

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

---

Школа – Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки – 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»  
Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерно-топливного цикла

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Структура пленок, напыляемых в магнитном поле с помощью плазмы магнетронного разряда

УДК 621.793.7:539.23:621.385.64:533.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А4Д	Загузин Илья Юрьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	В.Ф. Мышкин	д.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШИП	Н.В. Черепанова	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Т.С. Гоголева	к.ф.-м.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	П.Н. Бычков	к.т.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (компетенции)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<b>Общекультурные компетенции</b>		
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.	Требования ФГОС (УК3,4,5, ОПК-2).
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.	Требования ФГОС (УК-2-5, ОПК-2).
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления, осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности	Требования ФГОС (Ук1, УК- 2, УК-3, УК-4,ОПК-2, 3, ПК-6, 19-23).
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы.	Требования ФГОС (ОК-4, ОПК-1-3, ПК-1, ПК-5, Пк-7, Пк-8, Пк-9, ПК-10, ПК-11, ПК-17, Пк-19,Пк-20,ПК-21).
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.	Требования ФГОС (УК-4,5, ОПК-2, ПК-6)
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (УК-7, 8, ОПК-3, ПК-12).
<b>Общепрофессиональные</b>		
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.	Требования ФГОС (УК-1, 2, ОПК-1, ПК-2,3,4,5, 6,7, 10, 11,14, ).
<b>Профессиональные компетенции</b>		
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования ; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и	Требования ФГОС (УК-7, 8, ОПК-3, ПК-2, 4,6, 8, 11, 12, 14, 17, 18, 20).

	разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).	
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов	Требования ФГОС (УК-1,2,8, ПК-2, 5,6, 7, 8, 9, 10, 11, 20).
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.	Требования ФГОС (ПК-4, 14, 15, 16, 21, 22).
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.	Требования ФГОС (ПК-11, 12, 13, 20, 21, 22).
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.	Требования ФГОС (УК-2 ОПК-1, ПК-1, 2, 4, 5, 6, 7, 8).
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов.	Требования ФГОС (ОПК-1,2, ПК – 1, 5, 10, 11, 13, 20, 21).
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.	Требования ФГОС (ПК-3, 8, 7, 10, 11, 14, 16, 18, 22).
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования	Требования ФГОС (УК-1, 2, 3, 6, 8, ОПК-3 ПК-5, 6,9, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23).

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

---

Школа – Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки (специальность) – 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»  
Отделение школы (НОЦ) – Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП

\_\_\_\_\_ П.Н. Бычков  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

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

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А4Д	Загузин Илья Юрьевич

Тема работы:

Структура пленок, напыляемых в магнитном поле с помощью плазмы магнетронного разряда	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 1508/с от 6.03.2018 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

	8.06.2018
--	-----------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Объект исследования: процесс формирования пленок диамагнитных веществ в магнитном поле.</li><li>2. Режим напыления: непрерывно в среде аргона, магнитное поле 150 мТл, давление 10 Па.</li><li>3. Используемое оборудование: форвакуумный насос ВН-1МГ, вакууметр ВИТ-2, источник питания GPR-100H05D, вакуумная камера объемом 5 л.</li></ol>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи</i></p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Сконструировать установку для формирования пленок заданного состава с помощью плазмы магнетронного разряда.</li><li>2. Получить плёнки методом магнетронного напыления.</li><li>3. Исследовать структуру поверхности пленки с</li></ol>

<i>исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	помощью электронной микроскопии. Изучить влияние магнитного поля на морфологию поверхности формируемых пленок. 4. Обобщение полученных результатов
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. SEM–изображения (сканирующая электронная микроскопия). 2. Схематическое представление основных механизмов роста пленок. 3. Схема вакуумной камеры.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Экспериментальная часть	профессор ОЯТЦ ИЯТШ Мышкин В.Ф.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент ОСГН ШИП Черепанова Н.В.
Социальная ответственность	ассистент ОЯТЦ ИЯТШ Т.С. Гоголева

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	23.04.2018
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	В.Ф. Мышкин	д.ф.-м.н., профессор		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А4Д	И.Ю. Загузин		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0А4Д	Загузин Илья Юрьевич

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

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

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	SWOT-анализ

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

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

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШИП	Черепанова Наталья Владимировна	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А4Д	Загузин Илья Юрьевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А4Д	Загузин Илья Юрьевич

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

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

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (повышенный уровень электромагнитных полей, отклонение показателей макроклимата от оптимальных, ионизирующее излучение от ПЭВМ, шум, вибрация);</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (вероятность возникновения пожара, вероятность поражения электрическим током)</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>– требование охраны труда при работе с 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 производственной 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 ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А4Д	Загузин Илья Юрьевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 85 страниц, 24 рисунка, 16 таблиц, 27 источников, 30 формул.

Ключевые слова: магнетронный разряд, низкотемпературная плазма, магнетронная распылительная система, магнитное поле, микрокристалл, индексы Миллера, пленка.

Объектом исследования является процесс формирования пленок диамагнитных веществ в слабом постоянном магнитном поле.

Цель работы – исследование влияния слабого внешнего магнитного поля на морфологию поверхности пленок, формируемых путем магнетронного распыления мишени.

Поставленная цель требовала решения следующих задач:

1. Провести обзор методов получения пленок и механизмов их роста;
2. Собрать экспериментальную установку для формирования пленок с помощью магнетронной распылительной системы;
3. Получить пленки оксидов меди методом магнетронного напыления;
4. Исследовать с помощью электронной микроскопии морфологию поверхности пленок, формируемых в слабом магнитном поле. Обобщить регистрируемые закономерности.

## Определения

В выпускной квалификационной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**магнетронный разряд:** Диодный газовый разряд, формируемый в разрядной области, где электрическое и магнитное поля перпендикулярны друг другу.

**магнетронная распылительная система:** Технологическое устройство для осуществления процесса магнетронного распыления.

**магнитное поле:** Силовое поле, которое действует на движущиеся заряды, обладающие магнитным моментом.

**плазма:** Ионизированный газ, состоящий из свободных электронов, положительно и отрицательно заряженных ионов, нейтральных и возбужденных атомов или молекул.

**индексы Миллера:** Индексы, которые характеризуют расположение атомных плоскостей в кристалле.

## Оглавление

Введение.....	12
1 Обзор литературы .....	14
1.1 Современные технологии формирования пленок .....	14
1.1.1 Общая характеристика процесса распыления .....	14
1.1.2 Распыление методом ионного пучка .....	16
1.1.3 Магнетронное распыление.....	20
1.2 Основы парамагнитных явлений.....	26
1.3 Процесс формирования пленок .....	30
1.3.1 Зародышевый механизм роста Вольмера-Вебера .....	31
1.3.2 Послойный механизм роста Франка-ван-дер-Мерве .....	33
1.3.3 Механизм Странски-Крастанова.....	35
2 Экспериментальные исследования.....	37
2.1 Разработка экспериментальной установки.....	37
2.1.1 Вакуумный насос ВН-1МГ .....	38
2.1.2 Вакуумметр ВИТ-2 с манометрическим преобразователем ПМТ-4М .....	39
2.1.3 Источник питания GPR-100H05D.....	41
2.2 Порядок проведения экспериментальных исследований .....	42
2.3 Экспериментальные данные и их интерпретация .....	44
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... 48	
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	49
3.2 Анализ конкурентных технических решений .....	49
3.3 SWOT-анализ.....	50
3.4 Планирование научно-исследовательских работ .....	55
3.4.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	55
3.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	57
3.4.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	58
3.5 Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	59

3.5.1	Расчет материальных затрат НИИ.....	60
3.5.2	Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ .....	61
3.5.3	Основная заработная плата исполнителей темы .....	62
3.5.4	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	64
3.5.5	Расчет затрат на научные и производственные командировки .....	64
3.5.6	Контрагентные расходы .....	64
3.5.7	Накладные расходы .....	65
3.5.8	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта .....	66
3.6	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования..	67
4	Социальная ответственность .....	70
4.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	70
4.2	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ...	72
4.2.1	Организационные мероприятия .....	72
4.2.2	Технические мероприятия .....	72
4.2.3	Условия безопасной работы .....	75
4.3	Электробезопасность .....	77
4.4	Пожарная и взрывная безопасность.....	78
	Выводы .....	81
	Список публикаций студента.....	82
	Список использованных источников .....	83

## Введение

Оптическая и полупроводниковая промышленности развиваются высокими темпами, требуя постоянного улучшения качества и эксплуатационных свойств покрытий. Совершенствование технологий получения тонких пленок способствует реализации этих требований.

Технология получения тонких пленок находит широкое применение в различных областях промышленности, среди которых приборостроение, лазерная техника, микроэлектроника и медицина. Данная технология относится к числу развивающихся областей техники, изучение которой является важнейшей частью обучения специалиста в области материаловедения.

В вакуумно-плазменных технологических процессах осаждения тонких плёнок наряду с другими методами широко применяется метод магнетронного распыления [1]. Вакуумно-плазменные методы нанесения покрытий относятся к одним из самых перспективных благодаря высокой чистоте технологических процессов, экологической безопасности и качеству получаемой продукции.

Для изучения влияния слабого магнитного поля на процесс формирования пленок, необходимо выполнение следующих условий:

- Стабильный поток низкотемпературной плазмы;
- Непрерывный процесс напыления металлических покрытий.

При проведении исследований, в качестве метода нанесения покрытий, применялся метод магнетронного распыления. Магнетронные распылительные системы (МРС), за счёт дрейфового тока электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях имеют протяженные потоки достаточно плотной плазмы. В магнетронном разряде главным определяющим условием его горения является правильное формирование структуры магнитного поля, при котором создается равномерное распыление мишени – катода [2].

Использование дополнительных источников ионов (инертных или химически активных газов), которые генерируют направленные потоки ионов рабочих газов, ускоренных до определенной энергии, позволяет повысить эффективность напыления, за счет воздействия ионным потоком на покрытие в процессе его формирования. Из-за необходимости преодоления энергии активации, атомы и молекулы легче взаимодействуют друг с другом в возбужденном или ионизированном состоянии.

Среди существующих методов получения различных свойств пленок напыляемых веществ возможности влияния с помощью магнитного поля на процесс осаждения пленок в литературе приведены незначительно.

Цель работы – исследование влияния слабого внешнего магнитного поля на морфологию поверхности пленок, формируемых путем магнетронного распыления мишени.

Поставленная цель требовала решения следующих задач:

- 1 Провести обзор методов получения пленок и механизмов их роста;
- 2 Собрать экспериментальную установку для формирования пленок с помощью магнетронной распылительной системы;
- 3 Получить пленки оксидов меди методом магнетронного напыления;
- 4 Исследовать с помощью электронной микроскопии морфологию поверхности пленок, формируемых в слабом магнитном поле. Обобщить регистрируемые закономерности.

В выпускной квалификационной работе приведены результаты экспериментальных исследований, показывающих влияние слабого постоянного магнитного поля на процессы, определяющие морфологию плёнок, наносимых методом магнетронного распыления вещества.

## 1 Обзор литературы

### 1.1 Современные технологии формирования пленок

#### 1.1.1 Общая характеристика процесса распыления

Под распылением понимают процесс передачи импульса, где быстрые частицы, например ионы аргона  $Ar^+$ , выбивают атомы, расположенные на поверхности катода. В атомном масштабе подобное явление сравнимо с соударением пары бильярдных шаров, где один из них является налетающим ионом, а второй атомом твердого тела. На рис. 1 представлена схема ионного распыления. В процессе распыления ион 1 налетает на распыляемое вещество 3, передавая импульс энергии его атому. В свою очередь, атом способен передать импульс другим атомам вещества, таким образом, вызывая череду столкновений.

