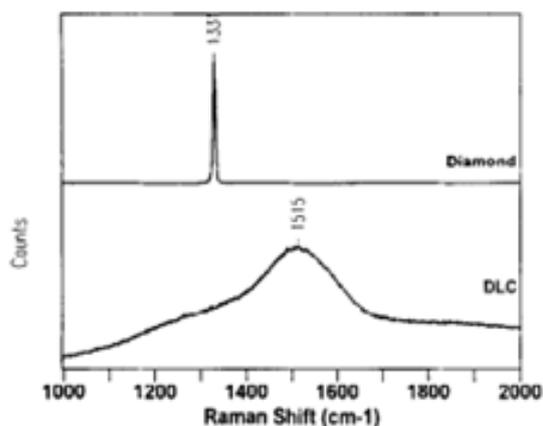


Рисунок 1 – Рамановский спектр монокристаллического алмаза и DLC-покрытия [15]

## 1.2. Просветляющие покрытия

Просветляющие покрытия применяются для уменьшения отражения падающего света от поверхности оптической детали. Коэффициент отражения от непоглощающих покрытий определяется ее показателем преломления и может достигать высоких значений, например, у кремния и германия он достигает 32 - 40%. В результате потерь излучения на отражение происходит значительное снижение интенсивности проходящего излучения.

Наиболее простой способ уменьшения интенсивности отраженного от поверхности света – создание однослойной поверхностной пленки с показателем преломления меньшим, чем у подложки. Однослойные покрытия широко применяются для просветления высокопреломляющих покрытий. Наиболее широкое применение однослойные покрытия нашли применение в ИК-области спектра [16].

Принцип действия просветляющих покрытий основан на явлении интерференции. Так как показатель преломления пленки меньше, чем показатель преломления подложки, то луч, отраженный от поверхности пленки, и луч, отраженный от поверхности подложки когерентны. Можно подобрать такую толщину пленки, что при интерференции два этих луча будут гасить друг друга, при этом усиливается интенсивность проходящего света. Для этого амплитуды двух отраженных волн должны быть равны ( $\rho_1 = \rho_2$ ) и их фазы должны отличаться на половину периода, чтобы лучи погасили друг друга ( $E_1 - E_2 = \frac{\lambda}{2}$  или  $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ ). Для этого необходимо выполнение данных условий:  $n_{\text{покр}} = \sqrt{n_{\text{ср}} \cdot n_{\text{подл}}}$ ;  $n_{\text{пл}} d_{\text{пл}} = \frac{\lambda}{4}$  [17].

CVD-алмаз с показателем преломления около 2 удовлетворяет условию  $n_{\text{покр}} = \sqrt{n_{\text{ср}} \cdot n_{\text{подл}}}$  для просветления германия с показателем преломления 4. Остается рассчитать оптимальную толщину просветляющего покрытия из CVD-алмаза.

## 2. Объект и методы исследования

Объектом исследования данной работы являются просветляющие покрытия из CVD-алмаза для инфракрасной оптики. Данные покрытия были получены и исследованы при помощи оборудования, приведенного в данном разделе.

### 2.1. Описание экспериментального оборудования

#### 2.1.1. Химическое осаждение из газовой фазы (CVD)

В данной работе для осаждения используется CVD-метод с горячей нитью (HWCVD) также известный как каталитический CVD (Cat-CVD). Установка изображена на рисунке 2.

