

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

Институт Физико-технический  
 Направление подготовки Техническая физика  
 Кафедра Экспериментальная физика

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Формирование алмазоподобных кремний-углеродных покрытий</b>
УДК 621.793.13-032.3.002-047.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОД21	Максимов Кирилл Алексеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник ИСЭ СО РАН	Работкин Сергей Викторович	К.Т.Н		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента ИСГТ	Сечина Ася Александровна	К.Х.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПФ ФТИ	Гоголева Татьяна Сергеевна	К.ф.-М.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭФ ФТИ	Кривобоков Валерий Павлович	д.ф.-м.н., профессор		

**Результаты обучения бакалавров  
направления 16.03.01 «Техническая физика»  
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Использовать фундаментальные законы природы и естественнонаучных дисциплин, физико-математический аппарат, методы математического анализа, моделирования, оптимизации и статистики для решения задач в различных отраслях технической физики.	Требования ФГОС (ПК-2, 3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Участвовать в теоретических и экспериментальных исследованиях в различных отраслях технической физики, связанных с современными высокотехнологическими способами обработки материалов, основанными на использовании радиационных и плазменных потоков; самостоятельно осваивать современную физическую аналитическую и технологическую аппаратуру, применять современные методы исследования свойств материалов и различных структур, проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов, оборудования и изделий, изучать научно-техническую информацию, разрабатывать адекватные физические и математические модели изучаемых объектов.	Требования ФГОС (ПК-4, 10, 11, 12, 13). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Владеть основными методами работы с информацией, самостоятельно работать на компьютере в средах современных операционных систем и наиболее распространенных прикладных программ и программ компьютерной графики, применять современные образовательные и информационные технологии.	Требования ФГОС (ПК-5, 6, 7). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Знать иностранный язык на уровне, позволяющем работать с научно-технической литературой и участвовать в международном сотрудничестве в области технической физики.	Требования ФГОС (ПК-8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Участвовать в производственно-технологической деятельности, определять основные параметры технологических процессов, анализировать свойства физико-технических объектов, изделий и материалов, применять современные информационные технологии, пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров, обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов и изделий.	Требования ФГОС (ПК-14, 15, 17). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P6	Использовать нормативные документы по качеству, стандартизации и сертификации изделий, элементы	Требования ФГОС (ПК-16, 18). Критерий 5 АИОР,

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	экономического анализа производственно-технологических циклов, знать и выполнять правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда.	согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, разрабатывать функциональные и структурные схемы элементов и узлов экспериментальных и промышленных электрофизических установок, реализующих современные пучковые и плазменные технологии, проектировать технологические процессы и оборудование с использованием современных информационных технологий.	Требования ФГОС (ПК-19, 20). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Участвовать в организационно-управленческой деятельности, уметь работать в команде и организовывать работу исполнителей, находить и принимать управленческие решения.	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-21, 22, 23). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Внедрять и коммерциализировать результаты исследований и проектно-конструкторских разработок, уметь оценивать инновационный потенциал новой продукции в области современных технологий, основанных на использовании радиационных и плазменных потоков.	Требования ФГОС (ПК-21, 22, 23, 24). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<i>Универсальные компетенции</i>		
P10	Осознавать социальную значимость своей профессии, развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять свое научное мировоззрение, повышать свою квалификацию и мастерство, поддерживать здоровый образ жизни	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6, ПК-1). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового и профессионального общения, владеть навыками публичной дискуссии, создавать и редактировать тексты профессионального назначения.	Требования ФГОС (ОК-2). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Уметь критически переосмысливать свой накопленный социальный и профессиональный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, следовать этическим и правовым нормам и нести ответственность за последствия своей профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5, 7, ПК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

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

Институт Физико-технический  
 Направление подготовки (специальность) Техническая физика  
 Кафедра Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой  
 \_\_\_\_\_ В.П. Кривобоков  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

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

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Д21	Максимову Кириллу Алексеевичу

Тема работы:

<b>Формирование алмазоподобных кремний-углеродных покрытий</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	3223/С от 27.04.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:	16.06.2016
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	1) Источник дугового разряда с накаливаемым катодом (вольфрамовая нить); 2) Полифенилметилсилоксановый прекурсор; 3) Подложка из арсенида галлия
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1) Обзор методов получения алмазоподобных кремний-углеродных покрытий; 2) Методика эксперимента; 3) Оптимизация процесса осаждения покрытия; 4) Формирование алмазоподобных кремний-углеродных покрытий; 5) Исследование свойств полученных образцов
<b>Перечень графического материала</b>	Презентация в формате Microsoft Power Point, 17 слайдов
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
Раздел	Консультант

Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Сечина Ася Александровна
Социальная ответственность	Гоголева Татьяна Сергеевна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Осаждение алмазоподобных кремний-углеродных покрытий	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	20.09.2014
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник ИСЭ СО РАН	Работкин Сергей Викторович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Д21	Максимов Кирилл Алексеевич		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0Д21	Максимову Кириллу Алексеевичу

<b>Институт</b>	<b>ФТИ</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭФ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавр	<b>Направление/специальность</b>	Техническая физика

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

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

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

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

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

1. *Оценка конкурентоспособности технических решений*
2. *Матрица SWOT*
3. *График проведения и бюджет НТИ*
4. *Оценка сравнительной эффективности исследования НТИ*

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	18.03.2016
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент кафедры менеджмента ИСГТ	Сечина Ася Александровна	к.х.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0Д21	Максимов Кирилл Алексеевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОД21	Максимову Кириллу Алексеевичу

Институт	Физико-технический	Кафедра	ЭФ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	Техническая физика

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы)</li> </ul>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаровзрывобезопасность;</li> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ;</li> </ul>

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

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

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

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПФ ФТИ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОД21	Максимов Кирилл Алексеевич		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 111 с., 23 рис., 29 табл., 39 источников, 1 прил.

Ключевые слова: алмазоподобные углеродные, кремний, ПФМС, несамостоятельный дуговой разряд, твердость, тонкие пленки.

Объектом исследования являются алмазоподобные кремний-углеродные покрытия, полученные из плазмы несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом.

Цель работы – изучение процесса формирования алмазоподобных кремний-углеродных покрытий и исследование их свойств

В процессе работы проводилась оптимизация процесса осаждения и экспериментальные исследования полученных пленок.

В результате исследования были получены твердые покрытия (20 ГПа) с низкой степенью износа ( $1,3 \cdot 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м)) и низким коэффициентом трения (0,16).

Область применения: повышение срока службы промышленных механизмов, медицинских инструментов и др.



## Оглавление

Введение.....	11
Глава 1. Объект исследований и методы его получения .....	16
1.1 Алмазоподобные кремний-углеродные покрытия (АКУП) .....	16
1.2 Методы осаждения АКУП .....	17
1.2.1 Плазмохимический метод осаждения на постоянном токе .....	18
1.2.2 Метод высокочастотного плазмохимического осаждения .....	21
1.2.3 Комбинированный метод плазмохимического и физического осаждения.....	24
1.2.4 Метод ионно-лучевого осаждения .....	26
1.2.5 Несамостоятельный дуговой разряд с накаливаемым катодом .....	27
Вывод к разделу .....	28
Глава 2. Экспериментальное оборудование .....	30
2.1 Методика исследования параметров образующейся плазмы и методы исследования алмазоподобных кремний-углеродных покрытий .....	30
2.1.1 Методика определения плотности ионного тока, концентрации плазмы и электронной температуры .....	30
2.1.2 Исследование фазового состава методом Рамановской спектроскопии .....	33
2.1.3 Исследование структуры методом ИК-Фурье спектроскопии.....	34
2.1.4 Исследование морфологии поверхности методом атомно-силовой микроскопии .....	35
2.1.5 Исследование химического состава методом энергодисперсионного анализа.....	36
2.1.6 Исследование механических свойств АКУП .....	37
2.2 Экспериментальная установка для осаждения АКУП покрытий .....	39
2.3 Технологический источник и источники питания.....	40
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	43
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	43
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	43

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	43
4.1.3 Технология QuaD .....	45
4.1.4 SWOT-анализ.....	47
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	50
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	50
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ .....	52
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования .....	53
4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	57
4.3.1. Расчет материальных затрат НТИ.....	58
4.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы .....	59
4.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	62
4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	63
4.3.5 Контрагентные расходы .....	64
4.3.6 Накладные расходы.....	64
4.3.7 Формирование бюджета затрат НИП.....	65
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	65
Вывод к разделу .....	67

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире широко встает вопрос об увеличении срока службы промышленных механизмов, медицинских инструментов, отдельных деталей машин, работающих в условиях взаимного трения. Главным образом это связано с тем, что используемое для их изготовления сырье является дорогостоящим. В связи с этим, создание антифрикционных износостойких покрытий, способных увеличить долговечность деталей и механизмов, не изменяя при этом структуру и свойства обрабатываемых изделий, на сегодняшний день является актуальной задачей.

В настоящее время существуют различные способы увеличения износостойкости деталей: слесарно-механическая обработка, применяемая для устранения задиров, рисок и других дефектов поверхности, а также для получения необходимой чистоты поверхности; термическая обработка, или закалка, позволяющая повысить твердость поверхности детали; химико-термическая обработка, включающая в себя азотирование, фосфатирование, сульфидирование, борирование и др., позволяет изменять химический состав, структуру и свойства поверхности металлов; механическое упрочнение, гальваническая обработка, а также нанесение защитных покрытий на поверхности деталей.

Наибольший интерес представляют тонкопленочные покрытия, формируемые вакуумными ионно-плазменными методами. Преимущества таких методов состоят в следующем:

- возможность достижения высокой чистоты покрытий и однородность их толщины;
- возможность формирования сложных покрытий различного стехиометрического состава;
- возможность нанесения высокоадгезионных покрытий;
- возможность проведения процесса нанесения при низкой температуре подложки, что позволяет обрабатывать даже легкоплавкие материалы;

- возможность высокоскоростного нанесения покрытий;
- возможность точного регулирования технологических процессов и их полной автоматизации;

- безопасность для окружающей среды и экономическая выгода.

Также известно, что в ионизованном или возбужденном состоянии атомы и молекулы легче взаимодействуют друг с другом, делая процесс нанесения покрытий более эффективным [1].

Тонкие пленки могут применяться во многих областях науки и техники: машиностроении, медицине, космической отрасли, судостроении и авиастроении. В зависимости от условий осаждения можно формировать покрытия с требуемой структурой и свойствами.

