

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 03.04.02 «Физика конденсированного состояния»  
 Отделение школы (НОЦ) – Экспериментальной физики

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

<b>Тема работы</b>
<b>Исследование свойств медных покрытий, полученных в режиме самораспыления при работе магнетрона с испаряющейся мишенью</b>

УДК 669.33:621.793.7:621.385.64

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ71	Торломоев Алексей Эженович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ ТПУ	Юрьева Алена Викторовна	к.т.н		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Меньшикова Екатерина Валентиновна	Кандидат философских наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Исаева Елизавета Сергеевна			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ ИЯТШ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

Томск – 2019 г.

## 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные (универсальные) компетенции</i>		
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-7), критерий 5 АИОР
P2	Проявляет способность эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.	Требования ФГОС (ОК-6, ПК-11), критерий 5 АИОР
P3	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.	Требования ФГОС (ОК-2, ОК-4), критерий 5 АИОР
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.	Требования ФГОС (ОК-3), критерий 5 АИОР
P5	Следует кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно-исследовательской деятельности.	Требования ФГОС (ОК-5), критерий 5 АИОР
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P6	Проявляет глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-1), критерий 5 АИОР
P7	Принимает участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики низких температур, конденсированного состояния и материаловедения, а также в модернизации современных и создании новых методов изучения механических, электрических, магнитных и тепловых свойств твердых, жидких и газообразных	Требования ФГОС (ПК-2), критерий 5 АИОР

	веществ.	
P8	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-4), критерий 5 АИОР
P9	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики конденсированного состояния, низких температур и сжижения природного газа.	Требования ФГОС (ПК-3), критерий 5 АИОР
P10	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС (ОК-4, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9), критерий 5 АИОР
P11	Умеет интегрировать знания в различных и смежных областях научных исследований и решает задачи, требующие абстрактного и креативного мышления и оригинальности в разработке концептуальных аспектов проектов научных исследований.	Требования ФГОС (ОК-5, ПК-10), критерий 5 АИОР

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 03.04.02 «Физика конденсированного состояния»  
 Отделение школы (НОЦ) – Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

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

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0БМ71	Торломоев Алексей Эженович

Тема работы:

<b>Исследование свойств медных покрытий, полученных в режиме самораспыления при работе магнетрона с испаряющейся мишенью</b>
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Медная мишень</li> <li>2. Магнетронная распылительная система с жидкофазной мишенью.</li> <li>3. Источники питания: среднечастотный и сильноточный.</li> <li>4. Экспериментальное оборудование: вакуумная ионно-плазменная установка, измеритель шероховатости, электросопротивления, сканирующий электронный микроскоп и прибор для рентгеноструктурного анализа</li> </ol>
---------------------------------	--

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Литературный обзор по теме исследования</li> <li>2. Получение медных пленок толщиной 1 мкм с помощью магнетронно распылительной системы с жидкой мишенью с использованием различных источников питания и режимов распыления.</li> <li>3. Изучение шероховатости образцов.</li> <li>4. Изучение электропроводимости образцов</li> <li>5. Изучение структуры образцов.</li> <li>6. Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение</li> <li>7. Социальная ответственность</li> </ol>
---	---

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП к.т.н. Меньшикова Екатерина Валентиновна
Социальная ответственность	Старший преподаватель ООД ШБИП Исаева Елизавета Сергеевна
Раздел на английском языке (Приложение А)	Преподаватель ОИЯ ШБИП Шайкина Ольга Игоревна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Литературный обзор	

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

**Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Юрьева Алена Викторовна	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОБМ71	Торломоев Алексей Эженович		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
<b>0БМ71</b>	<b>Торломоев Алексей Эженович</b>

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа ядерных технологий</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Отделение экспериментальной физики</b>
<b>Уровень образования</b>	<b>Магистрант</b>	<b>Направление/специальность</b>	<b>03.04.02 «Физика конденсированного состояния»</b>

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Амортизационные отчисления – 3196 руб., стоимость сырья, материала – 42745 руб., заработная плата – 93057 руб. и отчисления на социальные нужды – 28893 руб.</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Нормы амортизации – 20%, нормы премии по счету заработной платы – 0,3; коэффициент доплат и надбавок – 0,3; районный коэффициент – 1,3; коэффициент дополнительной зарплаты – 15%</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды – 27,1%</i>

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

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Потенциальные потребители результатов исследования Разработка анализа конкурентоспособности Выполнение SWOT-анализа проекта.</i>
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИ</i>
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Проведение оценки ресурсной и финансовой эффективности исследования.</i>

**Перечень графического материала:**

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>2. Матрица SWOT</li> <li>3. Альтернативы проведения НИ</li> <li>4. График проведения и бюджет НИ</li> <li>5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</li> </ol>	
---	--

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Меньшикова Екатерина Валентиновна	Кандидат философских наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ71	Торломоев Алексей Эженович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОБМ71	Торломоев Алексей Эженович

<b>Школа</b>	Инженерная школа ядерных технологий	<b>Отделение (НОЦ)</b>	Экспериментальной физики
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление/специальность</b>	Физика конденсированного состояния

Тема ВКР:

Исследование свойств медных покрытий, полученных в режиме самораспыления при работе магнетрона с испаряющейся мишенью	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Прибор: Вакуумная установка «Комплект вакуумного оборудования» (КВО) Рабочая зона: лаборатория; Материал: Медная мишень, молибденовый тигель.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ</li> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования</li> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года)</li> <li>– ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения)</li> <li>– ГОСТ Р ИСО 6385-2016 Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем</li> </ul>

	– ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего;</li> <li>– вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде;</li> <li>– вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями переменного характера;</li> <li>– вредные производственные факторы, связанные со световой средой;</li> <li>– опасные производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей; электрических потенциалов,</li> <li>– пожароопасность.</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	В процессе выполнения работы могут возникнуть проблемы с емкостями для хранения и использования аргона.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: <ul style="list-style-type: none"> <li>– выбросы ядовитых веществ,</li> <li>– пожары,</li> <li>– взрывы</li> <li>– диверсии</li> <li>– природные катаклизмы</li> </ul> Наиболее вероятным ЧС является наступление сильных морозов, пожары.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Исаева Елизаветта Сергеевна			

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 03.04.02 «Физика конденсированного состояния»

Уровень образования – магистратура

Отделение школы (НОЦ) – Экспериментальной физики

Период выполнения \_\_\_\_\_

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы: \_\_\_\_\_

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
11.03.2019	Литературный обзор по теме исследования	15
01.04.2019	Получение образцов при различных параметрах работы и источника питания	15
02.04.2019	Исследование свойств полученных результатов	20
26.04.2019	Анализ результатов	15
25.05.2019	Социальная ответственность	15
25.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
25.05.2019	Заключение	5

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Вейнберга ИЯТШ ТПУ	Юрьева Алена Викторовна	к.т.н		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ ИЯТШ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 123 с., 21 рис., 32 табл., 27 источников, 1 приложение.

**Ключевые слова:** свойства медных покрытий, тонкие медные пленки, магнетронная распылительная система с жидкой мишенью, шероховатость, электропроводимость, микроструктура.

***Объектом исследования:*** Медные пленки, полученные с помощью МРС с жидкой мишенью.

***Цель работы:*** Исследовать влияние различных режимов работы, источников питания на свойства полученных тонких медных пленок в зависимости от состояния мишени.

В процессе исследования был проведен литературный обзор по теме работы и получены медные тонкопленочные покрытия, исследована их шероховатость, структура и электрическое сопротивление.

**В результате исследования** обнаружено, что шероховатость и структура тонких пленок не зависит от источника питания; для медных пленок толщиной 1 мкм шероховатость увеличивается при использовании жидкой мишени. Скорость осаждения увеличивается при использовании МРС с жидкой мишенью; сопротивление падает при использовании жидкофазного магнетрона при работе в режиме самораспыления.

**В первой главе** рассмотрены методы получения тонких покрытий, так же был рассмотрен метод получения тонких металлических покрытий с помощью магнетронной распылительной системы с жидкой мишенью и конструкционные особенности самого устройства. В том числе были исследованы способы формирования тонких пленок и параметры, влияющие на свойства тонких металлических пленок.

**Во второй главе** было описано экспериментальное оборудование и методика получения тонких металлических покрытий с помощью магнетронной распылительной системы с жидкой мишенью.