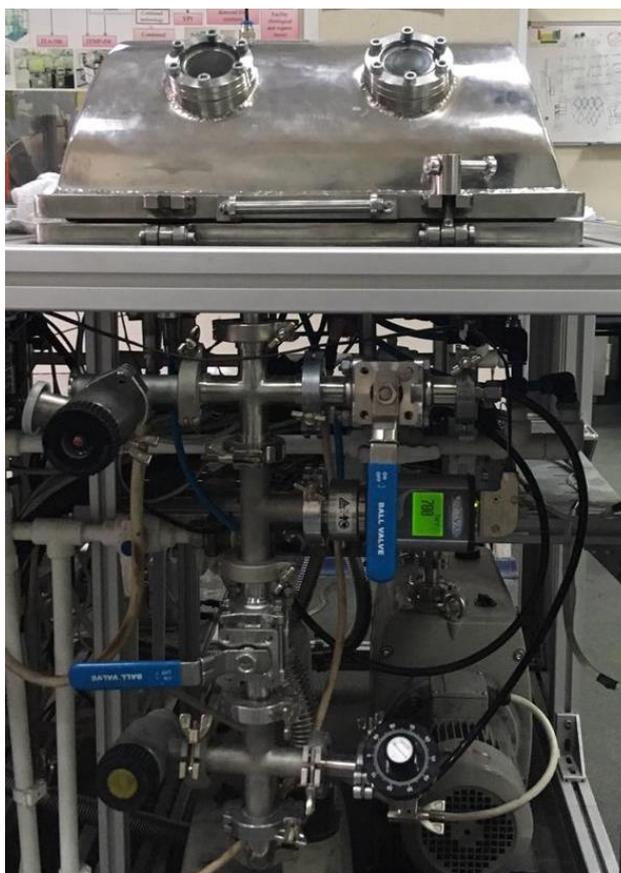


Рисунок 2 – Установка для химического осаждения из газовой фазы

Суть метода заключается в том, что после откачки воздуха из камеры, в нее напускают газ, необходимый для образования пленки. Затем происходит термическое разложение этого газа с помощью резистивно нагретой

проволочной нити и частицы, образующиеся в результате этого процесса, подвергаются реакциям с образованием пленки на охлажденной поверхности подложки.

Для ускорения реакции газовой фазы, состоящей из смеси водорода с углеродосодержащим газом, используют тугоплавкую проволоку, нагретую до температуры около 2000 °С. Проволока размещается около подложки, на которую наращивается пленка. Температура подложки поддерживается в диапазоне 700-1000 °С. Давление газовой фазы обычно составляет 20-60 Торр.

### 2.1.2. Физическое осаждение из газовой фазы (PVD)

Метод напыления покрытий в вакууме, при котором покрытие получается путём прямой конденсации пара наносимого материала.

В данной работе в качестве PVD-метода используется метод магнетронного распыления (установка приведена на рисунке 3). В данном методе распыление материала происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа, которые образуются в газе аномального тлеющего разряда.