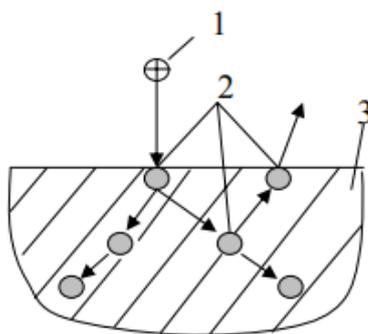


Рисунок 1 – Схема ионного распыления:

1 – ион, 2 – поверхностный атом, 3 – распыляемый материал

Поверхностный атом 2 может получить импульс энергии, направленный от поверхности. В случае, если его величина будет достаточной для разрыва связи с соседними атомами, он покинет поверхность распыляемого материала 3. Направление полученного импульса задает направление полета атома. Величина коэффициента распыления характеризует эффективность процесса. Под коэффициентом подразумевают число выбитых атомов на каждый падающий ион. Около 1 % энергии налетающей частицы передается распыленным атомам, в то время как

приблизительно 75 % энергии расходуется на нагрев массивного катода (мишени). Энергия определяет характер взаимодействия атомов поверхности твердого тела с налетающими ионами. При энергиях меньше 5 эВ, взаимодействие может быть ограничено химически и физически адсорбированными слоями, вызывая их десорбцию и обуславливая протекание разных химических реакций. В случаях, когда кинетическая энергия превышает энергию связи атомов кристаллической решетки, бомбардировка ионами способствует разрушению приповерхностного слоя и выброс атомов в паровую фазу (распылению). Минимальное значение энергии бомбардирующих ионов, приводящее к выбиванию атомов, соответствует интервалу энергий 15–30 эВ. Коэффициент распыления резко возрастает с увеличением энергии ионов (более 100 эВ) и в интервале 5–10 кэВ выходит на насыщение. Дальнейший рост кинетической энергии (более 100 кэВ) приводит к уменьшению скорости распыления. Это вызвано внедрением ионов в кристаллическую решетку и радиационными эффектами. Как правило, величина энергии распыляемых атомов составляет 0,1–100 эВ и значительно превышает энергию испаряющихся атомов. Эмиссия вторичных электронов сопровождает распыление. Электроны, ускоряясь в электрическом поле, вызывают дополнительную ионизацию. Атомное строение и кристаллографическая структура бомбардируемой поверхности, энергия и направление падения первичных ионов, а также природа взаимодействующих веществ определяют коэффициент распыления. Температурные условия влияют незначительно. Практически не различаются процессы при распылении металлов в расплавленном и твердом состояниях. За исключением области температур, при которых переход атомов в паровую фазу с помощью испарения становится существенным и превышает распыление. Коэффициент распыления растет с увеличением массы и энергии падающих ионов, пока они не слишком глубоко проникают в бомбардируемый материал. Коэффициент распыления также возрастает примерно в два раза с увеличением угла падения до 70°, после чего вновь

уменьшается. Вследствие ослабления связей на поверхности из-за прогрессирующего накопления повреждений с ростом дозы облучения наблюдается непропорционально быстрое увеличение коэффициента распыления с ростом дозы. Коэффициент распыления уменьшается с увеличением давления газа из-за обратного рассеяния. Подложку необходимо помещать рядом с катодом, чтобы при распылении атомы осаждались на ее поверхность. После распыления в пленках возникают сжимающие напряжения. Растягивающие напряжения появляются в пленках, которые получены методом испарения. Увеличение давления газа в камере может снизить напряжения в пленках, так как оно способствует их кристаллизации. Возникающие напряжения могут действовать благоприятно на пленки. Например, сжимающие напряжения являются препятствием для распространения трещин. Скорость формирования пленок при катодном распылении составляет 1 нм/с. Возможности теплосъема с мишени определяют предельную скорость формирования покрытия. К недостаткам данного метода относятся нерегулируемость, относительно малая степень ионизации осаждаемых потоков и недостаточно высокие значения энергии распыляемых атомов. Необходимость контролировать множество параметров, такие как начальный вакуум, геометрия системы, расстояние до подложки, чистота газа, подготовка материалов, скорость натекания газа, ток и напряжение газового разряда, температура подложки, скорость осаждения, вызваны необходимостью получения воспроизводимых по качеству покрытий с помощью метода распыления. В литературе [3,4,5] приведено подробное описание данного метода. Это позволяет выявить возможные области применения метода и его ограничения.

### **1.1.2 Распыление методом ионного пучка**

Для реализации данного метода применяется пучок ионов с энергией 500–2000 эВ, который испускается автономным источником. Мишень

обычно устанавливают под углом  $45^{\circ}$  относительно пучка и на расстоянии 30 см от источника ионов. Схема нанесения покрытий ионным пучком изображена на рис. 2. Для того чтобы обеспечить большие токи распыляемых ионов используются, как правило, ионные источники диаметром не менее 10–15 см. Накальные нити катодов или компенсаторов объемного заряда пучка изготавливаются из W или Ta проволоки диаметром 0,25–0,3 мм. При этом их время жизни составляет от единиц до десятков часов. Вместо проволочных катодов в качестве источников электронов могут использоваться устройства на основе разряда с полым катодом.

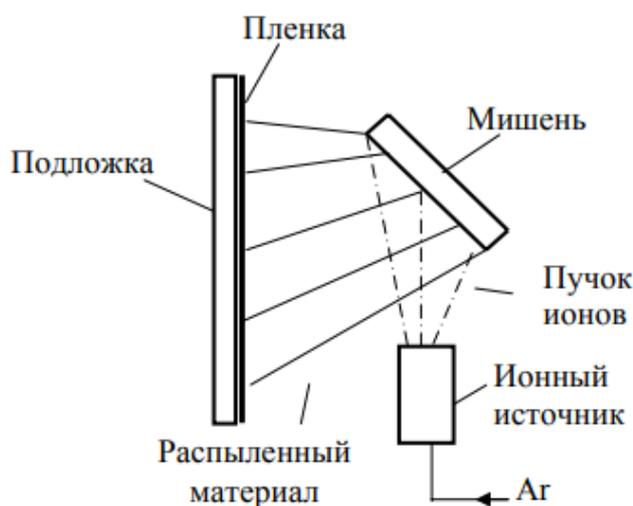


Рисунок 2 – Схема нанесения покрытий распылением ионным пучком

Размеры мишеней выбираются таким образом, чтобы весь ионный пучок попадал на их поверхность, и не происходило распыление других деталей. Мишень может располагаться на изоляторах, поскольку ионный пучок нейтрализуется с помощью компенсаторов.

Применение ионных источников для нанесения покрытий требует знания таких параметров ионного пучка, как плотность ионного тока и энергия ионов. Знание тока пучка, является недостаточным. Указанные параметры определяются обычно с помощью метода Ленгмюровского зонда.

Рассмотрим конструкцию плоского электрического зонда с охранным кольцом для определения плотности ионного тока (рис. 3).

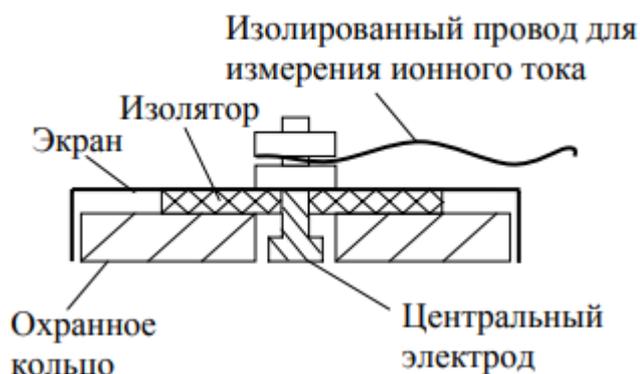


Рисунок 3 – Схема плоского зонда с охранным кольцом для измерения плотности ионного тока

Плотность ионного тока определяется в результате измерения тока ионов на центральный электрод зонда, который соединен изолированным проводом с электроизмерительными приборами. Диаметр центрального электрода зонда равен 5–10 мм. Его окружает охранный кольцо, которое имеет такой же потенциал, чтобы минимизировать краевые эффекты. Зазор между электродами не должен превышать 0,5 мм. Оба электрода помещаются в защитный экран для того, чтобы их обратная часть не участвовала в сборе ионов. На зонд подается отрицательный потенциал смещения величиной приблизительно  $-30$  В, для того чтобы отразить электроны пучка. Поэтому измеряемый ток является чисто ионным. Если зонд располагается перпендикулярно ионному пучку, то плотность ионного тока равна измеряемому току, деленному на площадь внешней поверхности центрального электрода. Ионный поток  $\Phi_i$  определяется делением плотности ионного тока на заряд иона  $q$ . Например, если измеряемый ток равен 25 мкА, а диаметр центрального электрода равен 1 см, то плотность ионного тока и поток ионов равняются:

$$J = \frac{I_p}{S_p} = 25\pi(0,5)^2 = 31,8 \frac{\text{мкА}}{\text{см}^2}, \quad (1)$$

$$\Phi_i = \frac{J}{q} = 31,8 \cdot \frac{10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 19,9 \cdot 10^{13} \frac{\text{ИОНОВ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}. \quad (2)$$

Параметр  $\Phi_i$  часто используют для сравнения с потоком атомов на подложку.

Конструкция плоского зонда должна легко разбираться для очистки от материала, осажденного на него во время измерений, особенно в случае нанесения диэлектрических покрытий. Зонд может помещаться в ионный пучок перед очисткой подложки, распылением или в конце процесса для того, чтобы контролировать параметры пучка. В работе [6] чтобы распылить хромовую мишень с диаметром равным 5 см применялся источник ионов Кауфмана, диаметр которого 3 см. Покрытия наносились предварительно нагретые на подложки из кремния, их температура составляла 600 °С. Распыление проводилось при давлении 15 Па в плазме аргона. Энергия ионов составляла 1000 эВ, этому значению соответствует плотность тока равная 2 мА/см<sup>2</sup>. Скорость формирования пленки достигала 20 нм/мин.

При нанесении покрытий реактивным распылением ионным пучком распыление мишени осуществляется пучком ионов химически активного газа O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> в вакууме или атмосфере этих газов. Существует два вероятных механизма формирования покрытий этим методом. Эти процессы могут протекать как одновременно, так и по отдельности. Согласно первому, образование химического соединения происходит на распыляемой поверхности мишени, после чего образующиеся комплексы переносятся на подложку. Во втором процессе химическая реакция протекает на поверхности подложки, а образование химических соединений в бесстолкновительном пролетном пространстве отсутствует. Считается, что второй механизм формирования покрытий является доминирующим. В большинстве случаев реактивным распылением ионным пучком выращиваются пленки оксидов металлов, нитридов Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и TiN, гидрогенизированного кремния a-Si:H и алмазоподобного углерода a-C.

В работе [7] описан процесс выращивания тонких пленок a-Si:H реактивным распылением Si мишени пучком ионов смеси Ar и H<sub>2</sub>. При этом использовался ионный источник Кауфмана. Разряд поддерживался в смеси аргона и водорода. При ускоряющем напряжении 1 кВ был получен пучок ионов с общим током 30–70 мА. При температуре подложек 293–673 К были получены тонкие пленки a-Si:H с атомной концентрацией водорода 0–60 %.

Покрyтия, наносимые при распылении ионным пучком, обладают рядом преимуществ, среди которых хорошая адгезия к подложке и плотная структура благодаря высокому значению энергии распыляемых частиц. Адгезия покрытий достигается даже без предварительной очистки подложек ионами. Внутренние напряжения в покрытиях, наносимых этим методом, являются сжимающими и большими по величине, чем у покрытий, осажденных методом испарения. К сильным сторонам метода относится возможность контролировать энергию, плотность потока и угол падения налетающих ионов. Это является серьезным преимуществом по сравнению с другими способами распыления. К слабым сторонам относятся невысокая скорость формирования покрытий и сложность нанесения на подложки с большой площадью.