**В третьей главе** представлены результаты исследования влияния источника питания и режима распыления на шероховатость, электропроводимость и структуру тонких медных покрытий.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования по финансовому менеджменту, ресурсоэффективности и ресурсосбережению для проведенной работы.

**В пятой главе представлены** результаты исследования по социальной ответственности для проведенной работы.

**Область применения:** результаты работы могут быть использованы в качестве информационных рекомендаций при создании тонких медных пленок с определенными требованиями.

Содержание	
Введение.....	15
Глава 1 Тонкие металлические покрытия.....	17
1.1 Методы получения тонких металлических покрытий.....	17
1.1.1 Термическое испарение.....	18
1.1.2 Катодное распыление.....	20
1.2 Магнетронные распылительные системы.....	22
1.3 Магнетронная распылительная система с жидкофазной мишенью.....	29
1.4. Механизмы формирования и свойства тонких пленок.....	37
1.4.1. Механизмы формирования тонких пленок.....	37
1.4.2 Параметры, влияющие на свойства тонких пленок.....	40
Глава 2. Экспериментальное оборудование.....	43
2.1 Вакуумная ионно-плазменная установка.....	43
2.2 Рентгеновский дифрактометр SHIMADZU XRD 6000.....	44
2.3 Трехмерный бесконтактный профилометр.....	46
2.4 Измерение электрического сопротивления покрытий.....	47
2.5 Сканирующая электронная микроскопия.....	48
Глава 3. Результаты и обсуждение.....	50
3.1 Методика получения медных покрытий.....	50
3.2 Анализ шероховатости поверхности.....	51
3.3 Электросопротивление.....	54
3.4 Рентгеноструктурный анализ.....	56
3.5 Структура медных пленок.....	57
Выводы.....	60
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	61
4.1 Потенциальные потребители исследования.....	61
4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	62
4.3 SWOT-анализ.....	64
4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	65
4.5 Инициация проекта.....	68
4.5.1 Заинтересованные стороны проекта.....	68

4.6 План проекта.....	70
4.7 Бюджет научного исследования.....	71
4.8 Реестр рисков проекта .....	78
4.9 Оценка сравнительной эффективности исследования.....	79
Выводы.....	83
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	84
5.2. Вредные факторы проектируемой производственной среды.....	86
5.2.1 Вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего .....	89
5.2.2 Вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями переменного характера .....	91
5.2.3 Вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде .....	92
5.2. 4 Вредные производственные факторы, связанные со световой средой .....	93
5.2.5 Выявление опасных факторов проектируемой производственной среды .....	93
5.2.6 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека .....	94
5.2.7 Пожаровзрывоопасность.....	96
5.3 Правила безопасной работы на установке «КВО» .....	98
5.4 Экологическая безопасность.....	100
5.5 Защита в чрезвычайных ситуациях .....	100
Выводы.....	102
Заключение .....	103
Список литературы .....	104
Приложение А .....	107

## **Введение**

Научно-техническое направление, связанное с получением и применением тонких металлических пленок, за последние десятилетия приобрело стремительный рост и во многих отраслях современного производства занимает ключевые позиции. Нанесение тонкоплёночных покрытий даёт большие возможности по получению необходимых поверхностных свойств изделий.

Тонкие пленки позволяют изменить химический состав и структуру поверхности, её физические и химические свойства, степень чистоты обработки поверхности и её микрогеометрию.

В настоящее время, использование тонких пленок в микроэлектронике, СВЧ-технике, оптике и многих других отраслях науки и техники открывает перспективы создания и совершенствования не только новых приборов, но и целых технологических направлений.

Пленки меди, наносимые в вакууме, широко применяются в производстве дискретных полупроводников приборов и интегральных микросхем. Их принято считать эталоном электрической проводимости и теплопроводности по отношению к другим металлам.

Тонкоплёночные проводящие материалы должны обладать следующими свойствами: высокой электропроводностью, хорошей адгезией к подложке, способностью к сварке или пайке, химической инертностью.

Во многом свойства покрытий зависят от способа их получения. Одним из самых распространённых способов их нанесения являются магнетронные распылительные системы (МРС). К их главным достоинствам можно отнести: отсутствие капельной фазы (в отличие от термического испарения с использованием вакуумно-дугового нагрева или дугового распыления), ионное ассистирование поверхности, возможность производить осаждение покрытий на подложки большой площади и относительная простота конструкции.

Однако для МРС характерны и недостатки: низкая скорость напыления (по сравнению с дуговыми распылителями и термическим испарением в вакууме), низкая энергетическая эффективность, за счет отвода мощности разряда системами охлаждения. Следовательно, сегодня актуальными задачами в области методов магнетронного распыления являются увеличение скорости осаждения и равномерности нанесения, улучшения адгезионных свойств и снижения количества вредных примесей в покрытиях.

При использовании МРС с жидкофазной мишенью скорость осаждения выше (в отличие от стандартного магнетрона) за счет того, что в качестве катода используется металл в тигле, который теплоизолируется от системы охлаждения и нагревается до температуры испарения под воздействием ионов плазмы. Преимущество МРС с жидкофазной мишенью от других систем состоит в большей скорости напыления плёнок, и уменьшении удельных затрат энергии на удаление атома мишени. Однако данные устройства подробно еще не изучены.

**Цель:** Исследовать влияние различных режимов работы и источников питания на свойства полученных тонких медных пленок в зависимости от состояния мишени.

**Задачи,** необходимые для решения поставленной цели:

1. Изучить режимы работы МРС с жидкой мишенью.
2. Получить образцы тонких пленок толщиной 1мкм с помощью МРС с жидкой мишенью в различных условиях распыления ( $Ar^+$  и  $Ar^-$ ) и с использованием различных источников питания (среднечастотный и сильноточный источник питания).
3. Исследовать свойства полученных тонких пленок: шероховатость, структуру и электропроводимость.

## **Глава 1 Тонкие металлические покрытия**

### **1.1 Методы получения тонких металлических покрытий**

Существует много методов нанесения тонких металлических покрытий, среди которых отдельно можно выделить вакуумные ионно-плазменные технологии. По способу формирования потоков осаждаемых частиц их делят на две подгруппы. К первой группе относят физические методы осаждения из паровой фазы (PVD-Physical Vapor Deposition), ко второй подгруппе относят химические методы осаждения из паровой фазы (CVD-Chemical Vapor Deposition).

К физическим методам осаждения относят: термическое и лазерное испарение; катодное распыление; магнетронное распыление и ионно-лучевое распыление. Тогда как к химическим методам осаждения можно отнести: осаждение из газовой фазы; плазмохимическое осаждение из газовой фазы.

Для осаждения плёнок металлов в целях металлизации диэлектрических пластин наиболее предпочтительно использовать физические методы осаждения, это связано с основными рабочими параметрами процессов физического осаждения и их преимуществами относительно химических методов формирования покрытий. Среди основных преимуществ принято выделять следующие: высокую стабильность и повторяемость процесса; возможность автоматизации; возможность управления скоростью осаждения с большей точностью; высокая чистота покрытий.

К основным причинам, по которым методы химического осаждения не используются для формирования плёнок металлов, относят:

- непостоянство скорости;
- необходимость высокой температуры (минимум 300 °С);
- плохая стабилизация процесса;

- использование исходных реагентов в виде газа, что приводит к необходимости применения специальных систем защиты человека от поражения летучих соединений;

- необходимость утилизации летучих отходов химической реакции;

- сложность локализации процесса осаждения покрытий из-за реализации химической реакции во всём объёме рабочей камеры.

Ввиду вышеописанных параметров наиболее часто в технологических цепочках производства диэлектрических пластин с металлизацией используются именно физические методы осаждения покрытий [1].

### 1.1.1 Термическое испарение

Первый метод, который рассматривается в данной работе это термическое испарение [2,3]. Для получения покрытий с помощью термического испарения необходимо нагреть исходный материал до его температуры плавления  $T_{пл}$ , при которой материал переходит в жидкую фазу. При дальнейшем повышении температуры начинается процесс интенсивного испарения. Для достижения материалом температуры плавления обычно используют Джоулев нагрев. В качестве тигля используют вещества, которые обладают более высокой температурой плавления, чем испаряемый материал. Поскольку если температура плавления тигля будет меньше или равна температуре плавления испаряемого материала, то может произойти разрушение тигля. В качестве материала тигля обычно используют молибден, проводящую керамику на основе оксидов и нитридов и вольфрам, т.е. тугоплавкие проводящие материалы. В таблице 1 представлены рекомендуемые материалы тигля.