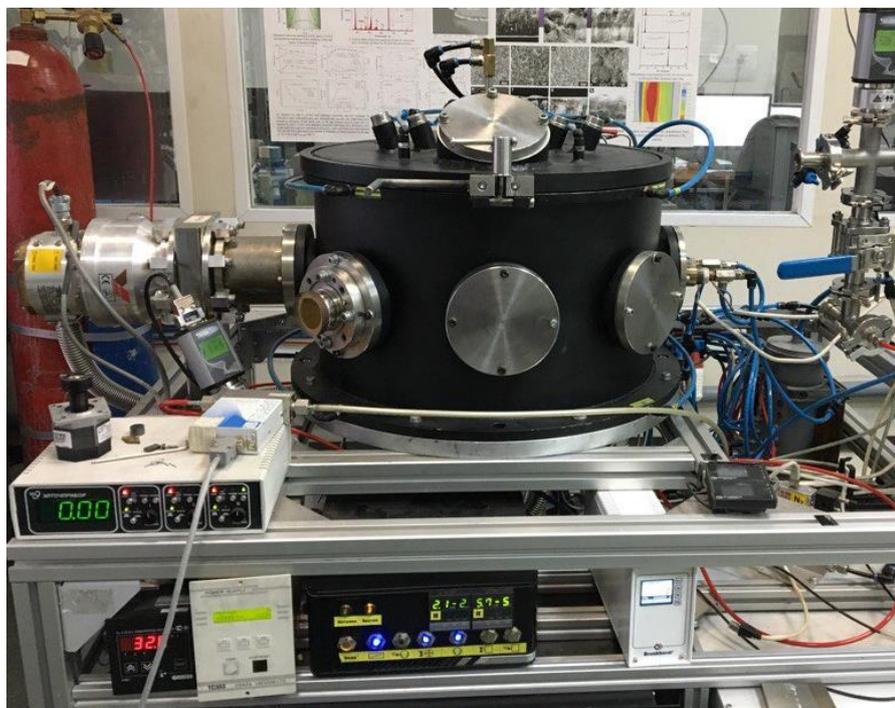


Рисунок 3 – Магнетронная установка

### Параметры установки:

- 2 источника питания магнетронов частотой 40 кГц (1 кВ, 5 кВт, Applied Electronics, Томск, Россия).
- Остаточное давление  $p_0 = 8 \times 10^{-4}$  Па.
- Ионный источник очистки и ассистирования (3,5 кэВ, Applied Electronics, Томск, Россия).
- Рабочие газы: Ar, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>.
- Нагреваемый подложкодержатель T = 0 - 1000°C.

Метод магнетронного распыления заключается в том, что при подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или отрицательный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле, которое возбуждает аномальный тлеющий разряд. С помощью магнитного поля, находящегося у распыляемой поверхности мишени, происходит локализация плазмы разряда у мишени. Электроны, выбитые с катода посредством ионной бомбардировки, захватываются магнитным полем, им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхности мишени. Электроны оказываются в ловушке между магнитным полем, которое возвращает эти электроны на катод, и поверхностью мишени, отталкивающей их. Электроны находятся в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет ионизирующих столкновений с рабочим газом, в результате которых электрон потеряет энергию, полученную от электрического поля. Таким образом большая часть энергии электрона используется на ионизацию и возбуждение, что увеличивает эффективность ионизации, а значит и скорость осаждения.

### 2.1.3. Очистка образцов

Перед загрузкой подложек в камеру, они проходили очистку в ультразвуковой ванне (установка представлена на рисунке 4) с C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, для удаления различных загрязнений и улучшения адгезии покрытий, рисунок.



Рисунок 4 – Ультразвуковая ванна

## 2.2. Методы исследования

### 2.2.1. Толщина покрытий

Первичное измерение толщины проводилось при помощи оптического микроскопа ZEISS AXIO IMAGER (рисунок 5).



Рисунок 5 – Оптический микроскоп

Оптический метод основан на измерении уступа, образованного краем покрытия с подложкой, способом светового сечения или растровым способом с помощью оптического микроскопа. Метод применим для измерения толщины покрытия от 1 до 40 мкм с коэффициентом отражения не менее 0,3, в поперечном сечении.

### 2.2.2. Рамановская спектроскопия

В данной работе для спектроскопии комбинационного рассеяния применялся комплекс оборудования, представленный на рисунке 6.

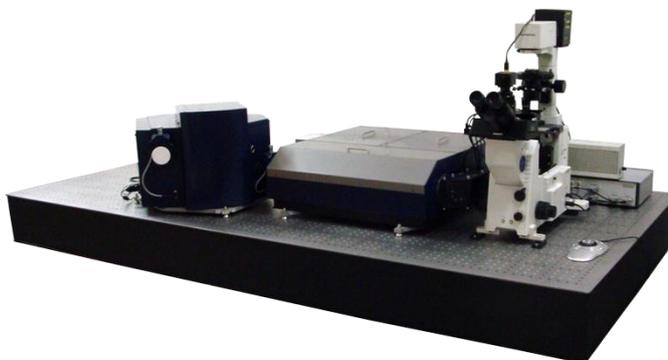


Рисунок 6 – Комплекс оборудования для спектроскопии комбинационного рассеяния

Комплекс, сочетающий сканирующий зондовый микроскоп, конфокальный микроскоп/спектрометр с двойной дисперсией для получения спектров рамановского рассеяния и флюоресценции и спектральных изображений, конфокальный лазерный микроскоп и оптический инвертированный микроскоп Centaur I HR (NanoScan Technology, Россия)

Рамановская спектроскопия (или спектроскопия комбинационного рассеяния) – явление рассеяния света на молекулах материала с изменением частоты. Так как эта частотная модуляция различна для молекулярных колебаний и фононов в кристалле, то можно анализировать информацию о составе материала или кристаллической решетки с помощью анализа спектра комбинационного рассеяния.