### 1.1.3 Магнетронное распыление

Магнетронные распылительные системы представляют собой усовершенствованные диодные системы, отличающиеся от них присутствием в прикатодной области направленных перпендикулярно друг другу дугообразного магнитного и электрического полей.

Рассмотрим случай, когда электрическое  $E$  и магнитное  $B$  поля однородны и перпендикулярны друг другу (рис. 4). Пусть в начальный момент времени электрон располагается в точке 0, его скорость равняется нулю. Электрическое поле действует на электрон, ускоряя его вдоль линий напряженности электрического поля  $E$ . С увеличением скорости, воздействие

магнитного поля тоже усиливается. В результате электрон начинает отклоняться от направления  $E$ . Начиная с некоторого момента времени  $t_1$ , электрон начинает двигаться перпендикулярно к направлению электрического поля. В промежутке между точками 1 и 2 электрическое поле тормозит электрон и в результате его скорость падает до нуля в точке 2. Далее начинается процесс ускорения, который сменяется интервалами торможения и отклонения траектории в промежутке между точками 3 до 4.

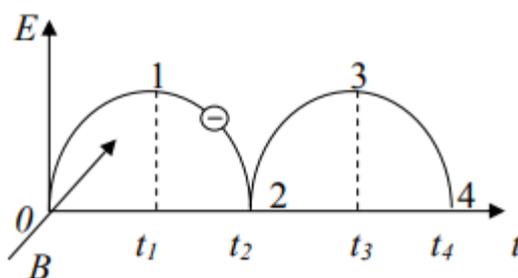


Рисунок 4 – Траектория движения электрона в перпендикулярных электрическом и магнитном полях

Следовательно, траекторию электрона составляют периодически повторяющиеся одинаковые фазы – движение электрона происходит по циклоиде. Рассмотрим влияние скрещенных электрического и магнитного полей на распыление. Электроны, покидающие катод, ускоряются электрическим полем и движутся перпендикулярно катоду. Проходя через положительный столб разряда, электроны налетают и тормозятся в материале анода. При наложении магнитного поля перпендикулярного электрическому траектория частиц будет напоминать циклоиду (рис. 5). Эмитируемые катодом электроны оказываются в «ловушке», созданной магнитным полем, и не способны двигаться к аноду в перпендикулярном направлении. Они будут двигаться над катодом пока не совершат некоторое количество соударений с атомами рабочего газа. После соударений возникает ионизации вблизи поверхности катода, на которую тратится значительная часть энергии электронов. В результате, растет концентрация положительно заряженных

ионов. Бомбардировка поверхности катода ионами приводит к его распылению. Высокое значение удельной мощности и плотности ионного тока достигается благодаря тому, что плазма локализуется у поверхности катода. Величина плотности ионного тока в диодных системах приблизительно на два порядка ниже, чем в магнетронных системах.

Снижение рабочего давления с одновременным увеличением скорости распыления делает возможным существенно улучшить чистоту пленок, уменьшая наличие посторонних включений. Снижению температуры и радиационных дефектов в формируемых структурах способствует локализация электронов рядом с мишенью, которая препятствует бомбардировке подложек.

К достоинствам магнетронных распылительных систем можно отнести возможность формирования равномерных по толщине пленок на поверхностях подложек с большой площадью и относительно высокую скорость осаждения.

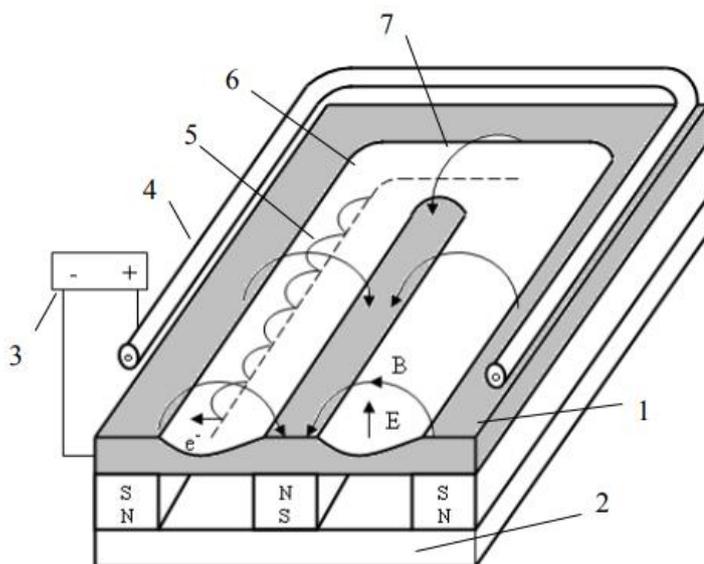


Рисунок 5 – Схема магнетронной распылительной системы с плоским катодом:

- 1 – катод-мишень, 2 – магнитная система, 3 – источник питания, 4 – анод, 5 – траектория движения электронов, 6 – зона распыления, 7 – силовая линия магнитного поля

В магнетронном разряде на постоянном токе основная доля тока через темное катодное пространство переносится ионами [8]. В работе [9] показано, что эта доля для алюминиевой и медной мишеней составляет, соответственно, 0,925 и 0,975.

Параметры работы магнетронных распылительных систем указаны в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры процесса нанесения покрытий методом магнетронного распыления [10]

Давление, Па	$10^{-2}-1$
Напряжение на мишени, В	300–700
Удельная мощность, Вт/см <sup>2</sup>	100
Плотность ионного тока, мА/см <sup>2</sup>	200
Расстояние до подложки, см	5–20
Скорость осаждения, нм/мин	До 3600
Степень использования материала мишени, %	До 80
Однородность толщины нанесенной пленки, %	$\leq \pm 1,2$
Площадь подложек, м <sup>2</sup>	До 3,2×6

Существует несколько типов магнетронных распылительных систем:

- По виду мишени выделяют планарные, циклические и конические.
- По степени ионного воздействия на поверхность подложки выделяют сбалансированные и несбалансированные.
- По виду магнитной системы – стационарные или перемещаемые.
- По источнику питания – постоянного, импульсного, переменного или высокочастотного тока.

На рис. 6 представлена конструкция планарного (плоского) магнетрона. Он состоит из катода, анода и магнитной системы. Проточная вода охлаждает катод 1, на который подается напряжение 300–800 В. Магнитная система 2 расположена под катодом и состоит из постоянных магнитов, которые закреплены на магнитопроводе. Магнитопровод сделан из мягкого

магнитного материала. Магнитное поле  $\Gamma$  с индукцией 300–600 Гс, формируется магнитной системой над катодом. При этом плоскость катода расположена параллельно составляющей этого поля. Над катодом располагается анод 4, который способствует формированию электрического поля. Составляющая поля перпендикулярна поверхности катода.

Среди огромного количества процессов распыления магнетронное получило наибольшую распространенность. Об этом свидетельствует большое число публикаций во всем мире. Однако, несмотря на все достоинства метода, существует ряд проблем, решение которых увеличит эффективность метода и снизит стоимость продукции.

Для нанесения диэлектрических пленок используется высокочастотное магнетронное распыление. Есть предположение, что распыляемое вещество имеет хорошую электропроводность. Ион рабочего газа, бомбардирующий катод, нейтрализуется на его поверхности и движется обратно в объем вакуумной камеры.

В случае, когда распыляемый материал является диэлектриком, положительно заряженные ионы, не нейтрализуясь, за короткое время покрывают мишень и формируют на ней положительно заряженный слой. Поле катода компенсируется полем этого слоя, ионы из разрядной области не способны притягиваться к мишени. Таким образом, в дальнейшем распыление невозможно. Следовательно, в постоянном электрическом поле диэлектрические мишени не распыляются. Подача высокочастотного переменного потенциала на поверхность диэлектрической мишени способствует нейтрализации положительного заряда. После этого в магнетронной системе протекают следующие процессы. Положительный столб плазмы 4 содержит одинаковые количества электронов и ионов. В течение отрицательного полупериода (рис. 6, а) ионы притягиваются плазмой. Бомбардировка налетающими ионами приводит к распылению диэлектрической мишени, а также передаче ей заряда ионов. Интенсивность распыления мишени уменьшается после накопления положительного заряда.

В течение положительного полупериода (рис. 6, б) электроны 5 притягиваются мишенью. Заряд ионов нейтрализуется зарядом электронов, при этом формируются атомы 6. В следующих отрицательных и положительных полупериодах процессы будут повторяться. Высокочастотное распыление может проводиться при более низких давлениях, чем в системах планарного диодного распыления. Это возможно благодаря низким потерям электронов и высокой эффективности ионизации атомов из-за осцилляции электронов. Промышленные установки высокочастотного распыления работают на частоте 13,56 МГц – единственная разрешенная частота. Основным отличием от распыления на постоянном токе является то, что электроды находятся под отрицательным потенциалом, поэтому электронам не удастся достичь анода.

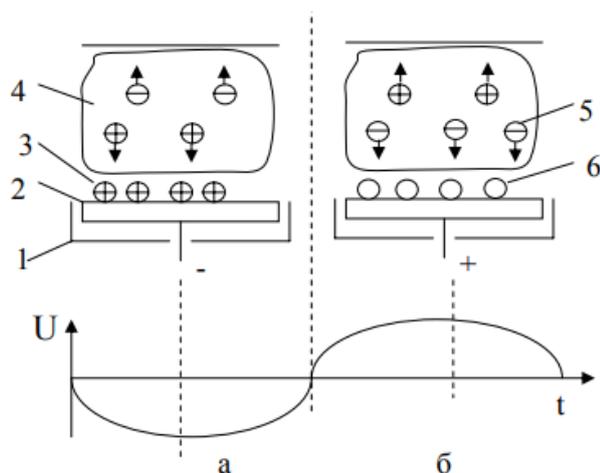


Рисунок 6 – Схемы высокочастотного магнетронного распыления при отрицательном (а) и положительном (б) полупериодах напряжения: 1 – экран, 2 – катод, 3 – ионы, 4 – плазма, 5 – электроны, 6 – атомы

Реактивное магнетронное распыление применяется, чтобы нанести пленки химических соединений, например, оксиды и нитриды. Для получения нужного химического соединения необходимо подбирать рабочий газ и распыляемое вещество. Рабочая камера заполняется определенным количеством реактивного газа. Кроме рабочего газа (аргона) в камеру

добавляют азот и кислород для формирования пленок, содержащих оксиды и нитриды. Недостатком данного метода является низкая скорость формирования пленки, вызванная осаждением соединений на катоде. В установках применяются электронные газовые натекатели, с помощью контролируют напуск газов в вакуумную камеру.

## 1.2 Основы парамагнитных явлений

Известно, что пленки металлов, наносимые при электролизном осаждении из водных растворов, обладают лучшей однородностью в магнитном поле, чем без поля. Мы предполагаем, что слабое постоянное магнитное поле также оказывает благоприятное воздействие на процесс формирования пленки на поверхности подложки с помощью магнетронного разряда. Поэтому рассмотрим особенности парамагнитных явлений.

Электронный парамагнитный резонанс это явление резонансного поглощения электромагнитного излучения парамагнитными частицами, помещенными в постоянное магнитное поле. Применяется для изучения систем с ненулевым электронным спиновым магнитным моментом (т. е. обладающих одним или несколькими неспаренными электронами): атомов, свободных радикалов в газовой, жидкой и твердой фазах [11].