В настоящее время большой интерес в науке и промышленности приобрели алмазоподобные углеродные пленки (АПП) за счет своих уникальных механических, химических, трибологических, а также электрических и оптических свойств. Такой набор свойств позволяет применять АПП не только в качестве защитных, но и для использования в солнечных батареях, носителях информации, биомедицинских применениях и др.

Алмазоподобный углерод является метастабильной формой углерода, состоящей из алмазоподобной фазы с  $sp^3$  типом гибридизации, отвечающей за механические свойства покрытия, и графитоподобной фазы с  $sp^2$  типом гибридизации, характеризующей электрические свойства покрытия. Преобладание той или иной фазы в пленке в значительной степени зависят от используемых методов осаждения, а также от концентрации связанного водорода. В зависимости от содержания кластеров в  $sp^3$  и  $sp^2$  гибридизированных состояниях, можно варьировать электронные и механические свойства формируемых пленок. Основные виды углеродных покрытий и их свойства приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства различных углеродных материалов [2]

Материал	$sp^3$ , %	H, ат., %	Твердость, ГПа
Алмаз	100	0	100
a-C:H (твердый)	30-40	20-40	10-30
a-C:H (мягкий)	40-60	40-50	<10
ta-C:H	60-70	30	30-50
ta-C	70-80	<10	50-80
Графит	0	0	

Мягкие a-C:H пленки, именуемые полимероподобными, обладают низкой твердостью и содержат ~50% водорода в пленке. Твердые a-C:H пленки, с меньшей концентрацией водорода и графитовой фазы называют алмазоподобными. Отличаются от полимероподобных большей твердостью, низким коэффициентом трения и высокой химической стойкостью. Та-C:H пленки с высокой долей алмазной фазы и содержанием водорода 20-30 % называют пленками аморфного гидрогенизированного тетраэдрального углерода. Наиболее твердыми являются пленки аморфного дегидрогенизованного тетрагонального углерода, ta-C, которые лишь немного уступают в твердости кристаллическому алмазу [2].

Твердость АПП определяется концентрацией  $sp^3$  атомов углерода. Но соотношение  $sp^3/sp^2$  принципиальным образом определяет твердость материала лишь в том случае, если в пленках отсутствует водород. С увеличением содержания водорода, увеличивается концентрация полимероподобных кластеров, которые приводят к снижению твердости пленок.

Как и любые материалы, алмазоподобные углеродные покрытия имеют свои недостатки: во-первых, высокие внутренние напряжения (~6 ГПа), которые приводят к недолговечности и невозможности создания пленок толщиной более 2 мкм; во-вторых, высокий коэффициент трения во влажной среде и, в-третьих, снижающаяся твердость при температурах выше 250 °С.

Для придания углеродным пленкам дополнительных свойств в структуру таких пленок внедряют атомы различных элементов, таких как N, Si, B, O, F и металлов, таких как Ti, W, Ni, Cu и др. Например, внедрение в структуру АПП азота N увеличивает гидрофильность и шероховатость пленок [3], что улучшает клеточную адгезию и биологическую совместимость. Добавление азота также уменьшает твердость покрытия, и изменяет оптические и электрические свойства АПП [4]. Включение в структуру АПП вольфрама W приводит к уменьшению коэффициента трения покрытия, увеличивая, тем самым, износостойкость материала [5]. Внедрение атомов бора в структуру АПП уменьшает шероховатость покрытия и способствует снижению внутренних напряжений [6]. Также внутренние напряжения можно незначительно снизить добавлением в структуру АПП серебра Ag [7]. Легирование титаном Ti позволяет повысить твердость пленок, при увеличении внутренних напряжений и коэффициента трения покрытий [8].

Снижение коэффициента трения в условиях влажной среды, подавление остаточных внутренних напряжений, а также повышение рабочей температуры при стабильной твердости достигается путем включения в структуру АПП оксида кремния Si:O. Такая структура получила название гидrogenизированного аморфного углерода легированного оксидом кремния или, используемый нами термин, алмазоподобные кремний-углеродные покрытия (АКУП). Данные покрытия обладают низкими внутренними напряжениями ( $<1$  ГПа), что позволяет создавать покрытия толщиной десятки микрон на подложках из практически любого материала, низким коэффициентом трения во влажной среде, а также стабильной твердостью в диапазоне 6 – 20 ГПа при температурах выше 250 °C [9]. Кремний-углеродные покрытия, как и АПП, могут быть легированы атомами различных элементов, в том числе металлов. Это позволяет изменять и придавать требуемые свойства пленкам, необходимыми для использования в той или иной области науки и техники.

В настоящей работе рассматривается осаждение кремний-углеродных покрытий из плазмы несамостоятельного дугового разряда с накали́нным катодом. Целью настоящей работы являлась оптимизация процесса осаждения кремний-углеродных покрытий, их формирование и исследование структуры, морфологии поверхности, химического и фазового состава, механических и трибологических свойств.

# ГЛАВА 1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ

## 1.1 Алмазоподобные кремний-углеродные покрытия (АКУП)

Включение в аморфную структуру гидрогенизированных алмазоподобных углеродных пленок оксида кремния ( $\text{Si:O}$ ) приводит к развитию нового класса материалов – гидрогенизированный аморфный углерод легированный оксидом кремния ( $\text{a-C:H:Si:O}$ ) или алмазоподобное кремний-углеродное покрытие (АКУП).

АКУП представляет собой полностью аморфную пленку, состоящую из двух взаимопроникающих решеток: решетки оксида кремния  $\text{SiO}_x$  и аморфной решетки гидрогенизированного углерода  $\text{a-C:H}$ . Такая структура обладает гораздо меньшими внутренними напряжениями ( $<1$  ГПа), и как результат, достигается хорошая адгезия к широкому перечню подложек. Кроме того, это дает возможность получать покрытия толщиной более 50 мкм [9].

Снижение остаточных сжимающих напряжений объясняется образованием связей  $\text{Si-C}$ , которые имеют большую длину, чем связь  $\text{C-C}$  ( $\text{Si-C}$  1,89 Å,  $\text{C-C}$  1,54 Å). Более того, АКУП обладает низким коэффициентом трения даже во влажной среде и стабильной твердостью при высоких температурах [9].

Термическая стабильность АКУП выше, чем у АПП. Это объясняется появлением четвертой координаты атомов кремния, стабилизирующих атомы углерода в состоянии  $\text{sp}^3$  гибридизации, препятствуя их превращению в состояние  $\text{sp}^2$  углерода при высокой температуре. Это означает, что энергия активации, требуемая для превращения  $\text{sp}^3$ -гибридизированных атомов углерода в состояние  $\text{sp}^2$  углерода в покрытии  $\text{a-C:H:Si:O}$  выше, чем в структуре гидрогенизированного аморфного углерода  $\text{a-C:H}$ . Это способствует улучшению термической стабильности кремний углеродных покрытий  $\text{a-C:H:Si:O}$  [9].



В целом, АКУП имеют достаточно хороший набор свойств:

- высокая твердость в диапазоне 6,0 ГПа – 20,0 ГПа;
- покрытия обладают высокой адгезией практически ко всем материалам: от металлов до керамики и от алмаза до пластмасс;
- покрытия достаточно эластичны и хорошо выдерживают многократный изгиб;
- коэффициент трения металл-покрытие находится в диапазоне 0,02 – 0,15, причем нижний диапазон характерен для вакуума;
- собственная шероховатость покрытия составляет 0,1-0,4 нм;
- покрытия чрезвычайно устойчивы к химическим воздействиям в широком интервале температур;
- удельное сопротивление с помощью легирования различными металлами может изменяться от  $10^{14}$  Ом·см до  $10^{-4}$  Ом·см;
- покрытия биосовместимы.

К перечисленным свойствам также можно добавить ряд оптических, электрофизических и биологических свойств, которые позволяют данным покрытиям находить применение во многих отраслях науки и техники.

Отличительной особенностью пленок является и то, что их матрицу можно легировать практически любыми металлами, при этом в матрице образуются, как правило, частицы новой фазы на основе металла размером от 1 до 5 нм [10]. Изменяя природу и концентрацию наночастиц, можно целенаправленно изменять физические свойства материала в целом.

## 1.2 Методы осаждения АКУП

Наиболее распространенным методом получения АКУП является метод усиленного плазмой химического осаждения и различные его модификации, такие как: плазмохимическое осаждение на постоянном токе (DC PACVD) [11, 12], высокочастотное плазмохимическое осаждение (RF PACVD) [13, 14], комбинированный метод плазмохимического и физического осаждения

(PACVD/PVD) [15]. Помимо перечисленных методов получения АКУП также применяют метод с использованием ионного источника с замкнутым дрейфом электронов [16], методы магнетронного распыления [17], метод дугового разряда [18], ионно-лучевое осаждение [19] и др. В качестве прекурсоров могут использоваться как смеси газов, например, силана и кислорода, так и жидкости, такие как гексаметилдисилоксан, гексаметилдисилан, полифенилметилсилоксан, смеси силоксана и силазана.

### 1.2.1 Плазмохимический метод осаждения на постоянном токе

В англ. литературе такой метод имеет название *plasma-assisted chemical vapor deposition (PA CVD)*. В процессе PACVD покрытие на подложке синтезируется в ходе химических реакций, активируемых электрическим разрядом в газовой фазе. Основное преимущество процесса PACVD заключается в том, что используются относительно низкие температуры подложек ( $< 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), достигаются лучшая покрывающая способность и адгезия, процесс лучше контролируется. Вместо тепловой энергии газы-реагенты активируются быстрыми электронами.

Другим преимуществом процесса PACVD является то, что часто достигаются более высокие скорости осаждения, чем в процессе обычного (термического) CVD. Это предоставляет большие возможности в выборе различных технологических параметров, хотя контролировать их оказывается сложнее.

Однако осаждение чистых материалов этим методом фактически невозможно (за исключением полимеров), поскольку почти все недесорбируемые газы удерживаются покрытием. Это одно из основных ограничений, которое иногда превращается в преимущество, как например, в случае нанесения аморфного кремния, содержащего  $\text{H}_2$ . Другой недостаток – сильное взаимодействие плазмы с растущей пленкой. Высокая скорость осаждения требует тщательной отладки реакционной установки.

Процесс PACVD характеризуется разложением реагентов в разряде в таких условиях, в которых они обычно остаются стабильными и не реагирующими, например, при низкой температуре. Основным механизмом разложения в плазме – диссоциация при столкновениях с быстрыми электронами. Ионизация и диссоциация приводит к тому, что скорости реакций в плазме значительно выше скоростей химических процессов в электрически нейтральной системе даже при высоких температурах [20].