Рамановская спектроскопия заключается в том, что через исследуемый образец пропускают луч с определенной длиной волны, который рассеивается при контакте с образцом. Полученные лучи с помощью линзы собираются в один пучок и пропускаются через светофильтр, который отделяет слабые лучи рамановского рассеяния от более интенсивных лучей релеевского рассеяния.

Затем рамановские лучи усиливаются и направляются на детектор, фиксирующий частоту их колебания.

### **2.2.3. Измерение ИК-пропускания покрытий**

В данной работе использовался ИК-Фурье спектрометр Nicolet 5700 (Thermo Electron Corporation, USA), приведенный на рисунке 7.



Рисунок 7 – ИК-Фурье спектрометр Nicolet 5700 (Thermo Electron Corporation, USA)

Принцип действия спектрофотометра основывается на измерении отношения двух световых потоков: прошедшего через подложку и падающего на нее. Диапазон измерения:  $4000 - 400 \text{ см}^{-1}$ ; разрешение:  $0,09 \text{ см}^{-1}$ .

### **2.2.4. Электронная микроскопия**

В данной работе применялся сканирующий микроскоп Quanta SEM (Thermo Fisher Scientific, США), представленный на рисунке 8.



Рисунок 8 – Сканирующий микроскоп Quanta SEM (Thermo Fisher Scientific, США)

В электронном микроскопе вместо света используется поток электронов в вакууме.

Принцип действия сканирующего электронного микроскопа основан на пропускании электронов через исследуемый образец. Пучок электронов фокусируется в маленькое пятно около 2-3 мкм в диаметре на образце. Для фокусировки электронов используется электромагнитное поле, создаваемое электромагнитными катушками. В процессе сканирования сфокусированным электронным пучком по поверхности образца происходит эмиссия вторичных электронов, которые регистрируются детектором. Объекты при электронной микроскопии находятся в глубоком вакууме, поэтому они подвергаются фиксации и специальной обработке.

## **5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В настоящее время перспективность научного исследования, по большей части, определяется коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческого потенциала разработки необходима для поиска источников финансирования научного исследования. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. Благодаря такой оценке разработчики могут найти партнеров для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов исследования и открытия бизнеса.

Целью данного раздела является определение коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения научного исследования, планирование и формирование бюджета научных исследований, а также планирование процесса управления научно-технического исследования.

Достижение цели обеспечивается решением следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- организация работ по научно-техническому исследованию;
- планирование научно-исследовательских работ;
- расчет заработной платы исполнителей работы;
- формирование бюджета затрат научно-технического исследования.

## **5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

### **5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

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

Целевой рынок – это сегмент рынка, на котором в дальнейшем будет продаваться разработка. Сегмент рынка – это выделенная особым образом часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

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

Нанесение CVD-покрытий позволяет повысить пропускную способность германия, который используется в ИК-оптике, также оно способствует укреплению хрупкого германия.

Потребителями готовой продукции будут различные промышленные и военные предприятия, в отрасли пожарной безопасности и в космической отрасли и др.

### **5.1.2. Анализ конкурентных технических решений**

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Для сравнения с CVD-алмазом ( $B_{\phi}$ ) были выбраны следующие покрытия: алмазоподобное – DLC ( $B_{к1}$ ) и сульфид цинка - ZnS ( $B_{к2}$ ).

Основные технические характеристики оценки ресурсоэффективности:

1. Оптические свойства покрытий – высокая пропускная способность в ИК-диапазоне спектра, а именно 8-14 мкм.

2. Защитные свойства покрытия (устойчивость к химическим и абразивным воздействиям).

3. Простота осаждения покрытия.

4. Адгезионная прочность.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения будет произведен с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 3.