В отсутствие постоянного магнитного поля  $H$  спины валентных электронов направлены в пространстве произвольно. При наложении магнитного поля  $H$  спины валентных электронов ориентируются вдоль или против силовых линий магнитного поля. При этом происходит расщепление уровня энергии электронов  $E_0$  (рис. 7). Расстояние между подуровнями зависит от напряженности поля  $H$ :

$$E_1 - E_2 = \Delta E = g \cdot \mu_B \cdot H, \quad (3)$$

где  $\mu_B$  - магнетон Бора, равный  $9,274 \cdot 10^{-24}$  Дж/Тл,  $g$  - фактор спектроскопического расщепления.

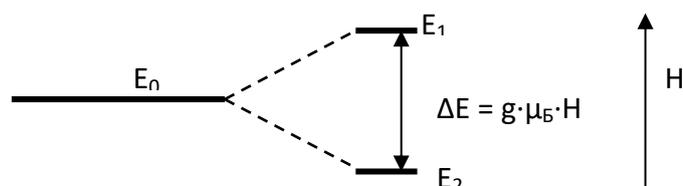


Рисунок 7 – Расщепление энергетического уровня электрона в постоянном магнитном поле.  $E_0$  – исходный уровень,  $E_1$  и  $E_2$  – уровни, энергии в поле  $H$

Параметр, называемый  $g$ -фактором, определяется как фактор спектроскопического расщепления Ланде, равный

$$g = 1 + \frac{J \cdot (J + 1) + S \cdot (S + 1) - L \cdot (L + 1)}{J \cdot (J + 1)}, \quad (4)$$

где  $L$  – орбитальное квантовое число,  $S$  – спиновое квантовое число,  $J$  – значения полного момента.

В случае преобладания спинового магнетизма  $L = 0$  (свободный электрон)  $g = 2,0023$ . Отклонение от этой величины свидетельствует о наличии спин-орбитального взаимодействия, приводящего к изменению величины резонансного поля [12].

Заселенность электронов по подуровням энергии определяется уравнением Больцмана:

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (5)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура  $n_1$ ,  $n_2$  – заселенность подуровней.

Спины электронов радикалов, вступающих в химическую реакцию, прецессируют в магнитном поле с частотами:

$$\omega_1 = \eta^{-1} g_1 \mu_B H, \quad \omega_2 = \eta^{-1} g_2 \mu_B H, \quad (6)$$

где  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  — частоты прецессии первого и второго спинов,  $g_1, g_2$  –  $g$ -факторы двух радикалов,  $\mu_B$  — магнетон Бора.

Тогда максимальное время триплет-синглетной эволюции двух радикалов, находящихся в контакте с произвольной первоначальной

ориентацией спинов валентных электронов, определяется формулой

$$T = \frac{\pi}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\eta\pi}{(g_1 - g_2)\mu_B H}. \quad (7)$$

Как следует из формулы 11, чем больше разница g-факторов, тем больше скорость перехода из триплетного состояния в синглетное. В соответствии с принципом Паули, в синглетном состоянии радикалы могут образовывать химическую связь. Данный вид перехода называют g-механизмом.

Возможен также механизм, влияющий на скорость химической реакции между радикалами в жидкости – механизм сверхтонкого взаимодействия (СТВ). Этот механизм играет роль, при наличии у радикалов магнитных ядер. При этом создается дополнительное поле на валентном электроном магнитным ядром, противоположно направленному или сонаправленному внешнему магнитному полю [13].

Кроме селективности по электронному спину, химическое взаимодействие также селективно по ядерному спину. Эти спиновые подсистемы связаны СТВ (фермиевским) взаимодействием. При этом ядерная подсистема через СТВ воздействует на электронную подсистему, изменяя электронный спин. Так как СТВ есть свойство магнитных ядер, то оно производит селекцию изотопных ядер по магнитному моменту и обеспечивает сортировку магнитных и немагнитных ядер.

Рассмотрим изменение намагниченности вещества, при «включении» или «выключении» внешнего магнитного поля. Поведение намагниченности  $\mathbf{M}$ , характеризующейся компонентами  $(M_x, M_y, M_z)$ , при коммутации магнитного поля описывают уравнениями Блоха [14]:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \cdot \left[ \vec{M} \cdot \vec{H}_0 \right], \quad (8)$$

где  $\mathbf{M}$  – магнитный момент ансамбля ядер.

Намагниченность  $M_z$  зависит от постоянной по времени  $T_1$ . Экспоненциальное приближение  $M_z$  к равновесному значению  $M_0$ :

$$\frac{dM_z}{dt} = -\left(\frac{M_z - M_0}{T_1}\right), \quad (9)$$

где  $T_1$  - продольное время релаксации,

Максимальная ядерная намагниченность может быть записана как:

$$M_0 = \chi_0 \cdot H_0. \quad (10)$$

Для поперечных намагниченностей  $M_x$   $M_y$  вводится понятие  $T_2$  (время поперечной релаксации) определяющее ширину линии ЭПР спектра.

$$\frac{dM_x}{dt} = -\frac{M_x}{T_2}, \quad (11)$$

$$\frac{dM_y}{dt} = -\frac{M_y}{T_2}. \quad (12)$$

В результате хаотического столкновения частиц, фазы прецессии спинов могут изменяться скачком при столкновении с парамагнитными частицами.

В результате образования молекул исчезают радикалы, имеющие некоторую плоскость поляризации спина. Множественные столкновения с не парамагнитными частицами приводят к восстановлению равновесного распределения спинов по фазам прецессии (за время  $T_2$ ), а также по направлению магнитного поля (за время  $T_1$ ). Отличие величин  $T_1$  и  $T_2$  для разных изотопов обуславливает изотопную селективность жидкофазных реакций в постоянном магнитном поле.

На твердой поверхности, при высоких температурах подложки, протекающие процессы аналогичны. Парамагнитные явления в газовой фазе существенно отличаются. Однако, при напылении в вакууме газофазными процессами можно пренебречь.

### 1.3 Процесс формирования пленок

Одним из наиболее важных вопросов изучения и исследования тонких пленок является определение взаимосвязи между фазовым составом, микроструктурой, физическими и химическими свойствами пленок. Существуют аморфные, монокристаллические и поликристаллические пленки.

Аморфным пленкам свойственно отсутствие дальнего порядка в расположении атомов, что характерно для кристаллического состояния. При эпитаксии образуются монокристаллические пленки, которые воспроизводят кристаллическую структуру подложки. Поликристаллические пленки отличаются наибольшим разнообразием микроструктуры, которое выражено кристаллографической ориентацией и размером зерен (кристаллитов).

Наличие границ между соседними зернами обусловлено тем, что их кристаллические решетки разориентированы между собой. Размеры зерен поликристаллических пленок могут изменяться, например, при механической деформации или термообработке наблюдается увеличение зерен. Подобные процессы приводят к изменению структуры пленок и оказывают значительное влияние на свойства пленок.

Согласно общепринятым представлениям [15], формирование тонкой пленки на ровной поверхности твердого тела происходит в результате зарождения, роста и слияния островков в сплошную пленку.

Процесс формирования пленок осуществляется на подложках и включает в себя две стадии [16]:

- а) стадия образования зародышей (появление зародышей критических размеров, которые способны к дальнейшему росту);
- б) стадия роста пленки (критические зародыши значительно увеличиваются в размерах, сливаясь друг с другом, что приводит к образованию сплошной пленки).

Дефектным или шероховатым поверхностям свойственны специфические закономерности роста пленок, которые не требуют образования зародышей.

Развитие техники и технологий получения тонких пленок требует понимания процессов их роста и связей с параметрами осаждения, как следствие этого количество фундаментальных и прикладных работ по данной тематике непрерывно растет. В работах [17, 18, 19] приводится описание физических моделей, описывающих процесс роста пленок и нанокластеров.

В значительной мере свойства металлических пленок определяются стадиями зарождения и роста пленки. На сегодняшний день принято выделять три механизма роста пленок (рис. 8).

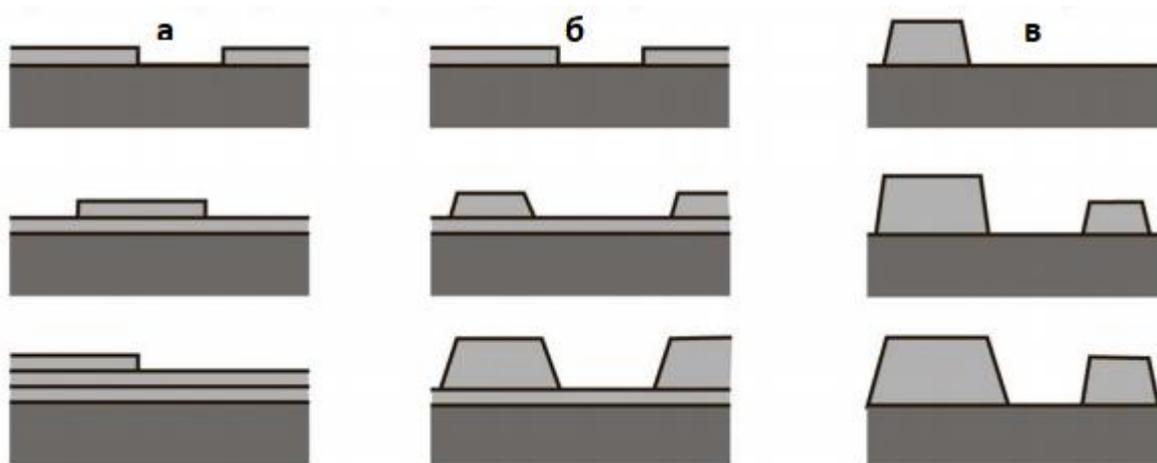


Рисунок 8 – Схематичное изображение основных механизмов роста пленок: а – послойный рост Франка-Ван-дер-Мерве, б – послойный и островковый рост Странского-Крастанова, в – островковый рост Вольмера-Вебера.

### 1.3.1 Зародышевый механизм роста Вольмера-Вебера

Механизм роста Вольмера-Вебера реализуется на атомно-гладких плотноупакованных гранях совершенного кристалла, каковыми являются грани с малыми индексами Миллера [20]. Происходит образование двухмерных или трехмерных зародышей, которые спустя некоторое время разрастаются, образуя сплошную пленку, покрывающую поверхность

подложки. Скорость роста пленки и вероятность образования зародышей малы при пересыщениях единицы и десятки процентов.

Основу формирования пленки составляют следующие процессы:

а) массоперенос в первичной фазе (доставка вещества к поверхности подложки);

б) адсорбция частиц первичной фазы на поверхности (образование зародышей);

в) поверхностная диффузия адсорбированных атомов (доставка частиц к зародышам с превращением их в центры кристаллизации).

Скорость роста пленок может быть ограничена наиболее медленным из перечисленных выше процессов. Равновесие между первичной фазой и адсорбированными атомами устанавливается в течение короткого промежутка времени (микросекунды).

Зародышевый механизм формирования пленки проходит в четыре этапа.

1. Атомы с концентрацией  $N_a$  на поверхности подложки взаимодействуют друг с другом путем столкновений (протекает процесс диффузии). В результате образуются скопления атомов, которые называются кластерами. Они состоят из  $i$  частиц. Адсорбционный слой находится в равновесии с метастабильными кластерами, которые образуют зародыши с энергией образования  $\Delta G_{кр}$ . Концентрация образовавшихся критических зародышей определяется выражением [21]:

$$N_{кр} = N_a \exp\left(-\frac{\Delta G_{кр}}{kT}\right). \quad (13)$$

2. Разрастание критических зародышей происходит благодаря соседним с ними атомам, которые присоединяются в результате процесса диффузии. Постепенно зародыши разрастаются, формируя островки. Размер и форма островков определяются свойствами подложки, фазы зародышей и условий их роста. Отдельные малые островки способны самостоятельно перемещаться по подложке. Энергия образования разориентированных зародышей больше, чем ориентированных. Следовательно, ориентированные

зародыши будут расти быстрее. Таким образом, островки больших размеров ориентированы более правильно по отношению к кристаллографическим направлениям поверхности подложки.