В работе [11] Bendavid A. и др. получали АКУП методом плазмохимического осаждения на постоянном токе. В качестве рабочего газа выступала смесь газов аргона Ar и водорода H<sub>2</sub>. В качестве прекурсоров была использована смесь газов метана (CH<sub>4</sub>) и тетраметилсилана (Si(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, ТМС, 99,9% чистоты). Покрытия осаждались на подложку кремния и имели толщину 1,5 мкм.

В работе исследовалось влияние величины расхода  $\frac{Si(CH_3)_4}{Si(CH_3)_4+CH_4}$  (%) на структуру и свойства покрытий. Некоторые результаты исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства АКУП при различном расходе ТМС

№	$\frac{Si(CH_3)_4}{Si(CH_3)_4+CH_4}$ , %	Концентрация атомов элементов	$v_{осаж}$ , мкм/ч	$sp^3$ связи, %	H, ГПа	$\sigma$ , ГПа
1	0	96,8% C 3,2% O	2,8	30	14	1,53
2	4	93% C 4% Si 3% O	3,1	36	12,4	1,1
3	9	87,3% C 9,6% Si 3,1% O	3,55	47	12,2	1,05
4	13	83,8% C 12,7% Si 3,5% O	3,75	55	12.1	1
5	17	72,4% C 22,6% Si 5% O	3,9	-	12	<1

где  $v_{осаж}$  – скорость роста пленки, H – твердость пленки,  $\sigma$  – внутренние напряжения

Как видно из табл.2 с увеличением расхода  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  характеристики покрытий улучшаются, за исключением твердости. Увеличение скорости роста пленок объясняется более низким потенциалом ионизации  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  в сравнении с более высоким потенциалом ионизации  $\text{CH}_4$  в плазме. В статье представлена линейная зависимость доли  $\text{sp}^3$  от содержания кремния в пленке. Увеличение доли  $\text{sp}^3$  связей объясняется тем, что при увеличении расхода  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  увеличивается концентрация водорода в покрытии, что приводит к полимерному формированию  $\text{sp}^3$  C-H связей, которые изменяют соединительные ограничения  $\text{sp}^3$  связей углерода. Твердость покрытия определяется количеством  $\text{sp}^3$  связей углерода в пленке. Однако в данном случае снижение твердости покрытия объясняется тем, что увеличение концентрации водорода приводит к формированию полимерных  $\text{sp}^3$  C-H связей, ограничивающих  $\text{sp}^3$  связи углерода, и как результат, так же снижаются и внутренние напряжения в пленке. Также снижение внутренних напряжений объясняется, как было сказано в начале главы, образованием более длинных связей Si-C по сравнению с длиной связи C-C.

Авторы работы [12] Fujimoto S. и др. так же получали АКУП методом плазмохимического осаждения на постоянном токе. Пленки формировались в среде аргоновой плазмы, в качестве прекурсора выступала смесь газов ацетилена ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) и тетраметилсилана ( $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$ , ТМС). Покрытия толщиной 1 мкм осаждались на подложку кремния.

В работе исследовалась зависимость механических и трибологических свойств от величины импульсного напряжения на подложку и величины расхода  $\frac{\text{Si}(\text{CH}_3)_4}{\text{Si}(\text{CH}_3)_4 + \text{C}_2\text{H}_2}$  (%). Покрытия получали при импульсных напряжениях смещения: -2 кВ, -2,5 кВ, -3кВ и -5 кВ. Пленки с лучшими характеристиками были получены при импульсном напряжении -5 кВ, поэтому дальнейшие результаты будут представлены именно для данного значения напряжения. Результаты исследований приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства АКУП при различном расходе  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  при напряжении -5 кВ

№	$\frac{\text{TMC}}{\text{TMC} + \text{C}_2\text{H}_2}$ , %	Si, %	H, ГПа	$\mu$
1	0	0	16	0,14
2	10	7,5	15,7	0,1
3	20	13	16,8	0,08
4	30	17	18,5	0,07
5	40	22	17,2	0,06

где H – твердость покрытия,  $\mu$  – коэффициент трения покрытия

Твердость пленок при напряжении -2 кВ снижается с 16 ГПа до 12 ГПа. Это связано с формированием полимерных  $\text{sp}^3$  C-H связей. Но при напряжении пульсации -5 кВ твердость покрытий увеличивается, что объясняется наличием более интенсивной ионной бомбардировкой растущего покрытия, которое уплотняет пленку и способствует увеличению твердости. Коэффициент трения с увеличением расхода  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  уменьшается, т.к. увеличивается содержание кремния в пленке. С увеличением содержания кремния увеличивается количество связей Si-OH, которые, как сообщается в работе [21], адсорбируют на поверхности пленки воду, играющей роль смазки.

### 1.2.2 Метод высокочастотного плазмохимического осаждения

В англ. литературе принято данный метод обозначать аббревиатурой *RF (radio frequency) PA CVD*. Основой высокочастотной (ВЧ) генерации разряда с полым катодом является частотно-модулированное постоянное напряжение  $V_s$  (самосмещение) в слое пространственного разряда у ВЧ электрода на частоте 13,56 МГц. ВЧ плазма играет роль виртуального анода, а слой пространственного заряда похож на область катодного падения в разряде с постоянным током. В системе с ВЧ полым катодом подложки окружены слоем пространственного заряда, который вызывает ионную

бомбардировку пленки в ходе её нанесения. В данное время высокочастотный тлеющий разряд широко используется в промышленности, но до сих пор существует проблема нанесения покрытий на подложки большой площади с высокой однородностью толщины покрытий [20].

В работе [13] Kumar N. и др. для получения АКУП использовали метод высокочастотного плазмохимического осаждения. В качестве рабочего газа авторы использовали инертный газ аргон. В роли прекурсора использовалась смесь метана ( $\text{CH}_4$ ) и гексаметилдисилоксана ( $\text{C}_6\text{H}_{18}\text{OSi}_2$ , ГМДСО). Покрытия осаждались на подложку из нержавеющей стали 316.

Эксперименты проводились при разных значениях напряжения смещения: -25, -100, -175, -225 В. Результаты исследований приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристика АКУП при различных напряжениях самосмещения

№	$U_s, \text{В}$	$I_D/I_G$	$H, \text{ГПа}$	Концентрация атомов элементов, %	$\mu$
1	-25	0,45	3,8	50 % C 35 % O 15% Si	~ 0,2
2	-100	0,1	5	65% C 22% O 13% Si	< 0,05
3	-175	0,08	7,5	80% C 12% O 8% Si	0,1
4	-225	0,06	12	83% C 11% O 6% Si	0,15

где  $H$  – твердость покрытия,  $\mu$  – коэффициент трения

Увеличение доли  $sp^3$  связей объясняется тем, что при увеличении значения напряжения самосмещения увеличивается концентрация водорода, который приводит к формированию полимерных  $sp^3$  соединений С-Н. Твердость покрытий увеличивается за счет интенсивной ионной бомбардировки растущей пленки, приводящей к уплотнению покрытия. Коэффициент трения очень низкий при напряжении самосмещения -100 В. Это связано с образованием t-аС с а-С и  $sp^2$ -гибридизированными связями

фракций атомов углерода. t-aC способствует низким поверхностным энергиям, а a-C и  $sp^2$  гибридный углерод характеризуют легкое скольжение в приоритетном направлении. При меньшей доли  $sp^3$  фазы коэффициент трения более высок, чем в пленках, осажденных при -25 В из-за высокой плотности в плоскости свисания  $\pi$ - $\pi$  углеродных связей. Однако в случае увеличения доли  $sp^3$  фазы, высокая плотность  $sp^3$  связей вызывает химическую блокировку скользящей поверхности из-за взаимодействия  $\sigma$ - $\sigma$  ковалентных связей. Также низкий коэффициент трения объясняется наличием SiO-(H) и SiO<sub>2</sub>, обеспечивающие граничную смазку.

В работе [14] Nakazawa H. и др. также получали покрытия методом RF PACVD. Плазмообразующим газом являлся аргон. В качестве прекурсора использовались метан CH<sub>4</sub> и монометилсилан (CH<sub>3</sub>SiH<sub>3</sub>, MMC). Пленки толщиной 300 нм осаждались на подложки из кремния Si и арсенида галлия GaAs.

В данной работе исследовалось влияние частоты импульсов смещения на подложку на структуру и свойства АПП и АКУП. Авторы сравнивали свойства чистых АПП и АКУП, полученных при постоянном смещении на подложку -500 В и различных значениях частоты смещения (5-50 кГц) на подложку. Результаты исследований показаны в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнительная характеристика АПП и АКУП, полученных при различных частотах смещения

	f, кГц	$\frac{Si}{Si+CH_4}$ , %	$v_{осаж}$ , нм/ч	$\sigma$ , ГПа	$\mu$	W, мм <sup>3</sup> /(Н·м)
АПП	DC	-	325	1,8	0,17	$6 \cdot 10^{-7}$
АКУП		15	460	1	0,06	$1,4 \cdot 10^{-6}$
АПП	5	-	75	1,3	0,14	$4 \cdot 10^{-7}$
АКУП		21,5	350	0,6	0,05	$1,1 \cdot 10^{-6}$
АПП	10	-	150	1,35	0,15	$3 \cdot 10^{-7}$
АКУП		21	360	0,85	0,06	$1,1 \cdot 10^{-6}$
АПП	20	-	210	1,4	0,15	$2 \cdot 10^{-7}$
АКУП		19	410	0,9	0,05	$8 \cdot 10^{-7}$
АПП	50	-	250	1,55	0,14	$< 1 \cdot 10^{-7}$
АКУП		19	450	1	0,05	$5 \cdot 10^{-7}$

где f – частота пульсаций,  $v_{осаж}$  – скорость осаждения пленки,  $\sigma$  – сжимающие напряжения,  $\mu$  – коэффициент трения, W – степень износа покрытия

С уменьшением частоты импульсов наблюдается уменьшение скорости осаждения покрытия. Это связано с тем, что ионная бомбардировка ослабляется с увеличением скважности. Увеличение скорости осаждения АКУП по сравнению с АПП связано с различными энергиями диссоциации  $\text{CH}_4$  и  $\text{CH}_3\text{SiH}_3$ . Энергии диссоциации  $\text{CH}_3\text{SiH}_3$  ниже, чем  $\text{CH}_4$ , поэтому молекулы  $\text{CH}_3\text{SiH}_3$  диссоциируют легче. Снижение остаточных сжимающих напряжений объясняется образованием связей Si-C, которые имеют большую длину, чем связь C-C (Si-C 1,89 Å, C-C 1,54 Å). При увеличении частоты увеличивается количество связанного водорода в покрытиях, что также снижает внутренние напряжения. Низкие коэффициенты трения связаны с образованием гелеподобного кремния, который служит как смазка. Также снижение коэффициента трения при увеличении частоты является результатом увеличения концентрации водорода в пленках, образующих связи SiO-(H) и  $\text{SiO}_2$ , обеспечивающие граничную смазку. Увеличение степени износа АКУП по сравнению с АПП объясняется включением кремния, который приводит к уменьшению твердости покрытия, а следовательно, и к уменьшению износостойкости. При увеличении частоты уменьшается содержание кремния, что ведет к уменьшению степени износа покрытия.