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес оценки	Баллы			Конкурентность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Оптические свойства покрытий	0,28	5	4	3	1,40	1,12	0,84
2. Защитные свойства	0,20	5	4	3	1,00	0,80	0,60
3. Простота осаждения	0,13	5	5	5	0,65	0,65	0,65
4. Адгезионная прочность	0,16	4	4	5	0,64	0,64	0,80
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентноспособность покрытий	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,20
2. Стоимость материалов	0,08	4	4	5	0,32	0,32	0,40
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,06	5	5	3	0,30	0,30	0,18
4. Срок выхода на рынок	0,04	4	4	5	0,16	0,16	0,20
Итого	1				4,72	4,24	3,87

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i$$

где K – конкурентноспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Итогом данного анализа является заметное преимущество покрытия из CVD-алмаза. Преимущества данного покрытия над покрытием из сульфида цинка имеются как в технических критериях оценки, так и в экономических. А преимущество над алмазоподобным покрытием имеются только в технических критериях, в экономических они одинаковы.

### **5.1.3. SWOT-анализ**

SWOT-анализ представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Его применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Он проводится в несколько этапов. Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут проявиться во внешней среде проекта. После формирования четырех областей SWOT, переходят к реализации второго этапа, который состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или не соответствие должны помочь определить степень необходимости проведения стратегических изменений. В рамках третьего этапа составляется итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в бакалаврской работе (табл. 4).

Сильными сторонами проекта можно назвать следующие свойства и особенности:

- Эффективность технологии;
- Высокие технические и экономические характеристики;
- Квалифицированный персонал;
- Наличие бюджетного финансирования.

Слабыми сторонами проекта можно назвать следующие свойства и особенности:

- Сильные конкуренты;
- Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров;
- Низкое финансирование;

- Отсутствие компании, которая может наладить крупномасштабное производство;
- Слабая маркетинговая политика.

К возможностям данного проекта можно отнести:

- Модернизация хозяйственных материалов, повышение срока службы;
- Благодаря высокой эффективности технологии может стать передовой.

К угрозам можно отнести:

- Отсутствие спроса на новые технологии производства;
- Развитие альтернативных технологий;
- Несвоевременное финансирование научного исследования со стороны государства.

В таблице 4 приведена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более наглядно рассмотреть перспективы разработки.

Строится интерактивная матрица проекта. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 4 – интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	
	V1	+	+	0	-	
	V2	+	+	-	-	
Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	
	Y1	+	+	0	-	
	Y2	0	+	-	-	
	Y3	+	0	-	+	
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5

	B1	+	-	0	+	+
	B2	+	0	0	+	-
Слабые стороны проекта						
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
Угрозы проекта	B1	+	+	-	+	+
	B2	0	+	-	0	+
	B3	-	-	+	-	-

Таблица была построена для анализа сильных и слабых сторон проекта, а также для анализа угроз и возможностей.

В рамках третьего этапа составляется итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в бакалаврской работе (табл. 5).

Таблица 5 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Эффективность технологии.</li> <li>2. Высокие технические и экономические характеристики.</li> <li>3. Квалифицированный персонал.</li> <li>4. Наличие бюджетного финансирования.</li> </ol>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сильные конкуренты.</li> <li>2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров.</li> <li>3. Низкое финансирование.</li> <li>4. Отсутствие компании, которая может наладить крупномасштабное производство.</li> <li>5. Слабая маркетинговая политика.</li> </ol>
<p><b>Возможности:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Модернизация хозяйственных материалов, повышение срока службы.</li> <li>2. Благодаря высокой эффективности технологии может стать передовой.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Улучшение характеристик ИК-оптики с использованием покрытия.</li> <li>2. Повышение срока службы и качества продукции при высокой эффективности технологии являются основополагающими для продвижения продукта.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Улучшение характеристик материала.</li> <li>2. Высокая эффективность технологии позволит привлечь внимание потенциальных потребителей.</li> </ol>

<p><b>Угрозы:</b></p> <p>1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>2. Развитие альтернативных технологий.</p> <p>3. Несвоевременное финансирование научного исследования со стороны государства.</p>	<p>1. Изготовленный продукт имеет сильные стороны для предотвращения угроз.</p> <p>2. Высокое качество продукта и квалифицированные сотрудники помогут поддерживать спрос на технологию</p> <p>3. Эффективность технологии и опытный персонал позволят вести разработки в целях улучшения продукта, что предотвратит развитие альтернативных технологий.</p>	<p>1. Улучшение маркетинговой политики поможет найти потенциальных клиентов.</p> <p>2. Повышение технологического пакета позволит решить проблемы с поиском потенциальных потребителей и созданием альтернативных технологий.</p> <p>3. Привлечение финансовых средств позволит модернизировать и усовершенствовать методику получения и контроля покрытий.</p>
--	--	---

Данные покрытия находятся в стадии разработки и технических исследований. SWOT-анализ показал, что данные покрытия имеют как преимущества, так и некоторые недостатки, которые на данный момент на практике не устранены, но в теории уже есть возможности для их устранения. Также имеются хорошие возможности и сильные стороны проекта, при реализации которых все негативные стороны могут быть сведены к минимуму.