3. Слияние (коалесценция) островков происходит при их соприкосновениях. Островки малых размеров вливаются в большие и, в результате, принимают эпитаксиальную ориентацию. Слияние сильно разориентированных островков приводит к несоответствиям на их границах дислокации. На этом этапе можно наблюдать образование сетки зародышевой фазы с пустотами, ограниченными кристаллографическими гранями.

4. На последней стадии роста пленки происходит заполнение пустот сетки, в результате чего образуется сплошная пленка.

### 1.3.2 Послойный механизм роста Франка-ван-дер-Мерве

Реализация данного механизма происходит на подложках, на поверхности которых присутствуют ступени. Естественная шероховатость граней с большими индексами Миллера является источником этих ступеней. Грани представляют собой совокупность атомных ступеней, которые образовались в виде участков плотноупакованных плоскостей с малыми индексами Миллера (рис. 9а).

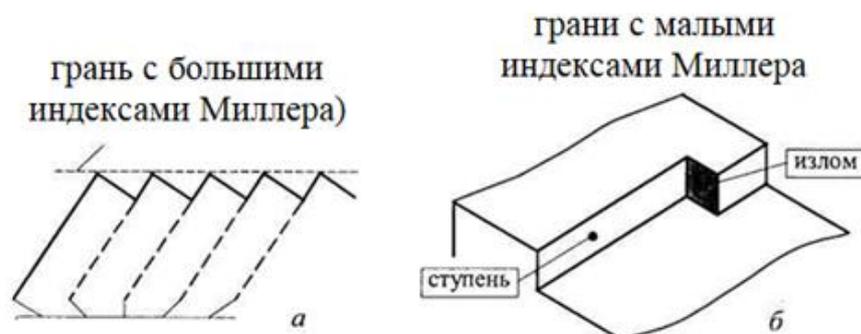


Рисунок 9 – Совокупность моноатомных ступеней на грани кристалла с большими индексами Миллера (а) и излом моноатомной ступени (б)

Низким температурам, близким к  $T=0$  К, соответствует атомно-гладкий фронт ступеней. Тепловые флуктуации, появляющиеся при конечных температурах, приводят к возникновению изломов в ступенях (рис. 9, б).

При росте пленки по данному механизму не возникает необходимость в образовании зародышей. Поэтому рост пленки включает следующие стадии (рис. 10):

- 1) адсорбция частиц первичной фазы на поверхности подложки в виде атомов;
- 2) поверхностная диффузия атомов к ступени с закреплением на ребре излома;
- 3) движение атомов вдоль ступени с окончательным закреплением их в изломе.

Двухгранный угол образуется ступенью, а трехгранный – изломом. Находящийся в изломе атом *в* связан с подложкой сильнее, чем атом *б*, который располагается в углу ступени. В свою очередь атом *а*, адсорбированный поверхностью, слабее связан, чем атом *б*.

Осаждение характеризуется тем, что ступени шероховатой поверхности по очереди застраиваются частицами, которые поступают из первичной фазы, пропуская стадию образования зародышей. В результате возникает новый атомный слой, которому также способствуют перемещения ступеней. Все перечисленные стадии изображены в виде стрелок 1, 2, 3 на рис. 10. Ступени на гранях с большими индексами Миллера могут существовать при любой температуре (рис. 10).

Процесс роста граней при любых пересыщениях является непрерывным, полностью ступеням не удается зарастать. Колебания внешних условий, таких как температура или концентрация частиц, вызывают разрушение атомно-гладких граней, формируя шероховатую ступенчатую структуру. Атомно-шероховатые грани с большим количеством изломов растут в перпендикулярном направлении, в силу того, что осаждаемые атомы присоединяются к поверхностным атомам в абсолютно любой точке своего

падения на подложку, где это наиболее энергетически выгодно. Данный механизм считается нормальным ростом, каждая ступень застраивается в направлении нормали до поверхности. При послойном механизме наблюдается тангенциальное движение ступеней.

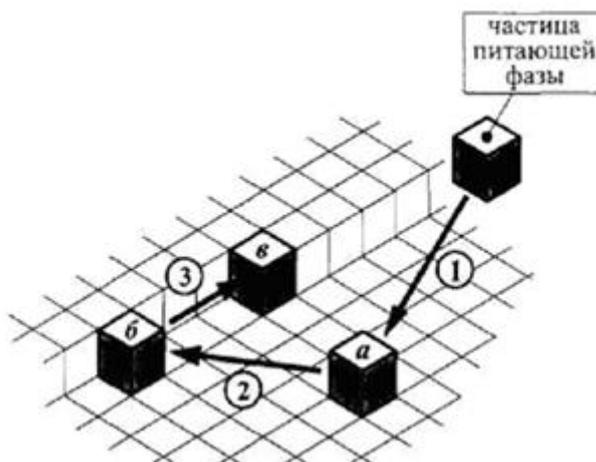


Рисунок 10 – Схема осаждения частицы первичной фазы на подложку с моноатомной ступенью (послойный рост): 1 – адсорбция, 2 – поверхностная диффузия, 3 – движение вдоль ступени; *a* – атом на поверхности подложки, *б* – атом в углу ступени, *в* – атом в изломе ступени

### 1.3.3 Механизм Странски-Крастанова

Механизм Странски-Крастанова является промежуточным механизмом роста пленок. Изначально на подложке протекает процесс послойного роста. После того как образовался смачивающий слой, его толщина составляет от одного до нескольких моноатомных слоев, осуществляется островковый механизм роста. Значительное рассогласование постоянных решетки материала подложки и осаждаемого материала (например, InAs и GaAs, Ge и Si) является необходимым условием реализации данного механизма. Упругие напряжения возникают в смачивающем слое, что приводит к деформации слоя таким образом, чтобы постоянная его решетки соответствовала постоянной решетки подложки. В случае, когда поверхностная энергия выше энергии деформации смачивающего слоя, реализуется дальнейший

послойный рост (рис. 11, а). В результате образования на границе раздела дислокаций несоответствия происходит релаксация упругих напряжений. Если энергия деформации велика, то компенсация напряжений вызывает образование трехмерных островков (рис. 11, б). Объемная упругая релаксация представляет собой движущую силу образования таких островков. Механизм Странски-Крастанова составляет основу образования полупроводниковых квантовых точек.

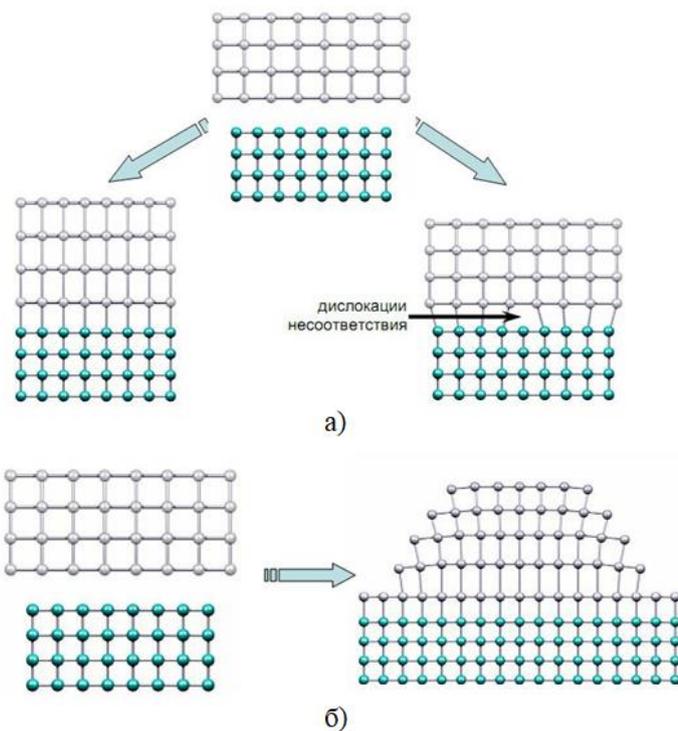


Рисунок 11 – Релаксация упругих напряжений при послойном росте – а) и при росте по механизму Странски-Крастанова – б)

## 2 Экспериментальные исследования

### 2.1 Разработка экспериментальной установки

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы была собрана экспериментальная установка для формирования пленок металлов и их оксидов путем магнетронного распыления мишени. Фотография экспериментальной установки приведена на рис. 12. Принципиальная схема установки изображена на рис. 13.



Рисунок 12 – Внешний вид экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из вакуумной камеры объемом 5л, форвакуумного насоса ВН-1МГ, вакуумметра ВИТ-2, источника питания магнетронного разряда GPR-100H05D. Газ из вакуумной камеры откачивается форвакуумным насосом, подсоединяемым к вакуумной камере с помощью гибкого вакуумного шильфона длиной 40 см. Внутренний диаметр шильфона составлял не менее 3 см.

Рассмотрим каждый стандартный прибор и специально изготовленную вакуумную камеру из нержавеющей немагнитной стали более подробно.



Рисунок 13 – Принципиальная схема экспериментальной установки

### 2.1.1 Вакуумный насос ВН-1МГ

Вакуумные насосы ВН-1МГ (рис.14) предназначены для откачки воздуха или неагрессивных газов, паров воды и парогазовых смесей (допустимых концентраций и давления) из замкнутых емкостей.



Рисунок 14 –Вакуумный насос ВН-1МГ

Насосы ВН-1МГ можно применять в качестве форвакуумных в установках с пароструйным насосом. ВН-1МГ не пригодны для перекачки воздуха или газа из одной емкости в другую, для откачки воздуха с повышенным содержанием кислорода, а также – газов взрывоопасных, отравляющих и разъедающих черные металлы. Во всех случаях давление на входе в насос не должно превышать 40 мм рт. ст. Насосы предназначены для

работы в стационарных установках, находящихся в помещениях, при температуре окружающего воздуха от 10 до 30°С.

Таблица 2 – Характеристики насоса ВН-1МГ

Скорость откачки, л/с	18,3
Номинальная мощность, Вт	3000
Вес, кг	290
Предельное давление, Па	0,4
Напряжение питания, В	380
Частота тока, Гц	50
Количество фаз входного напряжения	3
Рабочая жидкость	ВМ-4
Количество рабочей жидкости, л	4
Макс. рабочая температура, °С	30
Мин. рабочая температура, °С	10

### 2.1.2 Вакуумметр ВИТ-2 с манометрическим преобразователем ПМТ-4М

Вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2А (рис. 15) предназначен для измерения давления в диапазоне  $1 \times 10^{-5} - 20$  Па. ВИТ-2А эксплуатируется в комплекте с термопарным (ПМТ-4М) преобразователями.



Рисунок 15 – Вакуумметр ВИТ-2А

Основные характеристики вакуумметра ВИТ-2А:

- Диапазон измеряемых токов манометрического преобразователя ПМИ-2:  $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-9}$  А;
- Отсчет давления (ионизационная часть): по стрелочному индикатору (5 поддиапазонов);
- Пределы регулировки тока нагревателя термопарных преобразователей: 95-150 мА;
- Время непрерывной работы: 8 ч;
- Нарботка на отказ измерительного блока: 2000 ч;
- Потребляемая мощность: 75 Вт;
- Габаритные размеры: 320x285x230 мм;
- Масса не более 11 кг.