### **1.2.3 Комбинированный метод плазмохимического и физического осаждения**

Комбинированный метод получения объединяет в себе метод физического газофазного осаждения (*physical vapor deposition, PVD*), обычно магнетронного распыления, и метод плазмохимического осаждения (*PA CVD*).

Магнетронное распыление мишени широко распространено в промышленности и является одним из ионно-плазменных методов осаждения.



В магнетронных распылительных системах распыление материала происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда. Электроны, эмитируемые с мишени под действием бомбардировки, захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям в скрещенных электрическом и магнитном полях. За счет локализации плазмы у поверхности катода достигается высокая плотность ионного тока (на два порядка выше, чем в обычных диодных системах) и большая удельная мощность, рассеиваемая на мишени. Увеличение скорости распыления с одновременным снижением рабочего давления позволяет значительно снизить загрязнения пленок посторонними включениями. Локализация электронов вблизи мишени предотвращает бомбардировку ими подложек, что снижает температуру и радиационные дефекты в создаваемых структурах. Однако главными достоинствами магнетронных распылительных систем являются относительно высокие скорости осаждения и возможность получения равномерных по толщине пленок на подложках большой площади [20].

Kyoung-Hoon Eg и Myoung-Gi So в своей работе [15] получали АПП и АКУП комбинированным РА PVD/CVD методом. Покрyтия осаждались на кремниевую подложку с использованием магнетронно-распылительной системы. В плазме аргона происходило разложение смеси газов метана ( $\text{CH}_4$ ) и моносилана ( $\text{SiH}_4$ ), с помощью ВЧ магнетрона распылялась графитовая мишень высокой чистоты (99,99%). Осажденные пленки имели толщину ~500 нм.

Авторы статьи получали пленки с различным содержанием кремний (0, 7, 15 %) и исследовали их термическую устойчивость при температурах 200-700 °С. Отжиг пленок проводился в открытой ламповой печи.

Проведенные исследования показали, что при 400 °С толщина АПП уменьшилась с 500 нм до 300 нм, а при 500 °С пленка полностью исчезла. Авторы статьи объясняют это тем, что при отжиге кислород из воздуха

адсорбируется в поверхности пленки, образуя диоксид углерода  $\text{CO}_2$ , который затем выделяется с поверхности пленки. Так же происходит потеря водорода при отжиге.

АКУП с содержанием кремния 7% сохранили толщину 80 нм на подложке после отжига при 700 °С. А АКУП с содержанием 15% Si сохранили до 300 нм толщины пленки после 700 °С отжига. Включение кремния в АПП способствует большему образованию  $\text{sp}^3$  связей углерода и стабилизирует структуру в целом, увеличивая температуру графитизации покрытия. При отжиге происходит реакция оксидирования, в результате которой образуется диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ , который играет роль барьерного слоя, препятствующий диффузии кислорода.

Коэффициенты трения для АПП и АКУП были 0,17 и 0,05 соответственно. Более низкий коэффициент трения АКУП возможен из-за образования  $\text{SiO}_2$  слоя, играющего роль смазки.

#### **1.2.4 Метод ионно-лучевого осаждения**

Нанесение покрытий также возможно и осаждением на подложку продуктов плазмохимических реакций в углеводородной плазме, образуемой с помощью ионного пучка, генерируемого автономным ионным источником. Привлекательность этого метода обусловлена тем, что ионные пучки более энергетичны, а многие ионные источники позволяют независимо контролировать траекторию ионов, их энергию и плотность [20].

Tamulevičienė A. и др. [16] осаждали АКУП ионно-лучевым методом с использованием ионного источника с замкнутым дрейфом электронов. В качестве осаждаемого материала использовался гексаметилдисилоксан ( $\text{C}_6\text{H}_{18}\text{OSi}_2$ , ГМДСО), а рабочим газом были  $\text{H}_2$  или He. Пленки осаждались на подложки монокристаллического кремний и кварца.

Исследовалось влияние энергии ионного пучка и плотности тока на структурные, механические и оптические свойства покрытия. Результаты исследований представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики АКУП покрытий

Прекурсор	Е, эВ	$j, \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$	d, нм	$v_{\text{осаж}}$ нм/мин	Н, ГПа
ГМДСО + He	800	0,1	194	8,6	10,8
ГМДСО + H <sub>2</sub>		0,1	245	8,2	7,8
ГМДСО + He	500	0,06	246	8,5	12,8
ГМДСО + H <sub>2</sub>		0,06	228	6,5	11,8
ГМДСО + He	300	0,04	210	3,5	5,8
ГМДСО + H <sub>2</sub>		0,035	160	2,9	8,7

где  $E$  – энергия ионного источника,  $j$  – плотность тока,  $d$  – толщина пленки,  $v$  – скорость роста пленки,  $H$  – твердость пленки

Как видно из табл.6, наиболее твердые пленки получились при энергии ионного источника 500 эВ. При данной энергии наблюдается наибольшее количество  $sp^3$  связей в покрытии, что обуславливает высокую твердость пленок. Толщина пленок увеличивается с увеличением энергии, т.к. увеличивается разложение  $C_6H_{18}OSi_2$  на ионы и активные частицы, которые затем осаждаются на подложке и формируют покрытие. Уменьшение толщины при энергии 800 эВ при использовании He обуславливается вторичным распылением покрытия атомами.

### 1.2.5 Несамостоятельный дуговой разряд с накали́нным катодом

В настоящей работе для получения АКУП использовался метод получения покрытий из плазмы несамостоятельного дугового разряда с накали́нным катодом.

Одним из типов дугового разряда является несамостоятельный дуговой разряд с накали́нным катодом. В данном разряде основным источником электронов с катода является термоэлектронная эмиссия, для чего катод искусственно разогревается от вспомогательного устройства. Электроны, испускаемые накали́нным катодом, способствуют возникновению и горению разряда. Почти все напряжение между его электродами приходится на

область вблизи катода, а остальное пространство камеры заполняется однородной плазмой, имеющей потенциал анода. Испущенные накалившимся катодом электроны вылетают с почти одинаковыми скоростями и ионизируют газ, образуя плазму, которая заполняет остальной объем. Ионизация осуществляется прямыми и ступенчатыми ударами. Дуговой разряд данного типа позволяет получать однородную газоразрядную плазму с высокой плотностью в объемах до нескольких кубических метров.

Метод получения покрытия заключается в создании кремний-углеродсодержащей плазмы посредством смеси паров полифенилметилсилоксанового (ПФМС) прекурсора и аргона. Ионизация рабочего газа происходила за счет термоэлектронной эмиссии с накалившегося катода. За счет смещения, подаваемого на подложку, формировалось покрытие, содержащее решетку гидрогенизированного аморфного углерода (a-C:H), стабилизированного водородом и решетку кремния, стабилизированного кислородом (Si:O).

### **Вывод к разделу**

Из проведенного литературного обзора видно, что существует много способов синтеза АКУП, из которых наиболее распространенные PACVD и различные его модификации, а также комбинированный PVD/CVD. На сегодняшний день ведутся активные работы по получению АКУП различными методами, каждый из которых имеет достоинства и недостатки.

АКУП представляет собой гидрогенизированный аморфный углерод (a-C:H), легированный оксидом кремния ( $\text{SiO}_x$ ). За счет возможности получения на основе a-C:H материалов, близких по своим механическим свойствам к природному алмазу, а включение в их структуру атомов Si, позволяющих избавиться от ряда недостатков a-C:H, а также возможность легировать АКУП практически любыми металлами, что позволяет изменять свойства

АКУП в широких диапазонах, такие материалы приобрели большой интерес в современном мире. Уникальные свойства и множество способов получения таких материалов позволяет использовать АКУП практически во всех сферах науки и техники.

Кремний-углеродные пленки, получаемые из плазмы несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом, обладают хорошими характеристиками за счет некоторых особенностей используемого метода: присутствие ионной бомбардировки растущей пленки, стимулирующей различные процессы на растущей поверхности, и наличие натекающей паровой фазы и его нагрев до высоких температур, способствующий переходу ПФМС из жидкой фазы в паровую. Совокупность особенностей этого метода позволяет получить покрытия, способные не уступать свойствам аналогичных покрытий, полученных другими методами, а в некоторых моментах даже превосходить их.

## **ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

### **2.1 Методика исследования параметров образующейся плазмы и методы исследования алмазоподобных кремний-углеродных покрытий**

#### **2.1.1 Методика определения плотности ионного тока, концентрации плазмы и электронной температуры**

В связи с тем, что одним из определяющих параметров в процессе роста покрытия являлась ионная бомбардировка, необходимо было найти такое расположение подложки в пределах вакуумной камеры, в котором ионное воздействие было бы максимально-допустимым. Ключевая роль ионного воздействия заключается в бомбардировке поверхности алмазоподобного покрытия в процессе роста частицами с гипертермальными (десятки и сотни электрон-вольт) энергиями. Еще в 50-х годах теоретически было показано, что энергии порядка 100 эВ достаточно для кратковременного ( $7 \cdot 10^{-11}$  с) локального (в области размером  $\sim 1$  нм) повышения температуры и давления на поверхности до 3823 К и  $1,3 \cdot 10^{10}$  Па соответственно. Подобные условия - переход в область термодинамической стабильности алмаза (высокие давление и температура) и последующая закалка - создаются при искусственном получении кристаллов алмаза, например, взрывным методом. Необходимая энергия может также передаваться атомам углерода, адсорбированным на поверхности а-С пленки, посредством столкновений с ускоренными ионами инертного газа, например, аргона. Таким образом, для формирования а-С или а-С:Н пленки с высоким содержанием алмазоподобной компоненты необходимо, чтобы на каждый осажденный атом углерода приходилась энергия около 100 эВ. Дальнейшее повышение энергии частиц вплоть до 1000÷2000 эВ приводит к увеличению доли графитоподобного углерода в покрытии. Это существенно уменьшает прозрачность пленки, но практически не сказывается на ее механических свойствах.