## **5.2. Планирование научно-исследовательских работ**

### **5.2.1. Структура работ в рамках научного исследования**

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Для выполнения исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду

запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей, таблица 6.

Таблица 6 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель, студент
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, студент
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Студент
	6	Выбор оптимальных параметров для расчета	Руководитель, студент
	7	Разработка методик для осаждения покрытий	Руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка правильности полученных результатов	Студент
	9	Обработка полученных результатов	Студент
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Руководитель, студент

Данная работа состоит из 5 этапов, содержащих 10 задач. Выполнение данных задач распределено между двумя исполнителями: руководителем и студентом.

### 5.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от

множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

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

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

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

$t_{\max i}$  - максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

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

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

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

### **5.2.3. Разработка графика проведения научного исследования**

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:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 119} = 1,48,$$

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

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

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

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  необходимо округлить до целого числа. Все рассчитанные значения необходимо свести в таблицу 7.

Таблица 7 – Временные показатели научного исследования (Р – научный руководитель; С – студент)

Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнители			
	$t_{\text{min}}$ , чел-дни	$t_{\text{max}}$ , чел-дни	$t_{\text{ож}}$ , чел-дни	Длительность в раб. днях, $T_{pi}$		Длительность работ в календ. днях, $T_{ki}$	
				Р	С	Р	С
1. Составление и утверждение технического задания	1	3	2	2	-	3	-
2. Выбор направления исследования	1	2	2	1	1	1	1
3. Подбор и изучение материалов по теме	8	12	10	5	5	8	8
4. Календарное планирование работ по теме	2	6	4	4	-	6	-

5. Проведение теоретических расчетов и обоснований	2	6	4	-	4	-	6
6. Выбор оптимальных параметров для расчетов	1	3	2	1	1	1	1
7. Разработка методик для осаждения покрытий	6	10	7,6	4	4	6	6
8. Оценка правильности полученных результатов	2	8	4	-	4	-	6
9. Обработка полученных результатов	10	16	12	-	12	-	18
10. Составление пояснительной записки	8	12	9	5	5	8	8
Итого				22	36	33	54

На основе таблицы 7 строится календарный график-план. График строится для максимального по длительности выполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта (таб. 8) с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования.

Таблица 8 – Календарный план-график проведения НИИ по теме

№ работ	Вид работ	Исполнитель	$T_{ki}$ , кал. Дн.	Продолжительность выполнения работ																
				Февр.		март		апрель		май		июнь								
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2							
1	Составление и утверждение технического задания	Р	3	■																
2	Выбор направления исследования	Р, С	1	■																
3	Подбор и изучение материалов по теме	Р, С	8	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4	Календарное планирование работ по теме	Р	6			■	■	■	■	■	■									

5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	С	6																
6	Выбор оптимальных параметров для расчетов	Р, С	1																
7	Разработка методик для осаждения покрытий	Р, С	6																
8	Оценка правильности полученных результатов	С	6																
9	Обработка полученных результатов	С	18																
10	Составление пояснительной записки	Р, С	8																

■ - руководитель, ■ - студент, ■ - совместно.

Работа была равномерно распределена в течении времени, выделенного для проведения ВКР. Из календарного графика-плана видно, что наибольшее время было выделено на подбор и изучение материалов по теме, оценку правильности полученных результатов и их обработку.

### 5.3. Бюджет научно технического исследования (НТИ)

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);
- накладные расходы.

### 5.3.1. Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

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

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

$N_{расxi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями–изготовителями (либо организациями–поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 9.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – источник.