Таблица 1 – Температуры плавления металлов [3]

Элемент	Атомная масса, а.е.м.	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$T_y, ^\circ\text{C}$	Рекомендуемые материалы тигля
Ag	107,9	961	1047	Mo, C

Al	27	660	1150	C,BN
Au	197	1063	1465	Mo, C
Cr*	52	1800	1205	-
Cu	63,5	1083	1273	Mo, C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ge	72,6	959	1251	W, C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Mg*	24,3	651	443	FeC
Mn	54,9	1244	980	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Mo**	95,9	2622	2533	-
Ni	58,7	1455	1510	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub>
Pt	195	1774	2090	ZrO <sub>2</sub>
Si	28	1415	1342	BeO, ZrO <sub>2</sub>
Ta**	181	2996	3070	-
Ti*	47,9	1725	1546	-
W**	183,9	3382	3309	-

Примечание:

\* Испаряется из твердого состояния (сублимируется).

\*\* Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой.

Из-за механизма формирования потока частиц, направленных на подложку, можно сделать предположение о том, что скорости осаждения плёнок металлов крайне высоки, что учитывается при технологическом использовании. Так же следует заметить, что процесс испарения инертен, поэтому трудно контролировать скорость осаждения. Кроме того, механизм испарения возможен в высоком вакууме, т.к. большое давление в рабочей среде при испарении ведет к уменьшению средней длины свободного пробега. Падение длины свободного пробега приводит к тому, что теряется направление потока частиц, что в свою очередь приводит к снижению скорости осаждения и загрязнению покрытия во время его формирования. По этой причине для образования сверхчистых металлических покрытий используется высокий вакуум порядка  $10^{-5} - 10^{-3}$  Па.

Во время процесса испарения энергия частиц, которые осаждаются на подложку, составляет 0,1 ... 1 эВ. Так же процесс испарения на подложку является неравномерным. Из-за низкой энергии осаждаемых частиц и неравномерности процесса покрытия могут обладать неудовлетворяющими свойствами. Для решения неравномерности по толщине используют удаление подложки от испарителя, сферический держатель, движение подложек в области осаждения и использование нескольких испарителей.

Достоинства и недостатки метода термического испарения [3]:

Достоинства:

- 1) Высокая скорость осаждения
- 2) Высокая производительность
- 3) Высокий вакуум

Недостатки:

- 1) Трудность испарения тугоплавких материалов
- 2) Высокая инертность испарителей

### 1.1.2 Катодное распыление

Метод основан на выбивании атомов ускоренными газовыми ионами из твердого тела. Через катод (мишень) и анод (подложка) подается разность потенциалов (рис. 1).

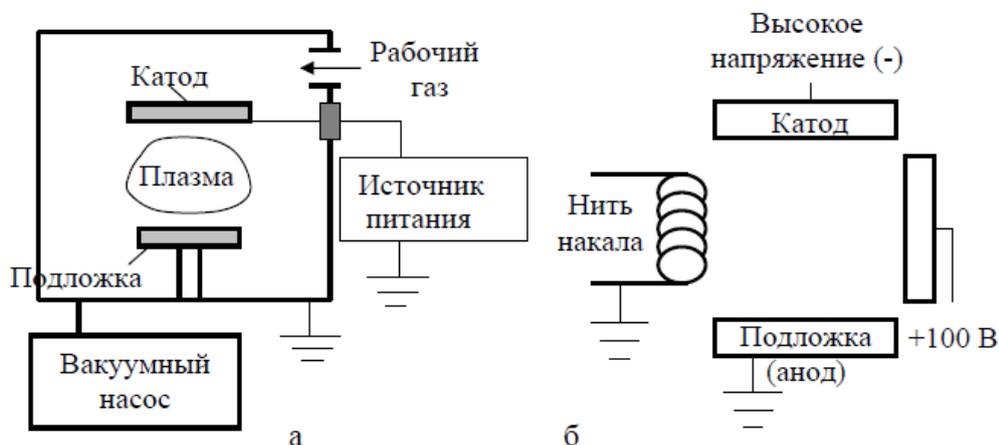


Рис. 1 – Схема нанесения покрытий при диодном (а) и триодном (б) распылении [3]

При этом происходит ионизация газовой среды (аргон или инертный газ) за счет столкновения с ускоренными электронами. Значения напряжения и тока для катодного распыления высокие (3-5 кВ и 10-100 мА) по причине того, что ионизация межэлектродного промежутка уменьшается по мере уменьшения напряжения и тока.

Этапы процесса катодного распыления [4,5]:

1. Производится откачка вакуумной камеры, остаточное давление должно быть в пределах от  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  Па, затем в рабочую камеру напускают инертный газ (аргон). При этом давление в камере должно составлять не менее 1-10 Па в зависимости от типа материала катода и его геометрических размеров.

2. Подается разность потенциалов (потенциал, поданный на катод должен быть в пределах от 1 до 10 кВ, типичные токи для катодного распыления – 0,01-1 А). Под действием электрического поля происходит ускорение свободных электронов, находящихся в области распыляемого катода, в сторону подложки от катода. Ускоренные электроны набирают энергию достаточную для ионизации атомов рабочей среды (которая преимущественно состоит из атомов аргона). В результате столкновительного механизма взаимодействия электронов и нейтральных атомов происходит образование двух электронов и одного положительного иона, такой механизм носит лавинообразный характер.

3. Положительные ионы рабочего газа ускоряются в область катода и распыляют его. Распылённые атомы летят в сторону подложки и конденсируются на ней. Таким образом, реализуется процесс катодного распыления металлов.

Достоинства и недостатки метода катодного распыления.

Достоинства:

- 1) Высокая однородность покрытий
- 2) Неинерциальный характер испарения

### 3) Повышенная адгезия

Недостатки:

1) Низкая скорость распыления

2) Низкий вакуум

3) Нагрев подложки и образование радиационных дефектов

Дальнейшим развитием техники катодного распыления является триодное распыление. В данной системе дополнительно вводится электрод, который имеет положительный потенциал (+100 В). Данный электрод увеличивает плотность ионного тока на катод и повышает скорость осаждения.

## 1.2 Магнетронные распылительные системы

Магнетронные распылительные системы (МРС) – это устройства, пришедшие на замену катодному распылению, интенсивно применяются при производстве тонких металлических покрытий с начала 70-х годов. Внедрение МРС получило широкое распространение и вытеснило другие технологии формирования тонких пленок металлов такие как: термовакuumное и электронно-лучевое испарение.

Устройство магнетронной распылительной системы представлено на рис. 2.

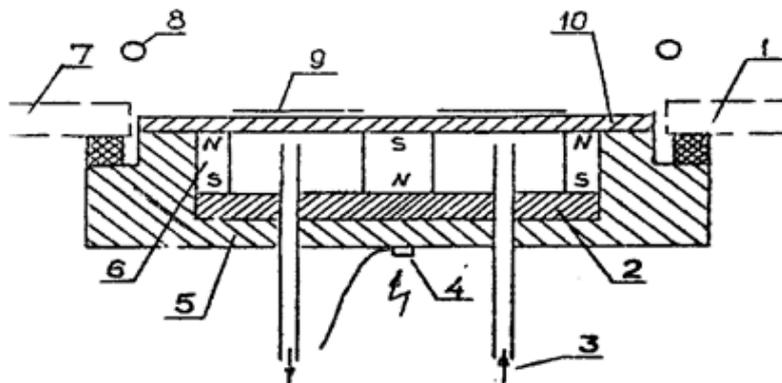


Рис.2 – Схема планарной магнетронной системы: 1 – керамические прокладки; 2 – основание; 3 – водяной канал; 4, 5 – корпус; 6 – постоянные магниты; 7 – вакуумная камера; 8 – анод; 9 – зона эрозии; 10 – катод – мишень [4]

Магнитное поле играет роль ловушки для электронов. В ловушке электроны совершают прецессии, которая повышает частоту их столкновений с атомами рабочей среды, что приводит к повышению ионизации и плотности тока. В прикатодной области магнитное поле не воздействует на ионы, у которых радиус кругового движения меньше ларморовского радиуса, в данной области вектор магнитной индукции составляет 10-100 мТл. По этой причине у магнетронных распылительных систем невысокая производительность (2мкм/мин).