Термопарный преобразователь (рис. 16) представляет собой металлический баллон, в котором на вводах смонтированы подогреватель и приваренная к нему термопара. Подогреватель нагревается током, регулируемым переменным сопротивлением. Температура нагреваемой нити измеряется термопарой. При неизменном токе накала нити вследствие изменения давления в баллоне преобразователя, присоединенном к вакуумной системе, изменяется температура нити и, соответственно, термоЭДС, по величине которой определяют давление. К вакуумному объёму присоединяется либо при помощи грибкового (компрессионного) соединения, либо при помощи сварки.



Рисунок 16 – Термопарный преобразователь ПМТ-4М

Технические характеристики ПМТ-4М:

- Рабочий диапазон давлений:  $5 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-4}$  мм рт. ст. (66.660 – 0.01333 Па);
- Диапазон изменения ЭДС термопары: 0-10 мВ;
- Диапазон установки тока нагревателя: 100-140 мА;
- Сопротивление термопары: 6-8 Ом.

### 2.1.3 Источник питания GPR-100H05D

Источник питания постоянного тока регулируемый GPR-100H05D (рис. 17) предназначен для воспроизведения напряжения и силы постоянного тока, а также для питания радиотехнических устройств, стабилизированным постоянным напряжением и током.



Рисунок 17 – Источник питания GPR-100H05D

Таблица 3 – Диапазоны воспроизведения напряжения и силы постоянного тока

Диапазоны воспроизведения			
Напряжения, В	Погрешность, В	Тока, А	Погрешность, А
0,01 – 17,99	0,01	0,001 – 0,5	0,001
18 – 179,9	0,1		
180 – 1000	1		

## 2.2 Порядок проведения экспериментальных исследований

Процесс напыления пленок в вакууме требует соблюдения строгих мер по промышленной санитарии и чистоте используемых материалов. Поэтому перед проведением эксперимента внутреннюю полость вакуумной камеры и размещаемые в ней детали, а также поверхности герметизации, включая резиновую и медные прокладки, тщательно протирали этиловым спиртом ( $C_2H_5OH$ ).

Постоянный магнит кольцеобразной формы с сердечником размещали внизу камеры за её пределами. Это ограничивало температуру нагрева магнита. Горизонтальная составляющая магнитного поля в пространстве над катодом магнетронного разряда составляла 120 мТл. Вертикальная составляющая поля над катодом не превышала 20 мТл.

Подложка, на которую наносили пленки, находилась в магнитном поле, создаваемым кольцевым магнитом магнетрона (менее 3,1 мТл), и второго, специально устанавливаемого, магнита с остаточной намагниченностью 1,1 Тл. Путем изменения расстояния (до 2 см) между дополнительным магнитом (диаметром 10 мм) и подложкой в области напыления формировали магнитное поле с дискретной величиной: 4 мТл, 29 мТл, 48 мТл, 65 мТл, 96 мТл, 148 мТл.

Внутри вакуумной камеры (рис. 18) размещали распыляемый материал в виде круглой медной пластины (чистая медь), латунный электрод (анод) и стеклянную пластину (подложка), на которой формируется пленка из материала катода магнетронного разряда.

В процессе исследований на одну подложку напыляли пленку при заданной величине магнитного поля. В дальнейшем выключали все электрические приборы, производили разгерметизацию камеры и доставали подложку. Поэтому для напыления очередной пленки включали электрические приборы в следующей последовательности.

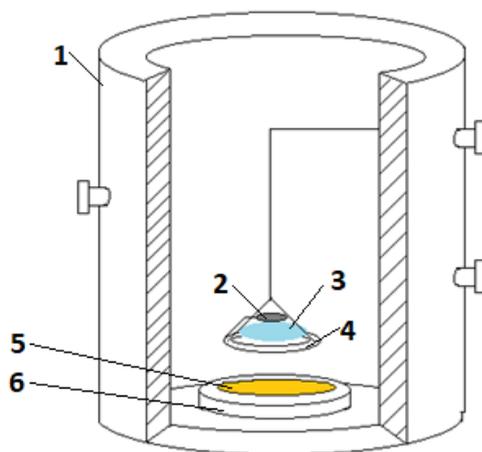


Рисунок 18 – Схема вакуумной камеры:

1 – корпус, 2 – магнит, 3 – стеклянная пластина (подложка), 4 – анод, 5 – катод (распыляемый материал), 6 – магнит с сердечником.

1. Включали в сеть форвакуумный насос с закрытым входным краном. Через одну минуту открывали входной кран насоса.

2. Включали вакуумметр ВИТ-2. В течение 10 минут давление уменьшалось до  $10^{-2}$  мм рт.ст. Контроль давления в вакуумной камере осуществляли по «второй» шкале вакуумметра.

3. Вакуумную камеру продували кислородом или аргоном из баллона.

4. Включали блок питания GPR-100H05D. Выставляли ток короткого замыкания БП на уровне 50-300 мА. Медленно увеличивали постоянное напряжение, подаваемое на электрод распылителя до пробойной величины (рис. 19). Пробой разрядного промежутка наблюдается при напряжении на аноде 500 В. В дальнейшем напряжение блока питания в режиме короткого замыкания падало до 290–350 В и устойчиво поддерживался магнетронный разряд. Изображение правой части кольцеобразного плазменного образования затемнена подложкой с наносимой пленкой.

5. При малой мощности скорость распыления незначительна. Поэтому для формирования пленки нужной толщины длительность процесса напыления составляла 2,5 – 3 часов.

6. По истечению времени, необходимого для напыления непрозрачной пленки, отключали электрооборудование в обратной последовательности.

В дальнейшем извлекали образец из камеры и отправляли на анализ. В результате получали SEM-изображения поверхности образцов пленок. Сравнивали SEM-изображения, получаемые в постоянном внешнем магнитном поле заданной величины и без поля.

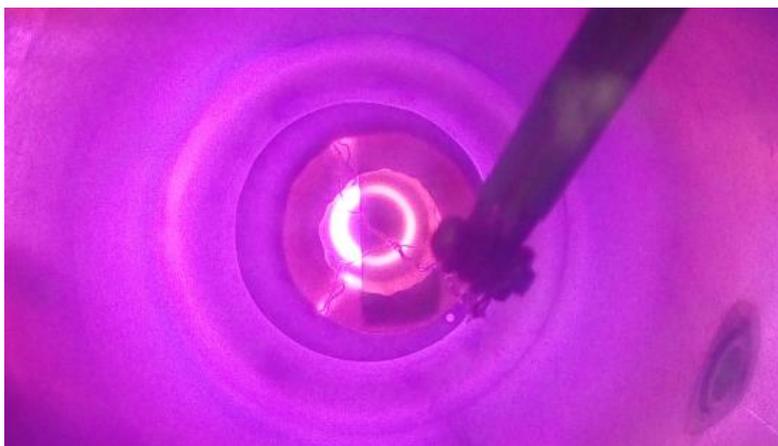


Рисунок 19 – Магнетронный разряд

### 2.3 Экспериментальные данные и их интерпретация

Регистрировали увеличенные до 50000 раз изображения поверхности тонких пленок на стеклянных и металлических подложках, полученных методом магнетронного распыления в аргоне, а также в смеси аргон-кислород, при давлениях менее 10 Па. В плазмообразующую смесь к аргону добавляли кислород в концентрации до 20% в виде чистого газа или воздуха. Поэтому имели возможность формирования как пленок чистой меди, так и смеси медь и оксиды меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$ .

На рис. 20 приведено SEM-изображение пленки из одной серии экспериментов без магнитного поля. На рис. 21 приведено SEM-изображение пленки из серии экспериментов, в которых стеклянная пластинка находилась во внешнем постоянном магнитном поля 96 мТл.

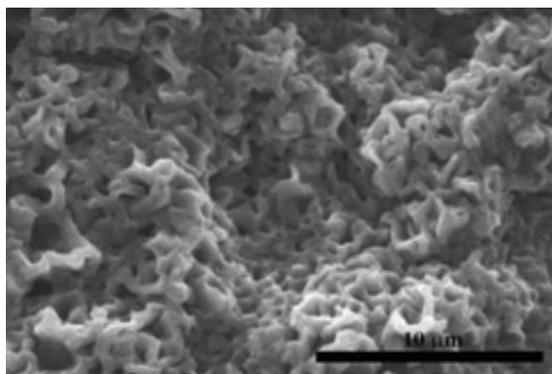


Рисунок 20 –SEM-изображение пленки, полученной без магнитного поля (0 мТл)

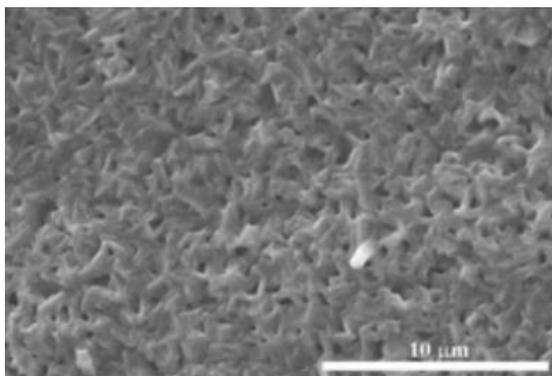


Рисунок 21 –SEM-изображение пленки, полученной во внешнем магнитном поле (96 мТл)

Установлено, что скорость распыления сильно зависит от электрической мощности, подводимой к разряду. Поэтому в зависимости от величины мощности электрического разряда и времени напыления, можно получить различную толщину и рельеф пленок. Также следует учитывать, что при увеличении мощности магнетронного разряда заметно изменялся состав оксидов меди. Из литературы известно, что при мощности магнетронного разряда 100 Вт преимущественно образуется оксид  $\text{CuO}$ .

Толщина пленок, при любой мощности магнетронного разряда, слабо зависит от величины поля. Так, во внешнем магнитном поле 120 мТл средняя толщина пленки составила 169 мкм, а без поля – 172,5 мкм. Это отличие в толщине пленки, скорее всего, связана с пространственной неоднородностью распыляемого пучка атомов мишени и отличием эффективных времен

напыления.

Результаты сканирующей электронной микроскопии показывают, что слабое внешнее магнитное поле оказывает существенное влияние на процесс формирования морфологии поверхности пленки.

При визуальном анализе SEM-изображение поверхности пленки имеют малую наглядность. Поэтому строили трехмерные картины поверхности пленок по усредненным профилям SEM-изображений поверхности пленок. Следует учесть, что при усреднении неизбежно происходит потеря информативности о структуре поверхности пленки. Из усредненных изображений видно, что в пленках, напыляемых в магнитном поле 96 мТл (рис. 22), размеры отдельных зерен на поверхности не превышают 0,45 мкм. Без внешнего магнитного поля (рис. 23) зерна не превышают 3 мкм.