Для достижения поставленной цели использовался метод электрических зондов Ленгмюра [22]. В настоящей работе использовался одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра диаметром 1мм.

Для снятия вольт-амперной характеристики (ВАХ) на зонд подается потенциал, отличный от потенциала плазмы. В зависимости от знака потенциала на зонде, к нему притягиваются электроны или положительные ионы. Тип и концентрация частиц, которые притягиваются к зонду, определяют ток на зонд: ионный или электронный. По полученным значениям тока и известным значениям напряжения строится ВАХ зонда. Типичная ВАХ зонда показана на рис.1.

Значение плавающего потенциала зонда определяется по пересечению ВАХ с осью абсцисс, т.е. это такая точка на графике, в которой ток равен 0. Потенциал плазмы определяется путем проведения касательных к областям II и III, значение напряжения в этой точке и будет являться потенциалом плазмы.

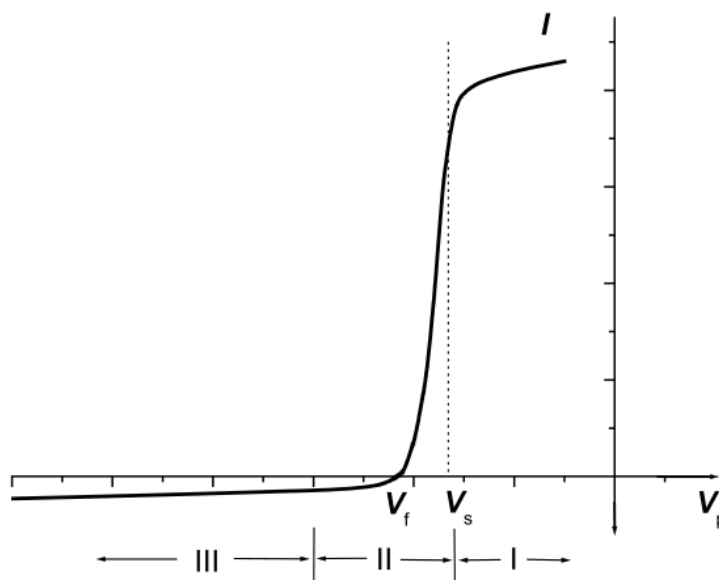


Рисунок 1 – Типичная зондовая характеристика [22],  
I – область электронного тока насыщения,  
II – Область тока электронов и ионов,  
III – Область ионного тока насыщения

Для определения температуры электронов в плазме электронная составляющая ВАХ переводится в логарифмическую зависимость тока

электронов от напряжения  $\ln I_e(V)$ . Затем к графику проводится касательная, наклон которой и отражает величину электронной температуры (рис.2).

$$\frac{1}{T_e} = -\frac{k}{e} \frac{d \ln I_e}{dV},$$

где  $\frac{d \ln I_e}{dV}$  – угол наклона касательной.

Концентрацию электронов рассчитывают после нахождения температуры по формуле:

$$n_0 = \frac{I_e}{eS} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{kT_e}},$$

где  $I_e$  – электронный ток насыщения,  $S$  – площадь поверхности зонда.

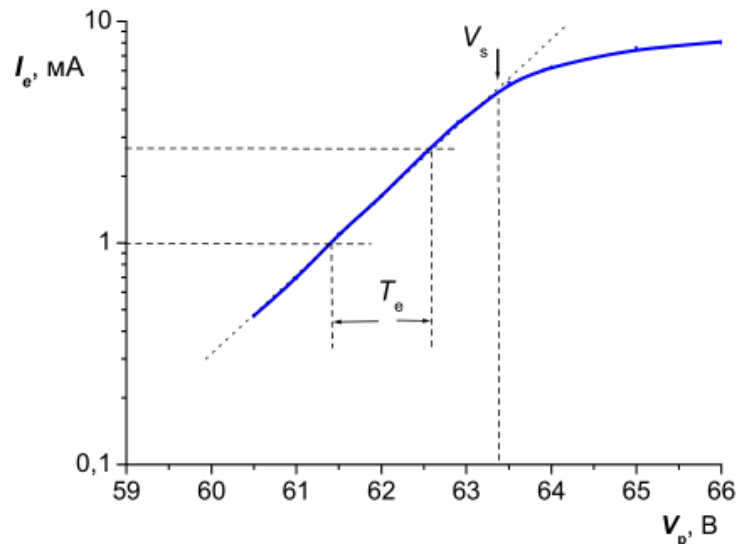


Рисунок 2 – Определение температуры электронов  $T_e$  [22]

Ионный ток на зонд определяется формулой Бома:

$$I_+ \approx 0,4 en_0S \sqrt{\frac{2kT_e}{M}},$$

где  $S$  – площадь поверхности зонда,  $M$  – молярная масса иона.



## 2.1.2 Исследование фазового состава методом Рамановской спектроскопии

Спектроскопия комбинационного рассеяния основана на взаимодействии монохроматического излучения с веществом, сопровождающегося изменением энергии рассеянного излучения по сравнению с энергией падающего на объект излучения. Комбинационное рассеяние обусловлено неупругими столкновениями фотонов с молекулами (или ионами), в ходе которых они обмениваются энергией. По изменению энергии фотона можно судить об изменении энергии молекулы, т.е. о переходе ее на новый энергетический уровень [23].

Полученные кремний-углеродные покрытия исследовались с помощью рамановского спектрометра комплекса Centaur U HR. Для этого использовались образцы пленок толщиной от 1 – 3 мкм на арсениде галлия. Рамановский спектр получался с помощью 532-нм  $\text{Ar}^+$  лазера, сфокусированного в пучок диаметром 50 мкм мощностью 10 мВт. Спектры записывались в диапазоне  $800 \div 1800 \text{ см}^{-1}$  с разрешением  $1.5 \text{ см}^{-1}$ . С помощью программы ORIGIN полученные спектры разбивались на две гауссианы, с максимумами в области  $1500 \div 1600 \text{ см}^{-1}$  (*G*-пик) и  $1300 \div 1400 \text{ см}^{-1}$  (*D*-пик), показанными на рис. 3.

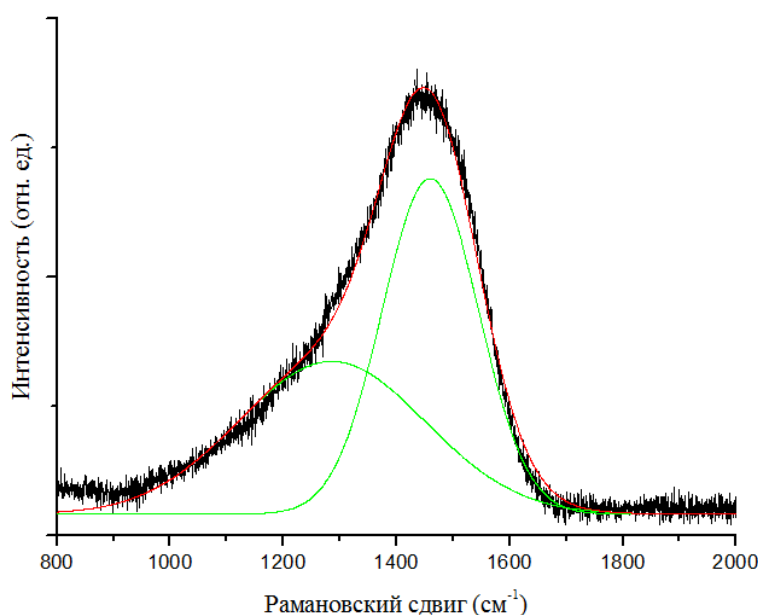


Рисунок 3 – Разбитие рамановского спектра на гауссианы

### 2.1.3 Исследование структуры методом ИК-Фурье спектроскопии

Фурье-спектрометр представляет собой модифицированный дополнительными устройствами, в частности подвижным зеркалом и другими сервисными функциями интерферометр Майкельсона.

Свет от источника (рис.4 позиция 1) или белый свет от источника, прошедший через образец разделяется на два когерентных пучка с помощью полупрозрачного плоскопараллельного зеркала – светоделителя (рис.4 позиция 2). Один пучок направляется к неподвижному плоскому зеркалу (рис.4 позиция 3) и отражается от него на светоделитель, другой идет к плоскому подвижному зеркалу (рис.4 позиция 4), позволяющему менять разность хода лучей, и также возвращается, на светоделителе они соединяются. Эти два когерентных пучка интерферируют между собой, в результате чего они могут либо усиливать, либо ослаблять друг друга в зависимости от разности хода между ними. Степень ослабления или усиления интенсивности для различных длин волн зависит от разности хода лучей в пучках [24].

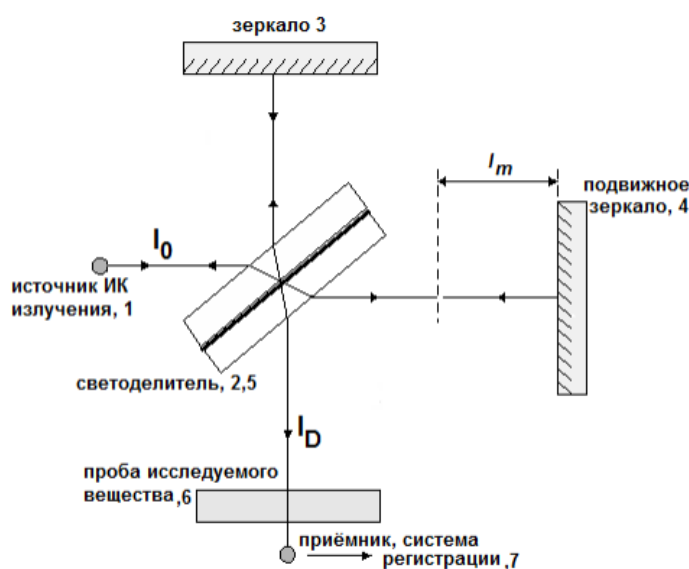


Рисунок 4 – Схема интерферометра Майкельсона [24]

В данной работе для анализа структуры кремний-углеродных пленок использовался ИК-Фурье спектрометр ФСМ2201. Спектры регистрировались в диапазоне  $400\div 8000\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $4\text{ см}^{-1}$ .