Процесс осаждения делится на несколько этапов:

- подача отрицательного потенциала на катод относительно анода;
- интенсивная ионизация атомов рабочей среды и формирование плазмы в области тлеющего разряда;
- ускорение ионов в прикатодном слое в область мишени. Доля ионов в прикатодном слое по расчетам в приведенным в работе [6] составляет около 90% от общего тока;
- распыление материала мишени на подложку при энергиях порядка 0,5...0,7 кэВ.

**Определим основные этапы процесса магнетронного распыления:**

1. Производится откачка вакуумной камеры, остаточное давление должно быть в пределах от  $10^{-1}$ - $10^{-2}$ Па, затем в рабочую камеру напускают инертный газ (аргон). При этом давление в камере должно составлять не более 0,1 Па в зависимости от типа материала катода и его геометрических размеров.

2. Подается разность потенциалов (потенциал, поданный на катод должен быть в пределах от 300 до 1000 В, типичные токи для магнетронного распыления – 1-20 А). Под действием электрического поля происходит ускорение свободных электронов, находящихся в области распыляемого катода, в сторону подложки от катода. Ускоренные электроны набирают энергию достаточную для ионизации атомов в рабочей среде (которая преимущественно состоит из атомов аргона). В результате сталкиваемого

механизма взаимодействия электронов и нейтральных атомов происходит образование двух электронов и одного положительного иона, такой механизм носит лавинообразный характер.

3. Положительные ионы рабочего газа ускоряются в область мишени и распыляют его. Распылённые атомы летят в сторону подложки. Электроны попадают в магнитные ловушки, которые усиливают процесс ионизации, изменяя их траекторию под действием силы Лоренца, т.е. увеличивает количество столкновений между атомами и электронами.

Для описания характеристик МРС используют: напряжение на электродах, ток разряда, плотность тока на мишени, мощность, индукцию магнитного поля и давление рабочей среды. Перечисленные параметры связаны между собой и от их значений и стабильности зависит воспроизводимость свойств нанесенных пленок и стабильность разряда МРС. В качестве источника питания для МРС могут использоваться как постоянные источники, так и переменные источники тока (разной частоты) поскольку МРС относится к низковольтным системам распыления.

Магнетронные распылительные системы классифицируют:

- 1) по геометрии (планарные, дисковые, цилиндрические, сложной геометрии и др.);
- 2) по типу источника питания (на постоянном токе, на переменном токе, импульсно-периодические, пакетные);
- 3) по типу магнетронного разряда (стационарные, сильноточные);
- 4) по рабочему диапазону частот источника питания (низкочастотные, среднечастотные, высокочастотные);
- 5) по принципу формирования магнитного поля (на постоянных магнитах, с помощью электромагнитов);
- 6) по типу магнитного поля (сбалансированные, несбалансированные);
- 7) по типу мишени (с твердотельной мишенью, с жидкофазной мишенью).

Своим разнообразием конфигураций МРС обязана тому, что их используют для достижения различных технологических задач. Но чаще всего для распыления тонких металлических пленок используют планарные МРС, работающие на постоянном токе. Процесс напыления происходит в инертной газовой среде ( $10^{-2}$ - $10^{-1}$ Па). Инертный газ используется для уменьшения загрязнения тонких металлических пленок химическими включениями и для достижения максимальной производительности МРС. В случае если мощность разряда низкая, ионы рабочего газа будут встраиваться в структуру покрытия и ухудшать свойства пленок.

По типу конструкции МРС различают: дисковые, протяженные, цилиндрические, дуальные, конусные.

Наиболее распространённой конструкцией является МРС с плоской мишенью: дисковые и планарные МРС (рис. 3, а). Такие МРС применяются при нанесении упрочняющих покрытий, проводящих дорожек, отражающих и интерференционных покрытий. МРС с дисковой мишенью используется в случае, когда необходимо осаждать покрытие на небольшую площадь. В случае если необходимо модифицировать подложки значительной площади используют цилиндрические МРС (рис. 3, б), которые позволяют максимально загружать камеру обрабатываемыми изделиями. Магнитная система цилиндрических МРС состоит из нескольких магнитов, разделенных ферромагнитными вставками. Цилиндрические МРС с подвижной магнитной системой были созданы с целью повышения коэффициента используемого материала, тогда как в планарных МРС используется 35-45% материала мишени.

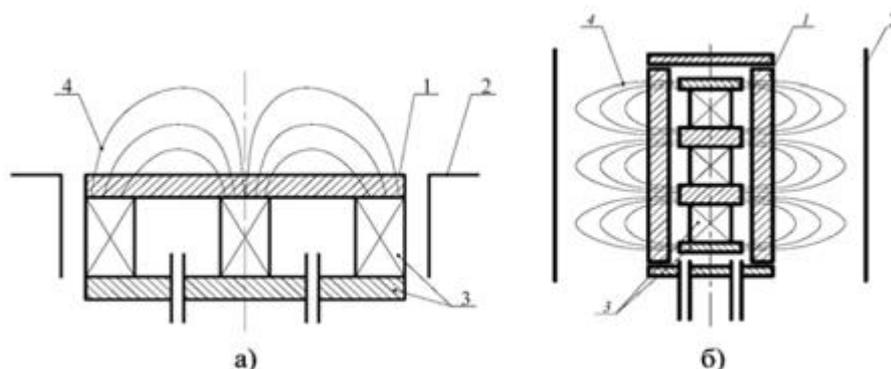


Рис.3 – Основные конструктивные схемы МРС (а - планарная МРС, б - цилиндрическая МРС): 1 – катод-мишень; 2 – анод; 3 – магнитная система; 4 – силовые линии магнитного поля [4].

Также распыление осуществляется сдвоенными магнетронами (рис. 4), питание которых осуществляется среднечастотными импульсами. При использовании дуальных магнетронов поверхности мишеней поочередно перезаряжаются и очищаются, что препятствует образованию большого сплошного слоя диэлектрика, который накапливает положительный заряд на своей поверхности. Дуальные магнетроны используются для получения пленок сплавов или при реактивном процессе для получения соединения металлов (оксидов, нитридов). Их отличительной чертой является то, что они могут иметь мишени с одинаковыми или разными металлами.

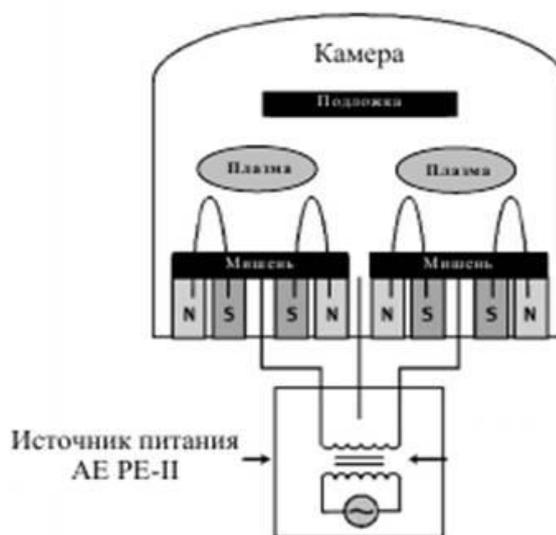


Рис.4 – Схема дуальной МРС. [5]

При объединении МРС с плоским дисковым катодом и коническим катодом позволяет получить высокую равномерность толщины покрытия на покрытиях диаметром конического катода. Данные МРС применяются для нанесения магнитных покрытий на дисках накопителей.

По типу источника питания выделяют:

- на постоянном токе;
- импульсные низкочастотные (0,1-1 кГц);
- импульсные среднечастотные (1-400 кГц);
- импульсные высокочастотные (400 кГц-13,56 МГц).

Частота переменного тока, питающего напряжение в МРС находится в диапазоне от 2кГц до 30 МГц, тогда как у импульсных МРС частота находится в диапазоне от 2кГц до 100кГц. По этой причине МРС с постоянным источником питания уступают первенство при реактивных процессах в пользу МРС с переменным источником питания. В случае, когда частота достигает нескольких МГц, используют высокочастотные МРС для распыления диэлектрических материалов. В высокочастотных МРС используется емкостный высокочастотный разряд, но из-за сложности их конструкций и ограничения в производительности их использование встречается редко.

По конфигурации магнитного поля различают сбалансированные и несбалансированные МРС (рис. 5).