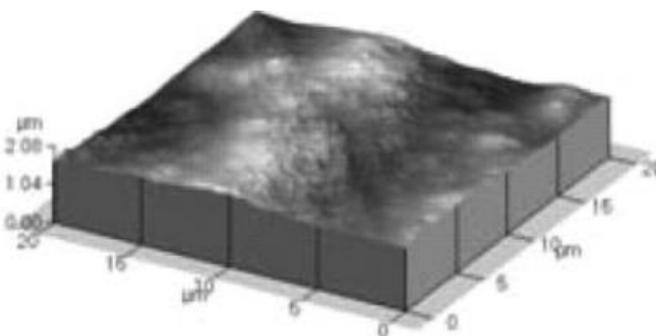


Рисунок 22 – Изображение поверхности пленки оксида меди, выращенной во внешнем магнитном поле (96 мТл)

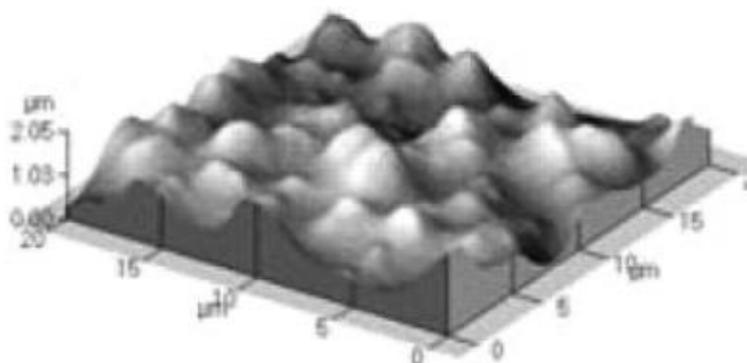


Рисунок 23 – Изображение поверхности пленки оксида меди, выращенной без магнитного поля (0 мТл)

Слабое внешнее магнитное поле позволяет увеличить вероятность появления центров кристаллизации и их увеличение до размеров выше критического, после которого процесс увеличения размера кристалла сопровождается выделением энергии (энергетически выгодно).

Известно несколько моделей формирования металлических покрытий, описанных выше. При малых размерах рост однородных кристаллов меди (оксидов меди) энергетически более выгоден. При увеличении кристаллов, с некоторого значения размера, рост кристаллов прекращается. В дальнейшем формируется новый центр кристаллизации. Так продолжается до тех пор, пока вся поверхность подложки не будет заполнена кристаллами. При большой продолжительности поверхность напыляемого материала формирует сплошную пленку.

### **3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований [22].

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- расчет бюджета научно-технического исследования.

### 3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В данной научно-исследовательской работе изучается возможность формирования пленок заданного кристаллического состава с помощью внешнего постоянного магнитного поля из низкотемпературной плазмы.

Целевым рынком результатов данного исследования будут являться микроэлектронные предприятия, космическая промышленность и смежные научные отрасли. В частности, АО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнёва, РКК «Энергия».

### 3.2 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 оценивать сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 4. 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:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i, \quad (14)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

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

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

Таблица 4 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

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. Помехоустойчивость	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Экологичность	0,18	5	3	3	0,9	0,54	0,54
3. Надежность	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
4. Простота эксплуатации	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
5. Экономичность	0,09	5	3	3	0,45	0,27	0,27
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,07	5	4	3	0,35	0,28	0,21
2. Уровень проникновения на рынок	0,07	4	5	5	0,28	0,35	0,35
3. Цена	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	5	0,4	0,4	0,4
5. Послепродажное обслуживание	0,06	5	3	2	0,3	0,18	0,12
6. Финансирование научной разработки	0,03	4	5	4	0,12	0,15	0,12
7. Срок выхода на рынок	0,04	5	4	4	0,2	1,16	0,16
8. Наличие сертификации разработки	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>62</b>	<b>52</b>	<b>46</b>	<b>4,84</b>	<b>3,81</b>	<b>3,44</b>

Использованный в работе метод по формированию пленок заданного кристаллического состава с помощью плазмы магнетронного разряда является оптимальным для использования в практических целях.

### 3.3 SWOT-анализ

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

Он проводится в несколько этапов.

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

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован. При этом рекомендуется задавать следующие вопросы:

- Какие технические преимущества вы имеете по сравнению с конкурентами?
- Что участники вашего проекта умеют делать лучше всех?
- Насколько ваш проект близок к завершению по сравнению с конкурентами?

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами. Чтобы прояснить в каких аспектах вас, возможно, превосходят конкуренты, следует спросить:

- Что можно улучшить?
- Что делается плохо?
- Чего следует избегать?

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность,

которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию. Формулирование возможностей проекта можно упростить, ответив на следующие вопросы:

- Какие возможности вы видите на рынке?
- В чем состоят благоприятные рыночные возможности?
- Какие интересные тенденции отмечены?
- Какие потребности, пожелания имеются у покупателя, но не удовлетворяются конкурентами?

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту. Для выявления угроз проекта рекомендуется ответить на следующие вопросы:

- Какие вы видите тенденции, которые могут уничтожить ваш научно-исследовательский проект или сделать его результаты устаревшими?
- Что делают конкуренты?
- Какие препятствия стоят перед вашим проектом (например, изменения в законодательстве, снижение бюджетного финансирования проекта, задержка финансирования проекта и т.п.)?
- Изменяются ли требуемые спецификации или стандарты на результаты научного исследования?
- Угрожает ли изменение технологии положению вашего проекта?
- Имеются ли у руководства проекта проблемы с материально-техническим обеспечением?

Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>  С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии;  С2. Экологичность технологии;  С3. Квалифицированный персонал;  С4. Маленький срок получения результатов при проведении научного исследования.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>  Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки;  Сл2. Недостаток финансовых средств;  Сл3. Большой срок поставок материалов, используемых при проведении научного исследования;  Сл4. У руководства НИР проблемы с материально-техническим обеспечением</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт;  В2. Повышение стоимости конкурентных разработок;  В3. Использование научно-исследовательских достижений ТПУ.</p>		
<p><b>Угрозы:</b>  У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства;  У2. Развитая конкуренция технологий производства.</p>		

После того как сформулированы четыре области SWOT переходим к реализации второго этапа.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. 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 «->». Пример интерактивной матрицы проекта представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	
	B1	+	+	–	
	B2	+	–	0	
	B3	+	0	–	
Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл.1	Сл.2	Сл.3	Сл.4
	B1	0	+	–	+
	B2	0	–	0	–
	B3	+	+	0	–
Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	+	+	+	–
	У2	+	0	0	–
Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл.1	Сл.2	Сл.3	Сл.4
	У1	+	–	–	–
	У2	0	–	–	–

Анализ интерактивных таблиц представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей, или слабых сторон и возможностей и т.д. следующего вида: B1C1C2C5; B4C1C4. Каждая из записей представляет собой направление реализации проекта.

В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в бакалаврской работе (таблица 7).

Таблица 7 – Итоговая матрица SWOT – анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>  С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии;  С2. Экологичность технологии;  С3. Квалифицированный персонал;  С4. Маленький срок получения результатов при проведении научного исследования.</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>  Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки;  Сл2. Недостаток финансовых средств;  Сл3. Большой срок поставок материалов, используемых при проведении научного исследования;  Сл4. У руководства НИР проблемы с материально-техническим обеспечением.</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт;  В2. Повышение стоимости конкурентных разработок;  В3. Использование научно-исследовательских достижений ТПУ.</p>	<p>Из данной комбинации видно, что существует возможность создания надежного и экономически выгодного способа создания пленок с помощью плазмы магнетронного разряда.</p>	<p>Спрос на новый продукт может быть увеличен за счет его технологических возможностей. Если использовать инновационную инфраструктуру и необходимое оборудование для проведения испытания опытного образца в ТПУ, то появится возможность избавиться от недостатка финансовых средств</p>
<p><b>Угрозы:</b>  У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства;  У2. Развитая конкуренция технологий производства.</p>	<p>Проведя анализ сильных сторон и угроз, видно, что вышеуказанные сильные стороны проекта могут существенно понизить процент угроз исследования.</p>	<p>Недостаток финансовых средств приводит к отсутствию спроса на новые технологии производства.</p>

### 3.4 Планирование научно-исследовательских работ

#### 3.4.1 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.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель, Бакалавр
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Бакалавр
	3	Анализ исходных данных	Бакалавр
	4	Выбор направления исследований	Бакалавр, руководитель
	5	Календарное планирование работ по теме	Бакалавр
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Моделирование технологического процесса на ПК	Бакалавр
	7	Экспериментальное исследование	Бакалавр, руководитель
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Бакалавр
	9	Анализ и обработка полученных результатов	Бакалавр
	10	Оформление пояснительной записки к ВКР	Бакалавр
	11	Подготовка к защите ВКР	Бакалавр

### 3.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

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

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (15)$$

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (16)$$

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

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

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

### 3.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (17)$$

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:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (18)$$

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 (таблица 9).

Таблица 9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнитель и	Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{min}$ , чел-дни	$t_{max}$ , чел-дни	$t_{ож}$ , чел-дни			
Составление и утверждение технического задания	3	5	3,8	Б, Р	3,8	5

Подбор и изучение материалов по теме	10	15	12	Б	12	14
Анализ исходных данных	5	7	5,8	Б	5,8	7
Выбор направления исследований	3	6	4,2	Б, Р	2,1	3
Календарное планирование работ по теме	2	2,5	2,2	Б	2,2	3
Моделирование технологического процесса на ПК	10	15	12	Б	12	14
Экспериментальное исследование	4	6	4,8	Б, Р	2,4	3
Оценка эффективности полученных результатов	5	7	5,8	Б	5,8	7
Анализ и обработка полученных результатов	2	4	2,8	Б, Р	1,4	2
Оформление пояснительной записки к ВКР	6	10	7,6	Б	7,6	9
Подготовка к защите ВКР	4	7	5,2	Б	5,2	6
<b>Итого:</b>			<b>66,2</b>		<b>60,3 Р/Б 9,7/56,5</b>	<b>73 Р/Б 13/68</b>

### 3.5 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.

### **3.5.1 Расчет материальных затрат НТИ**

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды, а также запасные части для ремонта оборудования, износа инструментов, приспособлений, инвентаря, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам, износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов;
- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;
- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований

(испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований).

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (19)$$

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.);

$C_i$  – 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.

Все материалы, используемые для создания исследовательской установки являются собственностью отделения ядерно-топливного цикла инженерной школы ядерных технологий, поэтому в расчет показателей затрат стоимость и вспомогательных, комплектующих материалов не берется.

### **3.5.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ**

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стенов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

При проведении научно-технических исследований, специальное оборудование, необходимое для проведения работ, не использовалось. Затраты на специальное оборудование для научных работ отсутствуют.

### 3.5.3 Основная заработная плата исполнителей темы

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

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (20)$$

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:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (21)$$

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

$T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (22)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб. (в качестве месячного оклада дипломника выступает стипендия, которая составляет 9893 руб. и 36800 руб. для профессора, доктора физико-математических наук);

$F_{\text{д}}$  – количество рабочих дней в месяце (среднее количество рабочих дней – 25);

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 48 раб. дней  $M=10,4$  месяца, 6-ти дневная неделя.

Баланс рабочего времени представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Баланс рабочего времени

<b>Показатели рабочего времени</b>	<b>Руководитель</b>	<b>Бакалавр</b>
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	52	52
-праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
-отпуск	56	56
-невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	243

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (23)$$

$$Z_M = 36800 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 71760 \text{ руб.},$$

где  $Z_{TC}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб. ( $Z_{TC}$  составляет 36800 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).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 11.

Таблица 11 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З <sub>ТС</sub> , руб.	k <sub>пр</sub>	k <sub>д</sub>	k <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб.	З <sub>дн</sub> , руб.	T <sub>р</sub> , раб. дн.	З <sub>осн</sub> , руб.
Руководитель	36800	0,3	0,2	1,3	71760	1472	9,7	14278,5
Бакалавр	9893	0,3	0,2	1,3	19291	771,5	56,5	43589,8
Итого								57868,3

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (24)$$

$$Z_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 14278,5 = 4312,1 \text{ руб.},$$

$$Z_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 43589,8 = 13164,1 \text{ руб.},$$

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

### 3.5.5 Расчет затрат на научные и производственные командировки

При проведении НТИ не было научных и производственных командировок, таким образом, в данном случае можно говорить, что затраты на научные и производственные командировки отсутствуют.