Таблица 9 – материальные затраты

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.
Катод графитовый	шт.	1	1000	1000
Германий	кг.	0,1	6200	620
Кремний	шт.	1	520	520
Доступ в интернет	мес.	5	350	1750
Итого				3890

Из затрат на материальные ресурсы, включаемых в себестоимость продукции, исключается стоимость возвратных отходов.

Под возвратными отходами производства понимаются остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, теплоносителей и других видов материальных

ресурсов, образовавшиеся в процессе производства научнотехнической продукции, утратившие полностью или частично потребительские качества исходного ресурса (химические или физические свойства) и в силу этого используемые с повышенными затратами (понижением выхода продукции) или вовсе не используемые по прямому назначению.

### 5.3.2. Основная заработная плата исполнителей темы

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 окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада.

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

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

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

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя (лаборанта, студента) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:  $Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p$ , где  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Для руководителя:  $Z_{осн} = 1195 \cdot 22 = 26290,00$  рублей.

Для студента:  $Z_{осн} = 127,89 \cdot 54 = 6906,06$  рублей.

Среднедневная заработная оплата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

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 научнотехнического персонала, раб. дн. (табл. 13).

Тогда,

$$\text{Для руководителя: } Z_{\text{дн}} = \frac{22300 \cdot 11,2}{209} = 1195,02 \text{ рублей.}$$

$$\text{Для студента: } Z_{\text{дн}} = \frac{1750 \cdot 10,4 \cdot 1,3}{185} = 127,89 \text{ рублей.}$$

где 1,3 – это районный коэффициент для Томска,  $k_p$ .

Заработная плата по тарифной ставке (оклад) ассистента, кандидата наук – 22300 руб.

Государственная академическая стипендия студента – 1750 руб.

Таблица 10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	118	118
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	24	48
- невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	209	185

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_6$ , руб.	$k_p$	$Z_m$ , руб	$Z_{\text{дн}}$ , руб	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб
Руководитель	-	-	22300	1195,02	22	26290,00
Студент	1750	1,3	2275	127,89	54	6906,06

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст.

преподаватель, доцент, профессор (см. «Положение об оплате труда», приведенное на интернет-странице Планово-финансового отдела ТПУ).

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

### **5.3.3. Дополнительная заработная плата**

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:  $Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$ , где  $k_{\text{доп}}$  - коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

$$Z_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 26290,00 = 3943,5$$

### **5.3.4. Отчисления во внебюджетные фонды**

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников. Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:  $Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}})$ , где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). 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 – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табличной форме (таблица 12).

Таблица 12 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Студент
Основная заработная плата, руб	26290,00	6906,06
Дополнительная заработная плата, руб	3943,5	-
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Сумма отчислений	8193,27	1871,54
Итого	10064,81	

В данной таблице рассчитана величина внебюджетных отчислений для исполнителей научно-технического исследования. Итоговая сумма отчислений во внебюджетные фонды составляет 10064,81 руб.

### 5.3.5. Формирование затрат НТИ

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научнотехнической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	3890,00
2. Затраты по основной заработной плате	33196,06
3. Затраты по дополнительной заработной плате	3943,50
4. Отчисления во внебюджетные фонды	10064,81
Итого плановая себестоимость	51094,37

При планировании научно-исследовательской работы был произведен подсчет бюджета исследования. В процессе формирования бюджета были использованы группировки по материальным затратам (3890,00 руб.), затратам по основной заработной плате исполнителей (33196,06 руб.), затратам по

дополнительной заработной плате (3943,50 руб.) и отчислениям во внебюджетные фонды (10064,81 руб.). Всего бюджет составил 51094,37 руб.

### **Вывод к разделу финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В данном разделе рассмотрена экономическая эффективность выпускной работы. Проведение SWOT-анализа позволило определить сильные и слабые стороны проекта, а также возможности и угрозы, которые необходимо учитывать при дальнейшем развитии проекта. Сравнение с аналогами позволило выявить преимущества, которым стоит уделять особое внимание. График работ позволил рассчитать заработную плату для всех участников проекта. Также была произведена оценка бюджета исследования.