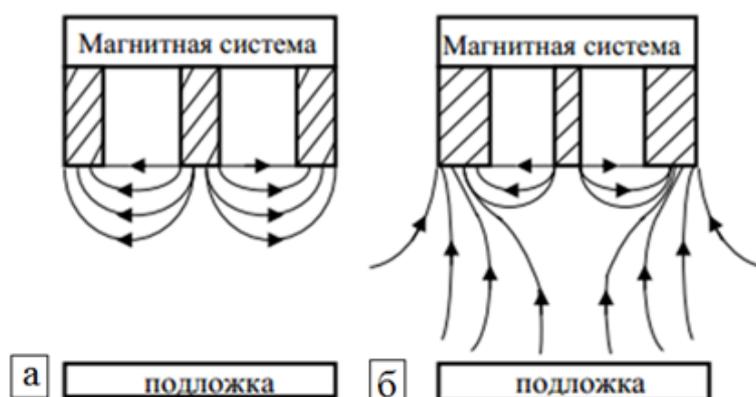


Рис.5 – Модификации МРС: а – сбалансированная система; б – несбалансированная система. [5]

Обычные (сбалансированные) МРС имеют магнитные системы, за счет которых плазма локализуется вблизи катода и не простирается далее, чем на 50 мм от его поверхности. Подложка удалена от поверхности катода в общем случае не менее чем на вышеуказанную величину. Поэтому плотность ионного тока на подложку ( $\ll 1$  мА/см<sup>2</sup>) не значительна, чтобы вносить какие-то изменения в свойства наносимых покрытий. Несбалансированные МРС обеспечивают плотность потока ионов низких энергий на подложку более 1 мА/см<sup>2</sup>. Во втором случае при осаждении покрытий происходит дополнительное ионное воздействие на растущую пленку, в некоторых случаях это обуславливает нанесения покрытий с исключительными свойствами. Несбалансированность магнетронов достигается путем модификации магнитной системы. Создаваемое ей магнитное поле не замыкается полностью как в случае сбалансированной системы.

В качестве рабочей среды используется инертный газ (обычно аргон) и давление в рабочей среде варьируется от 0,03 до 0,5 Па. В случае, когда рабочее давление превышает данный диапазон эффективность МРС падает, но разряд горит. При давлении выше данного диапазона длина свободного пробега падает ниже 0,02 м, когда как расстояние от катода до подложки обычно равно 0,1 м. При этом снижается поток распыляемых атомов материала из-за столкновения с атомами рабочего газа (аргон). По этой причине необходимо чтобы МРС работал при низких давлениях, т.е. давление не должно превышать верхний предел, но нижний предел ограничивается только конструкцией МРС и магнитным полем.

Поэтому разряд в МРС характеризуется в основном вольтамперной характеристикой (ВАХ). В свою очередь на ВАХ заметное влияние оказывает давление рабочей среды (P) и индукция магнитного поля (B) (рис. 6).

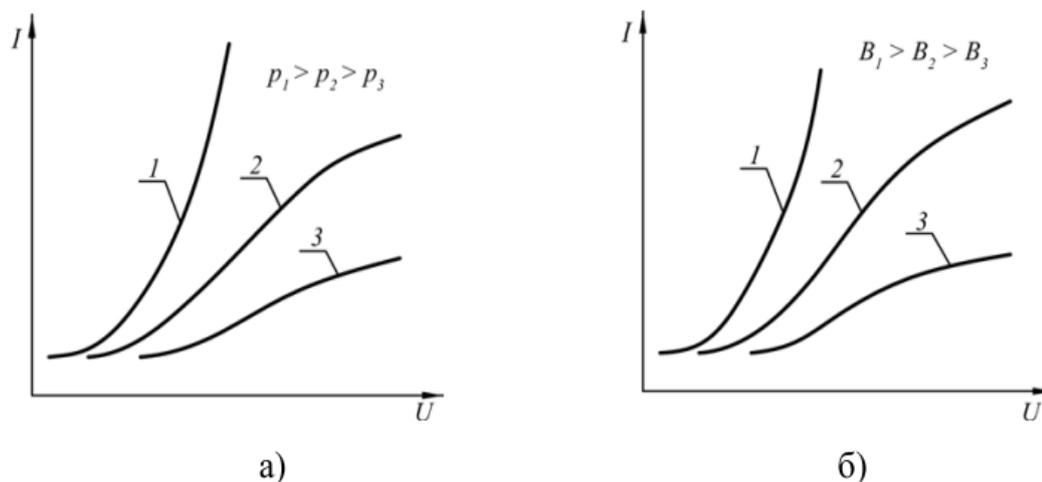


Рис.6 - Влияние давления рабочего газа  $p$  (а) и индукции магнитного поля  $B$ (б) на вольтамперную характеристику разряда в магнетронной распылительной системе [8].

Увеличение данных параметров приводит к увеличению тока разряда при постоянных значениях остальных параметров МРС.

### 1.3 Магнетронная распылительная система с жидкофазной мишенью

Основным недостатком МРС остаётся низкая скорость роста покрытий и низкая энергоэффективность процесса осаждения, обусловленные тем что на процесс ионного распыления тратится только 3% энергии, а остальная энергия переходит в тепло. Идея увеличения производительности МРС привела к созданию МРС с жидкой мишенью [7,8]. Наличие испарительной компоненты и достоинства МРС, которые объединены в МРС с жидкой мишенью, позволило увеличить плотность потока осаждаемых частиц. Принцип работы МРС основан на распылении поверхности материала потоками плазмы. Для получения испарительной компоненты в таком магнетроне мишень находится в тигле и не соединена с охлаждаемой магнитной системой. Поэтому тепло, которое выделяется в мишенном узле в присутствии плазмы, идет на разогрев материала мишени.

Основным ограничением для МРС с твердой мишенью является его теплопроводность, поскольку скорость осаждения зависит от удельной мощности, но с увеличением температуры теплопроводность материала падает.

Максимальное снижение теплопроводности материала наблюдается при переходе из твердой в жидкую фазу, при этом изменение теплопроводности достигает пятикратного значения. На материал в жидкой фазе можно подавать больше мощности, благодаря чему можно увеличить скорость генерации вещества и увеличивать температуру материала до значений, при которых возможен интенсивный процесс испарения атомов с поверхности мишени. Таким образом в процесс распыления еще добавляется процесс испарения, который увеличивает скорость осаждения материала.

Для распыления материала из жидкой фазы используется магнетронная распылительная система, изображенная на рисунке 7.

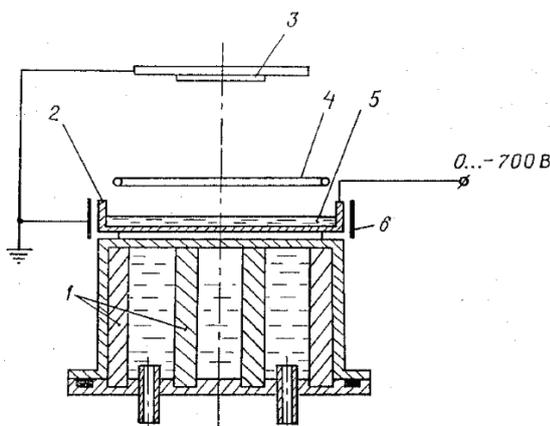


Рисунок 7. Схема устройства для распыления из жидкой фазы: 1 – магнитная система тигель, 2 – тигель, 3 – подложка, 4 – анод, 5 – мишень, 6 – экран [9].

Непосредственно под тиглем 2, изготовленным из немагнитного материала, располагают водоохлаждаемую магнитную систему 1, между корпусом которой и тиглем 2 сделан зазор, ограничивающий отвод тепла от тигля в процессе его разогрева. В тигель помещают диски 5 из Al или Cu, выполняющие роль мишени. Снижение лучистого теплоотвода от тигля обеспечивается радиационным экраном 6. Анод 4 в виде охлаждаемой

медной трубки располагают на расстоянии 25 мм над тиглем. В предварительно откачанную до высокого вакуума ( $P < 10^{-3}$  Па) камеру напускался аргон при давлении 0,6-1,3 Па, после чего на тигель по отношению к аноду подавалось отрицательное напряжение величиной до 700 В. При этом загорался разряд, локализованный у поверхности мишени магнитным полем. Материал мишени за счет интенсивной ионной бомбардировки в течение 5-10 мин переходил в жидкое состояние. Сначала расплавлялась зона горения разряда, затем центральная часть мишени и, наконец, краевая ее область. С появлением жидкой фазы свечение разряда становилось более интенсивным, ток разряда возрастал, а напряжение на разрядном промежутке за счет ограниченной мощности источника питания снижалось.