#### 2.1.4 Исследование морфологии поверхности методом атомно-силовой микроскопии

Для исследования морфологии поверхности пленок зачастую используют атомно-силовую микроскопию. В основе АСМ лежат Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия. Взаимодействие происходит между зондом и поверхностью образца. Рисунок 5 изображает схему кантилевера АСМ, с помощью которого производится исследование поверхности образца. В данном методе исследования регистрируется величина изгиба консоли, которая возникает под действием силы, направленной со стороны поверхности на зонд.

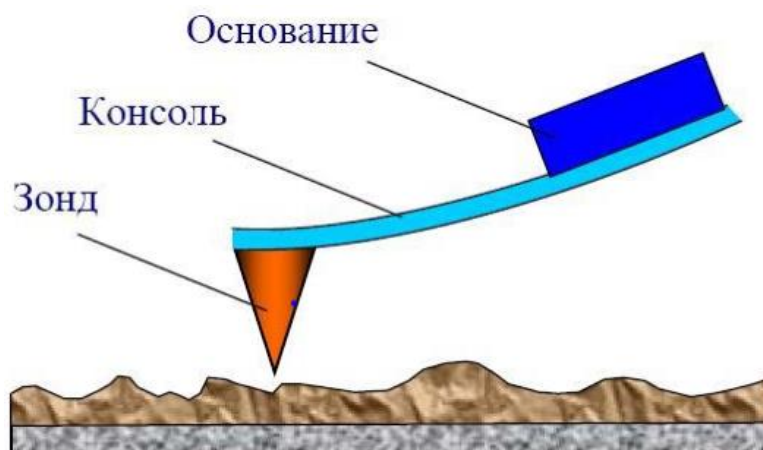


Рисунок 5 – Изображение зондового датчика [10]

Атомно-силовой микроскоп имеет 3 режима работы:

1. Контактный режим;
2. Бесконтактный режим;
3. Полуконтактный режим.

При контактном режиме расстояние от иглы до образца составляет порядка нескольких десятых нм. Таким образом, игла находится в мягком

физическом контакте с образцом и подвержена действию сил отталкивания. В этом случае взаимодействие между иглой и образцом заставляет консоль изгибаться, повторяя топографию поверхности.

При бесконтактном режиме (режиме притяжения) консоль с помощью пьезокристалла колеблется над изучаемой поверхностью с амплитудой  $\sim 2$  нм, превышающей расстояние между зондом и поверхностью. По изменению амплитуды или сдвигу резонансной частоты колебаний в ходе сканирования поверхности определяется сила притяжения и формируется изображение поверхности. Полуконтактный режим аналогичен бесконтактному режиму с тем отличием, что игла консоли в нижней точке своих колебаний слегка касается поверхности образца [10].

В настоящей работе морфология поверхности кремний-углеродных покрытий исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа Solver P47 (АСМ кантилевер NSG 10) в полуконтактном режиме.

### **2.1.5 Исследование химического состава методом энергодисперсионного анализа**

Для исследования химического состава полученных покрытий использовался энергодисперсионный анализ рентгеновских лучей с помощью растрового электронного микроскопа Philips SEM 515, оснащенного микроанализатором элементного состава EDAX ECON IV. Метод позволяет получить информацию не только о химическом составе, но и дает картину поэлементного распределения материала по всему объему образца.

Метод заключается в бомбардировании исследуемого образца высокоэнергетическими электронами (1-50 кэВ, обычно 10-15 кэВ), в результате чего с поверхности образца происходит эмиссия рентгеновского излучения. Эмиссия рентгеновского излучения - это явление, обусловленное возбуждением внутренних оболочек падающими электронами, т.е., когда электрон с внутренней оболочки переходит на более высокий энергетический

уровень, вакансия на внутренней оболочке заполняется электроном с более высокого энергетического уровня, что приводит к эмиссии характеристического рентгеновского излучения с энергией, равной разности энергии этих двух энергетических уровней. Поскольку характеристическое рентгеновское излучение имеет конкретную энергию, соответствующую каждому элементу, то, измеряя энергию пика излучения, можно проводить идентификацию элементов [10].

### 2.1.6 Исследование механических свойств АКУП

Для определения твердости покрытий использовался метод наноиндентирования. В данной работе исследования твердости пленок проводилось с помощью наноиндентора NanoTest 600 (MicroMaterials, Великобритания).

Метод наноиндентирования заключается во вдавливании индентора с алмазным наконечником с действующей на него постоянной заданной нагрузкой в приповерхностный слой материала (рис.6) и определения толщины этого слоя [25].

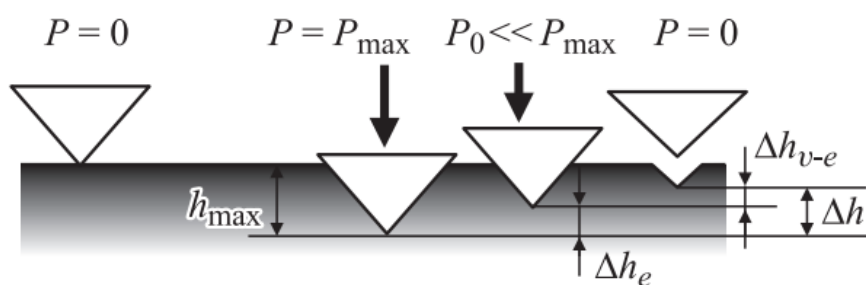


Рисунок 6 – Профиль поверхности до и после индентирования [25]

В работе использовался алмазный индентор Берковича с радиусом при вершине 100-500 нм. Максимальная и минимальная нагрузки для «наномаятника» составляют 0,1 и 500 мН соответственно. Твердость покрытия определялась по методу Оливера-Фарра [26] из соотношения:

$$H = \frac{P_{max}}{A},$$

где  $P_{max}$  – максимальная приложенная нагрузка,  $A$  – площадь контакта индентора с образцом, вычисляемая из формулы:

$$A = 24,5h_c^2 + C_1h_c,$$

где  $C_1=1,65 \cdot 10^{-6}$  – константа, описывающая отклонение от идеальной геометрии пирамидки Берковича из-за закругления острия, а  $h_c$  – глубина контакта индентора с образцом:

$$h_c = h_{max} - 0,75 \frac{P_{max}}{S},$$

Здесь  $h_{max}$  – максимальная глубина проникновения индентора,  $S$  – контактная жесткость материала.

Исследования коэффициента трения и степени износа покрытий проводилось с помощью трибометра (CSEM, Швейцария) в геометрии диск-штифт. Измерения проводились при комнатной температуре и влажности 50%. В качестве контр-тела использовался шарик из сплава карбида вольфрама и кобальта (ВК), имеющий диаметр 3 мм. Диаметр трека 5 мм, скорость вращения – 5 см/с, нагрузка – 5 Н, дистанция до остановки – 100 м.

Принцип измерения заключается в следующем. Индентор, плоской или сферической формы, прижимается к образцу с заданной постоянной нагрузкой. Штифт устанавливается на жестком рычаге, имеющим датчик силы без трения. При вращении образца, между штифтом и образцом возникает сила трения, измеряемая датчиками [27].

Объем износа материала покрытия рассчитывались из количества материала удаленного во время теста за счет трения и износа после проведения профилометрии образовавшегося трека с помощью лазерного оптического профилометра Micro Measure 3D Station (Stil, Франция).

Внутренние напряжения в пленках определялись методом Стоуни [28]. Для этого кремний-углеродные покрытия наносились на подложки из арсенида галлия длиной 2 см, шириной 2 мм и толщиной 0.6 мм. Изгиб полосок из арсенида галлия фиксировался с помощью лазерного оптического профилометра MicroMeasure 3D Station (Stil, Франция).

Величина напряжений рассчитывается по формуле Стоуни:

$$\sigma = \frac{Eh^2\delta}{6d(1-\mu)},$$

где E – модуль Юнга, h– толщина пластинки,  $\delta$  – смещение консоли, d – толщина пленки,  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

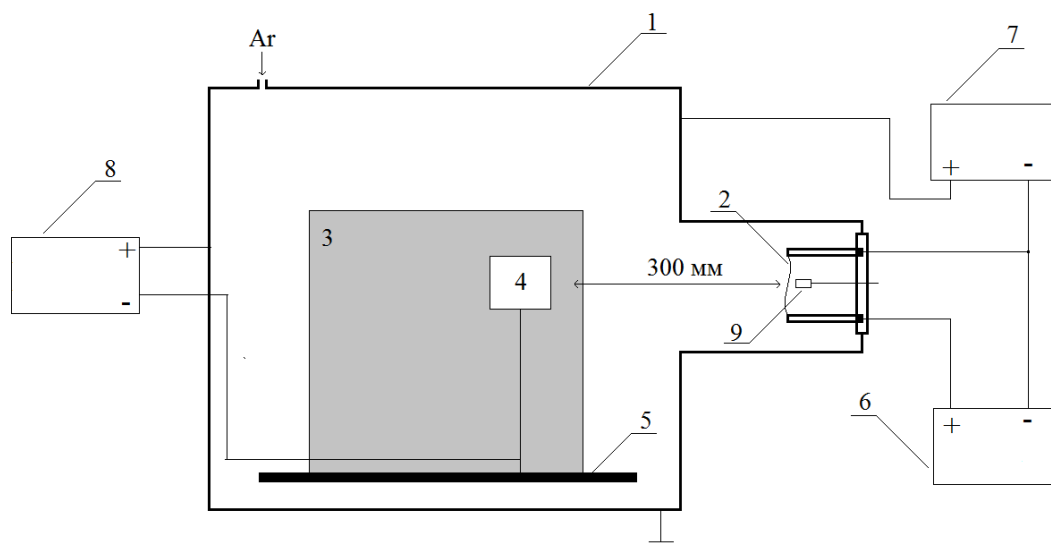
## 2.2 Экспериментальная установка для осаждения АКУП покрытий

Для осаждения АКУП использовалась вакуумная установка ННВ-6, состоящая из следующих основных узлов:

- рабочая камера;
- система откачки;
- система водоохлаждения;
- механизм вращения;
- источники питания;
- технологический источник.

Рабочая камера имеет размеры 600х600 мм. Внутри рабочей камеры (рис. 7 позиция 1) находится держатель образца (рис.7 позиция 4) и плазмогенератор, состоящий из накаливаемого катода (рис.7 позиция 2) и источника паровой фазы (рис.7 позиция 9).