### 3.5.6 Контрагентные расходы

Контрагентные расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями (контрагентами, субподрядчиками), т.е.:

1) Работы и услуги производственного характера, выполняемые сторонними предприятиями и организациями.

2) Работы, выполняемые другими учреждениями, предприятиями и организациями (в т.ч. находящимися на самостоятельном балансе опытными (экспериментальными) предприятиями по контрагентским (соисполнительским) договорам на создание научно-технической продукции, головным (генеральным) исполнителем которых является данная научная организация).

В работе использовался сканирующий электронный микроскоп (SEM). Стоимость одного анализа 2000 руб. Количество анализов – 15. Общие затраты – 30000 руб.

### 3.5.7 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Эксперименты проводились 20 дней по 2 часа, мощность установки 5 кВт/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$Z_{эл} = C_{эл} \cdot P_{уст} \cdot F_{об} + C_{эл} \cdot P_{комп} \cdot F_{об}, \quad (25)$$

$$Z_{эл} = 5,8 \cdot 20 \cdot 2 \cdot 5 + 5,8 \cdot 0,054 \cdot 56,5 \cdot 4 = 1230,8 \text{ руб.},$$

где  $C_{эл}$  – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$  – время использования оборудования, ч.

Накладные затраты:

$$Z_{накл} = Z_{эл}, \quad (26)$$

$$Z_{накл} = 1230,8 \text{ руб.}$$

### 3.5.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НТИ	0	пункт 2.4.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	0	пункт 2.4.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	57868,3	пункт 2.4.3
4. Отчисления во внебюджетные фонды	17476,2	пункт 2.4.4
5. Затраты на научные и производственные командировки	0	пункт 2.4.5
6. Контрагентские расходы	30000	пункт 2.4.6
7. Накладные расходы	1230,8	пункт 2.4.7
8. Бюджет затрат НТИ	104781,4	пункт 2.4.8

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

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (табл. 9). 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:

$$I_{\text{финр}}^{\text{ипс.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (27)$$
$$I_{\text{финр}}^{\text{ипс.}i} = \frac{104781,4}{104781,4} = 1,$$

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

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

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (28)$$

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

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 13).

Таблица 13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1
1. Производительность	0,3	5
2. Энергосбережение	0,4	5
3. Надежность	0,2	4
4. Материалоемкость	0,1	4
ИТОГО	1	

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,4 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,1 = 4,7. \quad (16)$$

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что научно-техническое исследование будет ресурсоэффективно при первом варианте исполнения проекта, т.е. при высокой производительности и энергоэффективности проекта.

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

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}}, I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}} \text{ и т. д.} \quad (29)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность

проекта (таблица 14) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ ):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{исп2}}} \quad (30)$$

Таблица 14 – Сравнительная эффективность разработки

<b>№ п/п</b>	<b>Показатели</b>	<b>Исп.1</b>
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,7
2	Интегральный показатель эффективности	0,21

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## **4 Социальная ответственность**

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [23].

Правила по охране труда и техники безопасности [23] вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководителями, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

### **4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов (таблица 15), которые

классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические [24].

Таблица 15 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с установкой (сборка) и ПЭВМ, ОЯТЦ ТПУ	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)	–	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
	–	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	–	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность

На бакалавра, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

## **4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ**

### **4.2.1 Организационные мероприятия**

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

### **4.2.2 Технические мероприятия**

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно

располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 23.

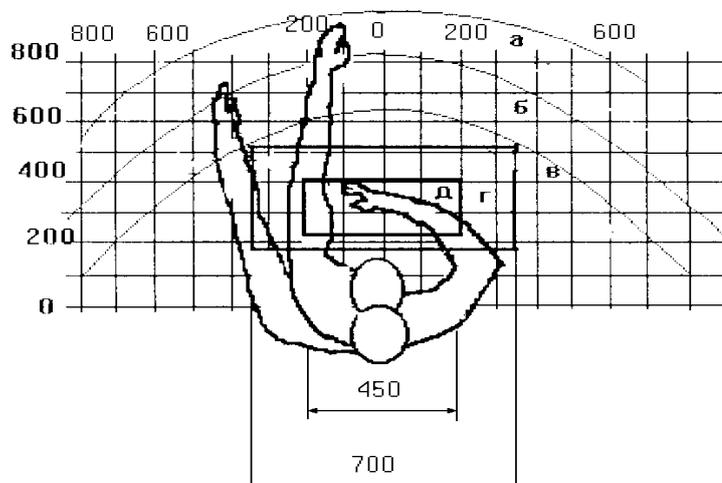


Рисунок 24 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:  
а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони в (слева) литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура,

должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной не менее 500 мм, глубиной на уровне колен не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубых

цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

### 4.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда — это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость [25].

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с и приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещении должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м<sup>3</sup> на человека – не менее 30 м<sup>3</sup> в час на человека; при объёме помещения более 40 м<sup>3</sup> на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными

требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основным недостатком такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц–2 кГц: 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц–400 кГц: 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц–2 кГц: 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц–400 кГц: 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

### **4.3 Электробезопасность**

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электрическими установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования [26].

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами.

Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;

- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, заклчение в корпус токоведущих частей).

#### **4.4 Пожарная и взрывная безопасность**

В зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий [27].

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;

- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководителю;
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры в соответствии с инструкцией.

## **Выводы**

1. Проведен обзор методов получения тонких металлических пленок и механизмов их роста.
2. Изготовлен магнетронный источник мощностью 30 Вт, работающий при давлении  $10^{-2}$  мм рт. ст. и собрана экспериментальная установка для формирования пленок во внешнем постоянном магнитном поле, задаваемом в диапазоне 3 – 150 мТл.
3. Методом магнетронного напыления получены пленки, содержащие как локальные участки меди, так и ее оксиды. Установлено, что размеры отдельных зерен на поверхности пленки без магнитного поля не превышают 3 мкм, а в магнитном поле 96 мТл составляют 0,45 мкм.

\* \* \*

Результаты исследований могут быть использованы для улучшения характеристик напыляемых пленок на предприятиях микроэлектроники, космической промышленности, медицине и смежных научных отраслей.

## Список публикаций студента

- 1) Загузин И.Ю. Исследование распределения концентрации изотопов  $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$  по объему кристаллов  $\text{NaCl}$ , выращенных из водного раствора в магнитном поле / Макаревич С.В., Григорьев А.С., Гамов Д.Л. , Роздольский В.Г., Загузин И.Ю. // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов IV Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 30 Октября-3 Ноября 2017. - Томск: Графика, 2017 - С. 23
- 2) Загузин И.Ю. Исследование кристаллизации  $\text{NaCl}$  из водного раствора, находящегося в магнитном поле / Макаревич С.В., Григорьев А.С., Загузин И.Ю., Юрьев П. А. // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов IV Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 30 Октября-3 Ноября 2017. - Томск: Графика, 2017 - С. 51
- 3) Загузин И.Ю. Особенности формирования изотопных кластеров в твердом теле и их влияние свойства материалов / Хорохорин Д.М., Загузин И.Ю., Юрьев П.А., Леонтьева Д.А. // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов IV Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 30 Октября-3 Ноября 2017. - Томск: Графика, 2017 - С. 52
- 4) Zaguzin I. Y. Research of the  $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$  isotope concentration distribution over the volume of  $\text{NaCl}$  crystals grown from an aqueous solution in a magnetic field / Myshkin V. F. , Makarevich S. V. , Grigorjev A. S. , Zaguzin I. Y. , Gamov D. L. // AIP Conference Proceedings. - 2018 - Vol. 1938, Article number 020005. - p. 1-5

## Список использованных источников

- 1) Бизюков А.А., Серeda К.Н., Слепцов В.В. Сильноточный магнетронный разряд с магнитоизолированным анодом // Вопросы атомной науки и техники, 2008, №4, с.179-183
- 2) Вересов Л.П., Вересов О.Л. Магнетронный источник ускоренного плазменного потока // ЖТФ, 2016, Т. 86, Вып. 1. С. 61 – 68
- 3) Vacuum Technology, Thin Film Sputtering / R.V. Stuart // Acad. Press, 1983.
- 4) D.G. Teer «Evaporation and Sputter Techniques», in «Coatings for High Temperature Applications», E. Lang (Ed), Applied Sci. Publ., NY, 1983. – P. 79.
- 5) J.A. Thornton «Deposition Technologies for Films and Coatings», R.F. Bunshah (Ed.), Publ. Noyes, Park Ridge, NJ, 1982.
- 6) Ion beam sputter deposition of SmCo permanent magnetic thin films for microsystems applications / R. Balu, A.R. Raju and S. Mohan // Proceedings of ISSS International Conference on Smart Materials Structures and Systems, Bangalore, India, 2005.
- 7) Ion bombardment control of morphology during the growth hydrogenated amorphous silicon thin films by reactive ion beam deposition / A. Kasdan, D.P. Goshorn // Appl. Phys. Lett., 1983, – V. 42, № 1. – P. 36–38.
- 8) Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. – М.: Радио и связь, 1982. – 72 с.
- 9) В.В. Жуков, В.П. Кривобоков, В.В. Пацевич, С.Н. Янин. Свойства магнетронного разряда на постоянном токе. Ч. 2. Особенности переноса заряда // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 1. С. 56 – 59.
- 10) Кривобоков В.П. Плазменные покрытия (методы и оборудование): учебное пособие / В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Соловьёв. – Томск: Изд-во Томского политехнического

- университета, 2008. – 104 с.
- 11) Вертц Дж., Болтон Дж., Теория и практические приложения метода ЭПР, М.: 1975. – С.243-247.
  - 12) Альтшулер С.А., Козырев Б.М. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп, М.: Наука, 1972. - 231с.
  - 13) Бучаченко А.Л.. Химическая поляризация электронов и ядер. – М.; Наука, 1974, 245 с.
  - 14) Сликтер Ч. Основы теории магнитного резонанса. - М.: Мир, 1981. - 448 с.
  - 15) Дубровский, В. Г., Сибирев, Н. В., Цырлин, Г. Э., & Устинов, В. М. (2006). Теория формирования многослойных тонких пленок на поверхности твердого тела. Физика и техника полупроводников, 40(3), 257-263.
  - 16) С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, Процессы конденсации тонких пленок, УФН, т. 168, №10, 1998, с. 1083-1116.
  - 17) Григорьев Д.А., Кукушкин С.А. Механизмы и кинетика начальных стадий роста пленок, выращиваемых методом химического газофазного осаждения // Журнал технической физики. – 1998. – Т. 68. – № 7. – С. 111–117.
  - 18) Дунюшкина Л.А. Введение в методы получения пленочных электролитов для твердооксидных топливных элементов: монография / Л.А. Дунюшкина. – Екатеринбург: УРО РАН, 2015. – 126 с.
  - 19) Левицкий В.С., Шаповалов В.И., Комлев А.Е., Завьялов А.В., Витько В.В., Комлев А.А., Шутова Е.С. Комбинационное рассеяние света в пленках оксида меди, осажденных реактивным магнетронным распылением // Письма ЖТФ. 2015. Т. 85, Вып. 22. С. 55–60.
  - 20) В.В. Левичев, Электронные и фотонные устройства: принцип работы, технологии изготовления. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.

- 21) Пичугин В.Ф. Материаловедение поверхности и тонких пленок. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 173 с.
- 22) Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. В426 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсо-сбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Креницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
- 23) Кукин П.П. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств: учеб. Пособие / П.П. Кукин, В.Л. Лапин – М.: Высшая школа, 1999. – 318с.
- 24) Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 №181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07. – С. 4
- 25) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с.
- 26) ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с.
- 27) СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 6 с.