При мощности источника питания 1,5 кВт, плотности мощности на мишени  $40 \text{ Вт/см}^2$ , плотности ионного тока  $70 \text{ мА/см}^2$  и расстоянии от мишени до подложки 5 см скорость осаждения меди составляет от 4 до 5 мкм/мин, что в 100-120 раз превышает скорости, характерные для диодной системы распыления на постоянном токе.

Основным недостатком такой конструкции является дисковое исполнение мишени и тигля. За счет этого происходит неравномерное плавление мишени, т.к. мишень плавится сначала в зоне горения плазмы (по кольцу), затем ее центральная часть и т.д. И из-за разницы температур зоны расплава и краев мишени происходит ее «разрыв», следовательно, магнитное поле уменьшается и разряд гаснет.

Существуют различные конфигурации МРС с жидкой мишенью (рис.8.).

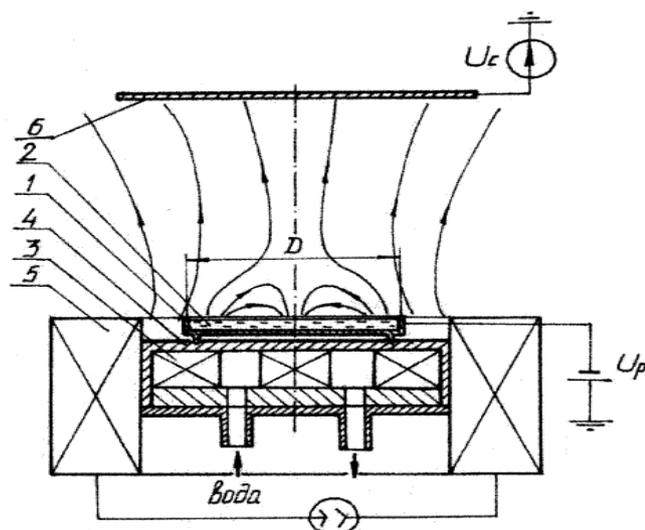


Рис.8 – Магнетрон с жидкометаллическим катодом:  
 1 - тигель; 2 - расплав материала катода - мишени; 3 - магнитная система; 4 - корпус магнетрона; 5 - внешняя электромагнитная катушка; 6 – подложка [7].

В данной конфигурации тигель (1) сделан из тугоплавкого и немагнитного материала (вольфрамовая фольга). В тигель помещается распыляемый материал (2). Водоохлаждаемая магнитная система (3) из неодимовых магнитов не связана с тиглем и зазор между ними составляет 2мм. Зазор служит в качестве препятствия для отвода тепла от тигля. Фиксация магнитной системы с корпусом магнетрона (4) нужна для получения арочной конфигурации магнитного поля. Форма тигля представлена в виде цилиндра (диаметром  $d_m=50$  мм и высотой  $h_m=5$ мм), заготовки материалов имеют форму диска (диаметром  $d_3=45$ мм и высотой  $h_3=3$ мм). [7,8]

Внешняя электромагнитная катушка (5) используется для регулирования площади распыляемой поверхности. Регулировка проводилась путем изменения направления и силы тока во внешней электромагнитной катушке которая выступает в качестве анода и воздействует на магнитное поле над поверхностью мишени и величину магнитной индукции. Данная конструкция МРС сложна в реализации и имеет ограничения для размеров подложек (небольшие площади). Так же не реализован процесс испарения.

Ниже на рис.9. представлена конструкция МРС с жидкой мишенью где мишень имеет форму кольца. Здесь используется тугоплавкий тигель, который связан с корпусом магнетрона с помощью керамических вставок. Магнитная система представляет из себя магнитопровод и постоянные магниты (0,1-0,2 Тл) которые охлаждаются проточной водой.

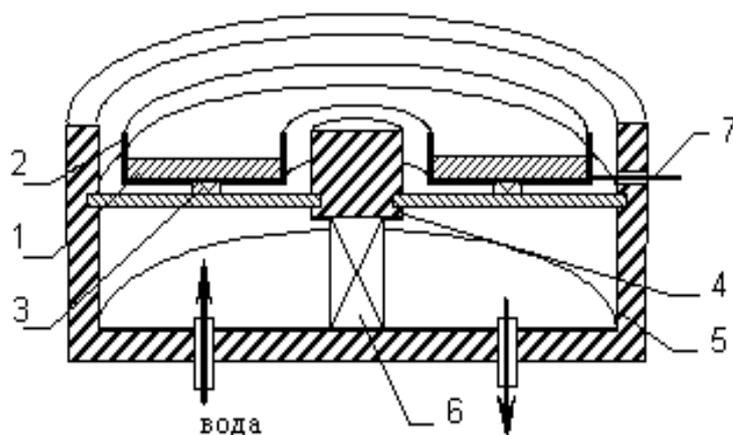


Рис. 9 – Конструкция кольцевого магнетрона с жидкофазной мишенью:  
1 – медная мишень; 2 – графитовый тигель; 3 – керамические вставки; 4 – центральный магнитопровод; 5 – корпус магнетрона; 6 – постоянные магниты; 7 – термопара [10].

В начале магнетрон работает как обычный МРС с твердой мишенью. В дальнейшем под воздействием плазмы ( $U=340-610В$  и  $I=40-190$   $мА/см^2$ ) мишень начинает нагреваться. При дальнейшем воздействии плазмы возможен переход в режим самораспыления из-за того, что потенциал ионизации металлических ионов ниже, чем для аргона [7].

Когда мишень переходит в жидкую фазу, из-за воздействия магнитного поля в жидком металле, начинает совершать круговое вращение. При круговом вращении угловая скорость достигает около  $1,25с^{-1}$ . Круговое вращение удаляет остаточное загрязнение с мишени [7,8].

Возможность распылительно-испарительного процесса зависит от температуры поверхности материала. Температура поверхности материала определяется из таких параметров как мощность потока энергии из плазмы и свойствами мишени. Поэтому тепловые потери в процессе распыления из твердой фазы можно использовать для перехода материала в жидкую фазу и для достижения испарения материала. В случае если плотность энергии

высока возможен переход в режим самораспыления при котором в качестве рабочего газа используется атомы распыляемого материала. Это способствует снижению загрязнения пленки остаточными газами.

В режиме самораспыления за счет большого количества ионов возможно поддержание плазмы магнетронного разряда, но большая часть атомов образуется в процессе испарения, поэтому их скорость низкая и они нейтральны. И дальнейшее увеличение температуры мишени (в 1,3-1,5 раз от температуры плавления) приводит к увеличению испарительной компоненты.

Свойства пленок зависят от скорости осаждения и энергии осаждаемых частиц. В случае термического испарения атомы имеют тепловые скорости. Качество пленки улучшается если в потоке осаждаемых частиц количество ионизированных и возбужденных атомов больше. Для увеличения их количества используют различные методы: разогрев подложки, отрицательное смещение, специальный ионизатор атомных потоков, несбалансированная МРС и ионное ассистирование.

При переходе из твердой фазы в жидкую возможно изменение напряженности и тока разряда.

На рис. 10 показано характерное изменение напряжения и тока разряда при постоянной мощности источника питания. В качестве вещества мишени используется медь. Как видно динамика изменения параметров примерно одинакова.

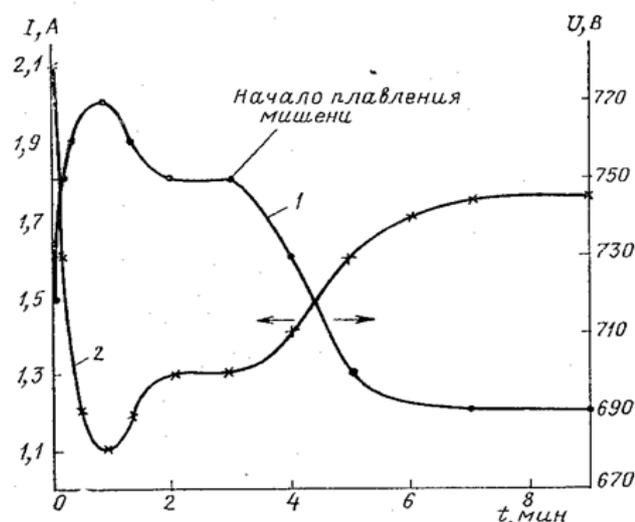


Рис.10 – Изменение напряжения и тока разряда во времени [11].