Подложкодержатель закреплен на вращающемся столике (рис.7 позиция 5), оборудованном экраном (рис.7 позиция 3). Такая конструкция позволяет изолировать подложку от нестабильного потока плазмы во время тренировки плазмотрона.



*Рисунок 7 – Схема вакуумной камеры.  
 1 – рабочая камера, 2 – накаливаемый катод, 3 – экран,  
 4 – подложкодержатель, 5 – вращающийся столик,  
 6 – источник электропитания нагрева, 7 – источник электропитания разряда,  
 8 – высокочастотный источник напряжения смещения,  
 9 – источник паровой фазы*

Вакуумная установка основана на турбомолекулярном насосе ТМН 01АБ-1500-004, со скоростью откачки 720 л/с. Для измерения вакуума использовался термопарно-ионизационный вакууметр ВИТ-3 с термопарным преобразователем ПМТ-2 и ионизационным преобразователем ПМИ-51, работающие в диапазонах давлений  $666 \div 10^{-1}$  Па и  $10^{-1} \div 10^{-5}$  Па, соответственно. Расход рабочего газа аргона регулировался с помощью аналогового электронного регулятора РРГ-10 с расходом рабочего газа 18 л/мин.

### **2.3 Технологический источник и источники питания**

Для формирования плазмы использовался плазмогенератор на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом (рис. 8). Основным отличием используемого плазмогенератора от других источников газовой плазмы с накаливаемым катодом является наличие источника паровой фазы.



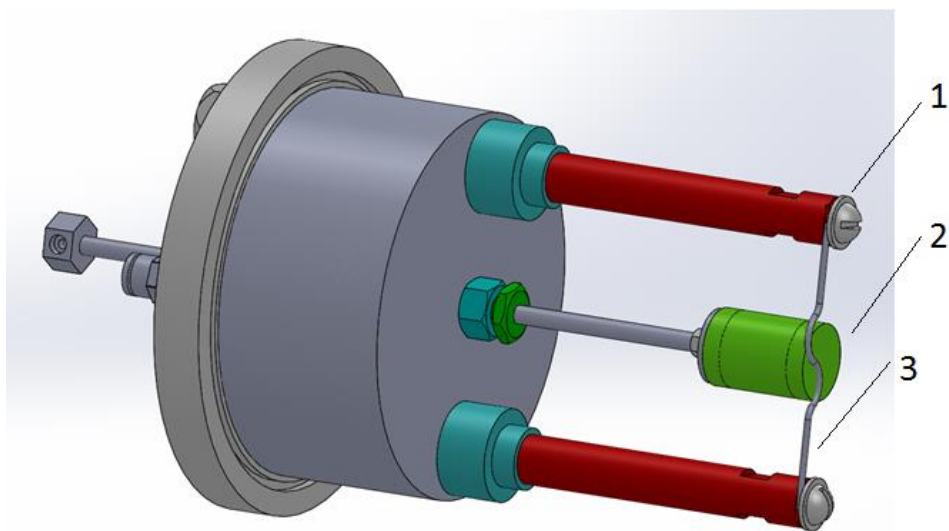


Рисунок 8 – Плазмогенератор на основе несамостоятельного дугового разряда.  
 1-электроды, 2-источник паровой фазы, 3-вольфрамовая нить (термокатод)

Термокатод служит не только как источник электронов, способствующих формированию плазмы, но и нагревателем посредством излучения источника паровой фазы (далее натекатель). При достижении натекателем необходимой температуры ( $\sim 300-700$  °С), осуществлялась непрерывная подача ПФМС и переход в паровую фазу за счет контакта с натекателем нагретым до высокой температуры. В плазме аргона молекулы ПФМС распадаются на отдельные атомы и радикалы, которые формируют покрытие.

Для осаждения АКУП использовались 3 источника питания:

1. источник электропитания накала (рис.7 позиция 6);
2. источник электропитания разряда (рис.7 позиция 7);
3. высокочастотный источник смещения (рис.5 позиция 8).

Источник питания накала необходим для нагрева катода, эмитирующего электроны в рабочей камере. От источника питания к вольфрамовому катоду прикладывается напряжение  $U_n = 6-8$  В при величине тока накала  $\sim 42$  А.

Электроны, эмитируемые с термокатада, обладают низкой энергией и не способны ионизовать атомы рабочего газа. Благодаря источнику разряда электроны, покинувшие термокатод, приобретают энергию  $\sim 100$  эВ, которой

достаточно для процесса ионизации атомов рабочего газа Ar в камере. Напряжение горения  $U_{гор} = 100-170$  В, ток разряда  $I_{раз} = 5-10$  А.

Напряжение смещения на подложке  $U_{смещ} = 0 \div -300$  В, частота  $f = 13,56$  МГц. При подаче высокочастотного потенциала на подложку за счет разницы в площадях держателя образца и корпуса установки, а также из-за различия в подвижностях электронов и ионов на подложке формируется постоянное отрицательное напряжение смещения. Это способствует увеличению интенсивности ионной бомбардировки растущей пленки. Бомбардировка ионами аргона поверхности растущей пленки стимулирует различные атомные процессы, такие как поверхностная диффузия, образование дефектов, вторичное распыление осажденного материала. Вклад этих процессов определяется напряжением смещения на подложке, т.е. энергией бомбардирующих ионов, и влияет на структуру выращиваемых пленок [9].

## **ГЛАВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

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

#### **4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

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

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определённый товар или услуга.

Получение алмазоподобных кремний-углеродных покрытий позволяют повысить срок службы промышленных механизмов, медицинский инструментов, отдельных деталей машин в несколько раз. Возможность легирования таких покрытий атомами различных металлов позволяет менять свойства покрытий в широком диапазоне.

Потенциальными потребителями готовой продукции являются различные промышленные предприятия, медицинская отрасль, космонавтика, кораблестроение и др.

#### **4.1.2 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.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

В качестве конкурентов будут выступать твердые пленки нитрида титана и алмазоподобные углеродные пленки. Оценочная карта данного анализа приведена в таблице 11.

Таблица 11 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		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.Повышение производительности труда пользователя	0,11	4	4	3	0,44	0,44	0,44
2. Удобство в эксплуатации	0,07	5	5	5	0,35	0,35	0,35
3. Помехоустойчивость	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
4. Надежность	0,11	5	4	4	0,55	0,44	0,44
5. Безопасность	0,09	5	5	5	0,45	0,45	0,45
6. Простота в эксплуатации	0,08	5	5	5	0,4	0,4	0,4
7. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,12	5	4	5	0,6	0,48	0,6
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1.Конкурентоспособность продукта	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
2. Цена	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	5	5	4	0,35	0,35	0,28
4. Послепродажное обслуживание	0,04	5	5	5	0,2	0,2	0,2
5. Финансирование научной разработки	0,05	3	4	4	0,15	0,2	0,2
6. Срок выхода на рынок	0,03	3	5	5	0,09	0,15	0,15
<b>Итого</b>	1				4,6	4,38	4,33

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

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:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i,$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

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

$\text{Б}_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя. К конкурентным преимуществам производимого продукта можно отнести более совершенную, лучшую продукцию, повышенную помехоустойчивость и функциональную мощность.

#### **4.1.3 Технология QuaD**

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации. Для упрощения процедуры проведения QuaD рекомендуется оценку проводить в табличной форме, таблица 12.

Таблица 12 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	
<b>Показатели оценки качества разработки</b>					
1. Энергоэффективность	0,05	95	100	0,95	0,0475
2. Помехоустойчивость	0,1	95	100	0,95	0,095
3. Надежность	0,12	90	100	0,9	0,108
4. Безопасность	0,1	100	100	1	0,1
5. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,15	97	100	0,97	0,1455
6. Простота эксплуатации	0,1	90	100	0,9	0,09
7. Ремонтопригодность	0,02	10	100	0,1	0,002
<b>Показатели оценки коммерческого потенциала разработки</b>					
8. Конкурентоспособность продукта	0,05	95	100	0,95	0,0475
9. Уровень проникновения на рынок	0,02	80	100	0,8	0,016
10. Перспективность рынка	0,02	90	100	0,9	0,018
11. Цена	0,1	78	100	0,78	0,078
12. Послепродажное обслуживание	0,06	90	100	0,9	0,054
13. Финансовая эффективность научной разработки	0,07	85	100	0,85	0,0595
14. Срок выхода на рынок	0,03	40	100	0,4	0,012
<b>Итого</b>	<b>1</b>				<b>0,873</b>

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{\text{cp}} = \sum B_i \cdot \text{Б}_i,$$

где  $P_{\text{cp}}$  – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

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

$\text{Б}_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя.

Полученное значение  $P_{\text{cp}}$  находится в диапазоне 0,8-100, что позволяет говорить о перспективности научной разработки.

#### **4.1.4 SWOT-анализ**

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

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

Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 13.

Таблица 13 - SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>  С1. Высокое качество готового продукта;  С2. Эффективность технологии;  С3. Более простой метод получения покрытий по сравнению с другими;  С4. Квалифицированный персонал;  С5. Наличие бюджетного финансирования.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>  Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой  Сл2. Сильные конкуренты, уже присутствующие на рынке;  Сл3. Отсутствие компании, которая может поставить производство в больших количествах;  Сл4. Недостаток финансовых средств  Сл5. Слабая маркетинговая политика</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1. Модернизация материалов хоз.товаров, повышение срока службы материалов;  В2. Из-за низкой стоимости и высокой эффективности данная технология модернизирования может стать передовой;  В3. Снижение стоимости материала.</p>		
<p><b>Угрозы:</b>  У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства;  У2 Развитие альтернативных технологий и аналогов оборудования;  У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства;</p>		

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу 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 «-». Интерактивная матрица проекта представлен в таблице 14.