По мере увеличения температуры мишени идет рост напряжения и спад тока из-за уменьшения коэффициента распыления (в 1,5 раза). Уменьшение данного коэффициента обусловлена тем, что по мере приближения к температуре плавления поверхность мишени становится равномерной.

Когда мишень плавится наблюдается обратный процесс, при котором напряжение падает, а ток разряда растет. Рост тока объясняется тем, что с образованием паров распыляемого материала и увеличением тока термоэмиссии увеличивается количество ионизированных атомов. Что важно разряд горит при давлении  $10^{-2}$  Па, что на порядок ниже, чем для твердой мишени. В данных условиях переход материала в жидкую фазу занимает от 5 до 10 минут. [7,8]

Достоинства и недостатки магнетронного распылительного системы с жидкофазной мишенью по сравнению с другими методами нанесения пленок.

Достоинства:

- возможна полная выборка мишеней и легко добавлять используемый материал;
- высокая скорость осаждения за счет наличия интенсивного испарения;

- возможен режим самораспыления, то есть работа без использования рабочего газа (при пониженном давлении).

Недостатки:

- нестабильное горение магнетронного разряда;
- только горизонтальное размещение магнетронной распылительной системы в вакуумной камере.

## 1.4. Механизмы формирования и свойства тонких пленок

### 1.4.1. Механизмы формирования тонких пленок

Процесс образования тонких пленок описан в достаточно многих работах [12,13]. В перечисленных работах рассмотрены и описаны возможные механизмы и стадии образования на поверхности твердых тел тонких металлических пленок из перенасыщенного пара. В процессе формирования тонких пленок выделяют две стадии:

1) первая стадия: *зародышеобразование* – стадия при которой образованные зародыши способны к дальнейшему росту;

2) вторая стадия: *рост плёнки* – стадия при котором увеличение количества зародышей способных к росту и их объединение с последующим образованием сплошной плёнки на поверхности подложки.

Механизмы, по которым формируется тонкие пленки на подложке, разделяются на три типа [14]:

1. Островковый механизм роста Вольмера-Вебера.
2. Послойный механизм роста Франка-ван дер Мерве.
3. Смешанный механизм роста Странски-Крастанова.

В первом механизме формирование тонких пленок происходит при образовании начальных двумерных (или трехмерных) зародышей, образующих сплошную пленку на поверхности. Взаимодействие происходит между соседними адатомами.

Второй механизм протекает путем полного заполнения каждого слоя и только потом формируется следующий слой. При этом взаимодействие происходит между подложкой и адатомами.

Третий механизм включает в себе два предыдущих механизма т.е. происходит полное формирование первого слоя, а второй слой формируется трехмерными островками.

На рис. 11 схематически представлены процессы формирования тонких пленок перечисленных механизмов.

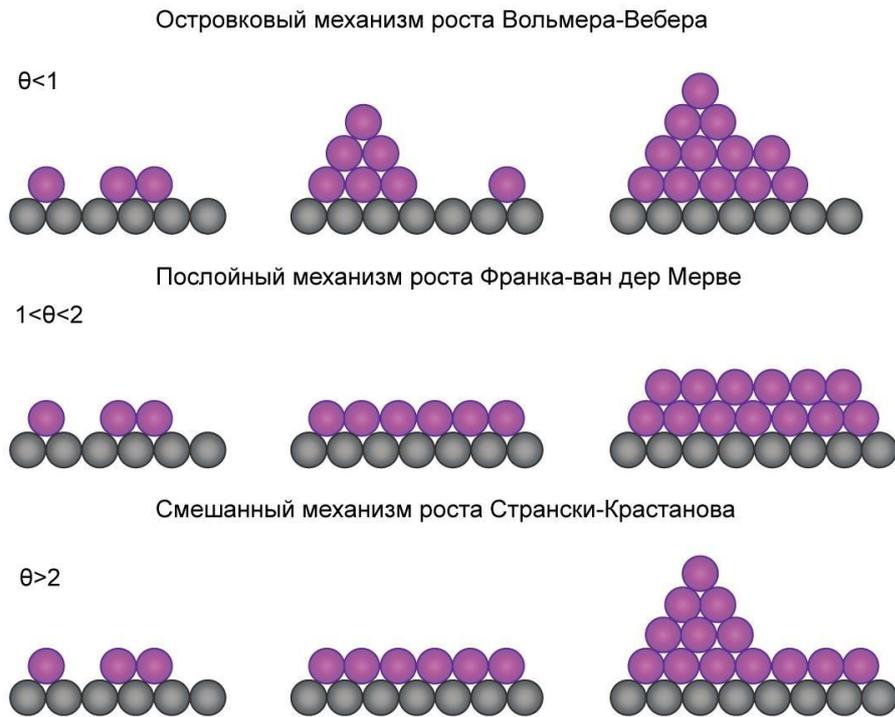


Рис.11 – Схематическое представление механизмов роста плёнок (степень покрытия  $\theta$ , в долях монослоя) [14]

Данные механизмы роста возможны при условии, что зерна описываются моделью куполообразного зародыша. Данная модель представлена на рис. 12 и характеризуется радиусом кривизны ( $r$ ) и краевым углом ( $\varphi$ ). В свою очередь эти параметры зависят от соотношения поверхностных натяжений на границе трех сред и дает возможность представить их в виде силовых векторов. [14]

Таким образом из условия равновесия данных сил краевой угол описывается уравнением Юнга (1)

$$\cos\varphi = \frac{\sigma_S - \sigma_{S/F}}{\sigma_F} \quad (1)$$

В уравнении Юнга используется первичная фаза–подложка ( $\sigma_S$ ), первичная фаза–вторичная фаза ( $\sigma_F$ ) и вторичная фаза– подложка ( $\sigma_{S/F}$ ). Так же она дает понимание трех механизмов.

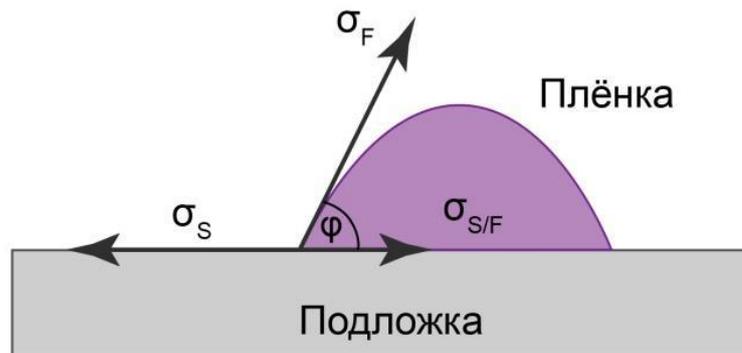


Рис. 12. – Трёхмерный островок плёнки на подложке [14]

Когда краевой угол равен нулю ( $\varphi=0$ ) пленка на поверхности подложки формируется в виде тонкого слоя, что соответствует послойному механизму роста. Коэффициенты поверхностного натяжения имеют соотношение:

$$\sigma_S \geq \sigma_{S/F} + \sigma_F \quad (2)$$

Если краевой угол больше нуля  $\varphi>0$  это соответствует островковому механизму и коэффициенты поверхностного натяжения имеют соотношение:

$$\sigma_S < \sigma_{S/F} + \sigma_F \quad (3)$$

Вероятность протекания одного из механизмов роста зависит от выбранных условий и параметров процесса напыления пленок [14].

## 1.4.2 Параметры, влияющие на свойства тонких пленок

Проблемой, которая встает перед исследователями, является получение покрытий с заранее заданными свойствами. Есть различные способы улучшения свойств покрытий, которые получают с помощью МРС. Каждый способ воздействия направлен на изменение определенных свойств покрытий, например, адгезии, шероховатости, сопротивления материала и т.д. На свойства тонких пленок влияют достаточно много факторов. К ним относятся: напряжение смещения, подаваемое на подложку и его величина, режим распыления (электрические характеристики МРС), материал тигля, нагрев подложки и т.д. Данные факторы в основном используются с целью улучшения свойств получаемых покрытий.