Таблица 14 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	0	-	0	-
	B2	+	+	+	-	-
	B3	+	+	+	-	-
Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	+	+	+	0	-
	У2	+	0	0	-	-
	У3	0	+	-	-	+
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	+	-	+	0	+
	B2	+	0	+	0	-
	B3	-	-	-	+	-
Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	+	+	+	-	+
	B2	+	0	0	-	+
	B3	-	-	-	+	-

В рамках третьего этапа составлена итоговая матрица SWOT-анализа (табл.15)

Таблица 15 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>          С1. Высокое качество готового продукта;          С2. Эффективность технологии;          С3. Более простой метод получения покрытий по сравнению с другими;          С4. Квалифицированный персонал;          С5. Наличие бюджетного финансирования.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>          Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой          Сл2. Сильные конкуренты, уже присутствующие на рынке;</p>
--	---	---

		Сл3. Отсутствие компании, которая может поставить производство в больших количествах; Сл4. Недостаток финансовых средств Сл5. Слабая маркетинговая политика
<b>Возможности:</b> В1. Модернизация материалов хоз.товаров, повышение срока службы материалов; В2. Из-за низкой стоимости и высокой эффективности данная технология модернизирования может стать передовой; В3. Снижение стоимости материала.	Повышения срока службы материалов, а также придание им дополнительных уникальных свойств при низкой стоимости и эффективности технологии модернизации являются основополагающими для продвижения продукции и повышении его качества.	Придание материалам уникальных свойств, низкая стоимость и высокая эффективность технологии позволит привлечь к себе большое внимание потенциальных потребителей и, тем самым, «перетянуть» их к себе от существующих конкурентов.
<b>Угрозы:</b> У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства; У2 Развитие альтернативных технологий и аналогов оборудования; У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства;	Изготовленный продукт, имеет основополагающие сильные стороны, для предотвращения угроз. Высокое качество готового продукта, квалифицированный персонал и эффективность технологии позволит создать и постоянно поддерживать спрос на технологию, а также вести разработки в целях улучшения продукта, что предотвратит развитие альтернативных технологий.	При устранении слабой маркетинговой политики, а также повышение технологического пакета данной разработке, помогут решить проблему с поиском потребителей и созданием альтернативных технологий.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 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 научных 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 16.

*Таблица 16 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей*

<b>Основные этапы</b>	<b>№ раб</b>	<b>Содержание работ</b>	<b>Должность исполнителя</b>
<b>Разработка технического задания</b>	<b>1</b>	Разработка ТЗ на ВКР	Руководитель
	<b>2</b>	Составление технического задания	Руководитель
<b>Выбор направления исследований</b>	<b>3</b>	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, бакалавр
	<b>4</b>	Выбор направления исследований	Руководитель
	<b>5</b>	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
<b>Теоретические и экспериментальные исследования</b>	<b>6</b>	Поиск оптимальных параметров осаждения	Аспирант, бакалавр
	<b>7</b>	Проведение экспериментальных работ	Аспирант, бакалавр
	<b>8</b>	Исследование свойств готовой продукции	Инженер
	<b>9</b>	Анализ и обработка полученных результатов	аспирант, бакалавр
<b>Обобщение и оценка результатов</b>	<b>10</b>	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, аспирант, бакалавр
	<b>11</b>	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель

<b>Проведение ОКР</b>			
<b>Разработка технической документации и проектирование</b>	<b>12</b>	Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	Руководитель, аспирант
	<b>13</b>	Сравнение эффективности разработанного продукта с аналогами	бакалавр
<b>Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)</b>	<b>14</b>	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Руководитель, бакалавр
	<b>15</b>	Подготовка к защите	бакалавр

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

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:

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

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

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

$t_{maxi}$  – 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 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i},$$

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.

#### 4.2.3 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, таблица 17.

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:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 119} = 1.48,$$

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 17.

Таблица 17 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{\text{min}}$ , чел- дни	$t_{\text{max}}$ , чел- дни	$t_{\text{ожг}}$ , чел- дни			
Разработка ТЗ на ВКР	2	4	3	Руководитель	3	4
Составление технического задания	2	4	3	Руководитель	3	4
Подбор и изучение материалов по теме	10	12	11	Руководитель, бакалавр	5	7
Выбор направления исследования	4	5	4	Руководитель	4	6
Календарное планирование работ по теме	2	4	3	Руководитель	3	4
Поиск оптимальных параметров осаждения	18	22	20	Аспирант, бакалавр	10	15
Проведение экспериментальных работ	20	30	24	Аспирант, бакалавр	12	18
Исследование свойств готовой продукции	3	6	4	Инженер	4	6

Анализ и обработка полученных результатов	15	30	21	Аспирант, бакалавр	10	15
Оценка эффективности полученных результатов	6	10	8	Руководитель, аспирант, бакалавр	3	4
Определение целесообразности проведения ОКР	6	10	8	Руководитель	8	12
Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	4	6	5	Руководитель, аспирант	2.5	4
Сравнение эффективности разработанного продукта с аналогами	4	6	5	бакалавр	5	7
Составление и оформление ПЗ	6	8	7	Руководитель, бакалавр	3	4
Подготовка к защите	12	15	13	бакалавр	13	19

На основе таблицы 17 строится календарный график-план. График строится для максимального по длительности выполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе таблицы 18 с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования.

Таблица 18 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работ	Исполнители	T <sub>кi</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Разработка ТЗ на ВКР	Руководитель	4	■													
2	Составление технического задания	Руководитель	4	■													
3	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, бакалавр	7	■	■												
4	Выбор направления исследования	Руководитель	6		■	■											
5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	4			■	■										
6	Поиск оптимальных параметров осаждения	Аспирант, бакалавр	15			■	■	■									
7	Проведение экспериментальных работ	Аспирант, бакалавр	18			■	■	■	■								
8	Исследование свойств готовой продукции	Инженер	6							■	■						
9	Анализ и обработка полученных результатов	Аспирант, бакалавр	15							■	■	■					
10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, аспирант, бакалавр	4									■	■				



11	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель	12																		
12	Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	Руководитель, аспирант	4																		
13	Сравнение эффективности разработанного продукта с аналогами	бакалавр	7																		
14	Составление и оформление ПЗ	Руководитель, бакалавр	4																		
15	Подготовка к защите	бакалавр	19																		

-  - руководитель
-  - аспирант
-  - инженер
-  - бакалавр

### 4.3 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);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

#### 4.3.1. Расчет материальных затрат НИИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{расхi} ,$$

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

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

$\Pi_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

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

Величина коэффициента ( $k_T$ ), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 19.

Таблица 19 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Электрод вольфрамовый	шт	10	34	340
Полифенил метилсилоксан	мл	50	10	600
Итого			<b>940</b>	

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 научно-технической 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.

#### 4.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы сводится в табл. 20.

Таблица 20 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Зарботная плата, приходящаяся на один чел.-дн., руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
1		Руководитель	1	658,1	19744
2		Аспирант	1	359,4	10783
3		Бакалавр	1	70	2100
4		Инженер	1	428,8	12865
Итого:				1516,3	45492

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

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

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

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

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

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

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 7);

$Z_{\text{дн}}$  – 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. 21).

Таблица 21 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Аспирант	Бакалавр	Инженер
Календарное число дней	366	366	366	366
Количество нерабочих дней				
-выходные дни	119		119	
-праздничные дни		119		199
Потери рабочего времени				
-отпуск	48	48	48	48
-невыходы по болезни	–	–	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	199	199	199

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 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от  $Z_{tc}$ );

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

Тарифная заработная плата  $Z_{tc}$  находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда  $T_{ci} = 600$  руб. на тарифный коэффициент  $k_t$  и учитывается по единой для бюджетных организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в табл. 22.

Таблица 22– Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З <sub>б</sub> ,руб.	к <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> ,руб	З <sub>дн</sub> , руб.	Т <sub>раб</sub> раб.дн.	З <sub>осн</sub> ,руб.
Руководитель	19744	1,3	25667,2	1444,6	34,5	49838,7
Аспирант	10783	1,3	14017,9	788,9	37,5	29583,7
Бакалавр	2100	1,3	2730	153,6	61	9369,6
Инженер	12865	1,3	16724,5	941,3	4	3765,2

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.

#### 4.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

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).

Таблица 23 – Заработная плата

Заработная плата	Руководитель	Аспирант	Бакалавр	Инженер
Основная зарплата	49838,7	29583,7	9369,6	3765,2
Дополнительная зарплата	5980,6	3550	1124,4	451,8
Зарплата исполнителя	55819,3	33133,7	10494	4217
Итого по статье $Z_{\text{зп}}$ , руб	103664			

#### 4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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%\*.

\* Федеральный закон от 24.07.2009 №212-ФЗ «О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования»

Таблица 24 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная з/п	Дополнительная з/п	Отчисления во внебюджетные фонды
Руководитель	49838,7	5980,6	15127
Аспирант	29583,7	3550	8979,2
Бакалавр	9369,6	1124,4	2843,9
Инженер	3765,2	451,8	1142,8
Коэффициент отчисления во внебюджетные фонды	0,271		
Итого			28092,9

#### 4.3.5 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями.

Исследование некоторых свойств готового покрытия проводилось в ТПУ. Затраты на все исследования составили 10 000 руб.

#### 4.3.6 Накладные расходы

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

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}},$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = 132676,9 \cdot 0,16 = 22831,1 \text{ тыс. р.}$$



### 4.3.7 Формирование бюджета затрат НИП

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 25.

Таблица 25 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.
1. Материальные затраты НИИ	940
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	92557,2
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	11106,8
4. Отчисления во внебюджетные фонды	28092,9
5. Контрагентные расходы	10000
6. Накладные расходы	22831,1
<b>Бюджет затрат НИИ</b>	<b>165526,3</b>

### 4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

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

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

$\Phi_{pi}$  - стоимость  $i$  – го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  - максимальная стоимость исполнения научно – исследовательского проекта.

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{153925,2}{153925,2} = 1.$$

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

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a,$$

где  $I_{pi}$  - интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

$a_i$  - весовой коэффициент  $i$  – го варианта параметра;

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведено в таблице 26.

Таблица 26 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,2	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5
3. Помехоустойчивость	0,15	4
4. Энергосбережение	0,1	4
5. Надежность	0,2	5
6. Безопасность	0,2	5
<b>ИТОГО</b>	<b>1</b>	<b>4,75</b>

Интегральный показатель эффективности разработки ( $I_{исп.i}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп.1}}{I_{финр}}; \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп.2}}{I_{финр}},$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}.$$

Таблица 27 – Сравнительная эффективность анализа

№ п/п	Показатели	Разработка
1	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,75
2	Интегральный показатель эффективности	4,75
3	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1

### Вывод к разделу

В данном разделе рассмотрена экономическая эффективность настоящей выпускной работы. Проведенный SWOT-анализ позволил выявить сильные и слабые стороны проекта, помог выявить возможности и угрозы, которые нужно учитывать при дальнейшем развитии проекта. Сравнение с аналогами позволило выявить преимущества, на которые стоит уделять особое внимание. Построенный график работ позволил рассчитать реальную заработную плату для всех участников проекта. Для того, чтобы показать, что данный проект имеет место быть в научной и экономической сфере, был проведен анализ эффективностью данной работы и сравнен с эффективностью других работ.