Рассмотрим влияние материала тигля на свойства тонких пленок, получаемых с помощью МРС с жидкой мишенью. Как показывают исследования, материал тигля существенно влияет на свойства покрытий. Например, в работе [10] рассматривают влияние тигля на процесс распыления мишени в МРС с жидкой мишенью для получения медных пленок толщиной 6 мкм. В данной работе в качестве изучаемого материала тигля рассматривались молибден и графит. Как модельные материалы, имеющие сильно отличающиеся теплофизические характеристики, например, степень черноты (для  $M_0=0,1$  и для  $C=0,9$ ). Как показывают исследования, молибденовый тигель оказывает большее влияние на режимы распыления и свойства плазмы, чем графитовый тигель. При использовании молибденового тигля скорость осаждения в 20 раз выше, чем у МРС с твердой мишенью. Так же переход в режим самораспыления достигается быстрее для молибденового тигля в связи с тем, что плотность паров, эмитированных мишенью, выше.

Нагрев подложки проводится с целью увеличения подвижности и концентрации носителей заряда при повышении температур подложки. Так как свойства растущих пленок определяются кинетикой и температурой

процесса, поэтому при нагреве подложки (до 500° С) наблюдается улучшение электрических свойств, при этом при температуре свыше 200° С происходит их ухудшение. Исследования [15] влияние нагрева подложки на свойства тонких пленок ZnO, легированных Al, с использованием мощного импульсного магнетронного распыления показали, что при температуре в 600° С наблюдается улучшение электрических свойств пленок и увеличение количества и подвижности носителей заряда. В статье [15] проводилось 2 серии испытаний. В первой серии температура образцов варьировались от комнатной до 500° С, во второй серии температура варьировалась от комнатной до 600 ° С. По результатам сделаны выводы о том, что в первой серии наблюдается увеличение скорости осаждения, но во второй серии наблюдается снижение скорости. Это объясняется изменением плотности газа, которая влияет на состояние мишени и рост пленки. Уменьшение плотности газа вызывает увеличение длины свободного пробега распыленных атомов, что объясняет увеличение скорости осаждения.

Напряжение смещения при магнетронном распылении используют для повышения адгезионных свойств тонких пленок [16]. В данной статье представлены результаты исследования влияния напряжения смещения при нанесении тонких пленок меди (Cu) с помощью HiPiMS (высоко-мощное импульсная магнетронная система). Благодаря высокой плотности плазмы в HiPiMS количество нейтральных ионов металла в потоке осаждения повышается и достигает ~ 70% в случае меди. Кроме того, траектория высоко-импульсных ионов металлов облегчает осаждение на подложках с высоким отношением размеров [16], что выгодно для нанесения однородных пленок на подложки со сложными геометриями, таких как металлизация ультрабольших микросхем. В целом, топология поверхности, концентрация точечных дефектов, плотность массы, размер зерна и текстура пленок меди влияют на их физические и механические свойства. Строгое расположение и большой размер зерен позволяет говорить об улучшении текстуры и микроструктуры тонких пленок меди в процессе осаждение меди. В HiPiMS

энергию падающих ионов на подложку можно легко контролировать напряжением смещения подложки для увеличения возможности управления кристаллическими фазами, микроструктуры и химического состава полученных пленок.

По результатам исследования были сделаны выводы, что вид тока на подложке состоит как из ионных, так и электронных токов. Электроны являются доминирующими в начале импульса, а затем положительные ионы ( $\text{Ar}^+$  и  $\text{Cu}^+$ ). По мере увеличения смещения от 17,3 В (плавающий) до 100 В, электронный ток уменьшается, а ионный ток возрастает до стабильных значений при 50 В. Однако изменения скорости осаждения, растягивающего напряжения и топология пленок меди Cu, осажденных от плавающего напряжения до 50 В, мало различимы, по сравнению с пленками меди Cu, осажденными от -50 В до 100 В. Хотя поток положительных ионов на подложку увеличивается с плавающей до 50 В, энергия ионов остается низкой. Напряжение смещения увеличивается от 50 В до 100 В, число положительных ионов не изменяется, но энергия ионов, бомбардирующих подложку увеличивается. В результате скорость осаждения уменьшается из-за эффекта повторного распыления и растягивающие напряжения пленок Cu возрастают. При напряжении смещения  $\sim 100$  В пленка Cu проявляет преимущественную ориентацию (111), а удельное сопротивление достигает минимального значения 1,79 мВ см, что близко к сопротивлению объемной фазы Cu. Данный результат объясняется высоким отношением нейтральных ионов в HPPMS. Большое количество положительных ионов, ускоренных отрицательным напряжением смещения на подложке приводит к усиленной миграции и диффузии на поверхности, что приводит к гладкой поверхности пленки и к увеличению размеров зерен. Улучшенная текстура (111) и большой размер зерен пленок меди Cu, осажденных при 100 В, могут быть более эффективными для длительной электромиграции.

## Глава 2. Экспериментальное оборудование

### 2.1 Вакуумная ионно-плазменная установка

Эксперимент выполняется на вакуумной установке «КВО» [17], предназначенной для нанесения модифицирующих покрытий на поверхность твердых тел. Конструкция установки обеспечивает следующие режимы обработки:

- осаждение покрытий с помощью магнетронных источников с твердой и жидкой мишенью;
- ионная очистка поверхности образцов.

Вакуумная схема установки представлена в рис.13

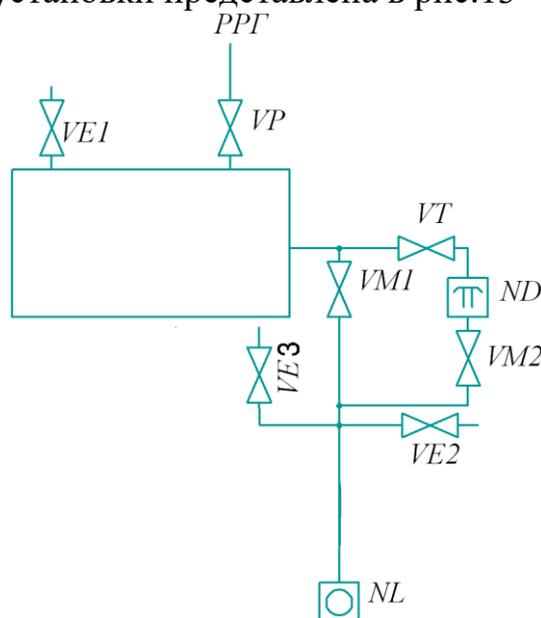


Рис.13. Вакуумная схема установки КВО

Процесс напыления тонких медных покрытий пошагово расписан и представлен ниже:

- Открыть клапан VE3, откачать до давления  $10^4$  Па.
- Затем закрыть VE3, открыть VM1, откачать до давления порядка 8 Па.

- Закрыть VM1, открываем VM2 и VT, откачать до давления  $5 \cdot 10^{-3}$

Па.

Ионная отчистка:

- Открыть VP, подать воду на ионный источник
- Напустить газ (аргон) до давления  $7 \cdot 10^{-2}$  Па
- Включить ионный источник и осуществлять очистку поверхности

подложек в течение 20 минут.

Напыление тонких пленок:

- Открыть VP, подать воду на магнетронную распылительную систему
- Напустить газ (аргон) до давления  $2 \cdot 10^{-1}$  Па
- Включаем блок питания магнетрона (время напыления зависит от

толщины пленки).

Разгерметизация установки происходит следующим образом: закрываем VT и открываем VE1.

## **2.2 Рентгеновский дифрактометр SHIMADZU XRD 6000**

Прибор [18] предназначен для стандартного рентгеноструктурного анализа поликристаллических материалов и позволяет: анализировать параметры структуры и фазовый состав объемных материалов и тонких пленок; управлять процессом рентгеновской съемки и обрабатывать полученные рентгенограммы с помощью компьютера; работать с электронными базами данных рентгеновских спектров.



Рис. 14. Рентгеновский дифрактометр shimadzu xrd 6000 [18]

Оснащен низкотемпературной камерой ТТК-450 с адаптером XRD-6000 и контроллером

**Технические характеристики:**

- компактная установка (схема Брегга-Брентано) с автоматической блокировкой дверцы при включении X-rays
- высокоточный вертикальный гониометр с максимальной скоростью вращения  $1000^\circ$  в минуту и точностью воспроизведения по углу  $2\Theta \pm 0,001^\circ$
- интервал сканирования по углу  $2\Theta$ :  $-6^\circ \div 163^\circ$ , с минимальным шагом  $\pm 0,002^\circ$
- высоковольтный трансформатор для рентгеновских трубок мощностью до 3 кВт
- Cu X-ray трубка с длинным LFF (long fine focus) фокусом и мощностью 2,2 кВт
- высокостабильный X-ray генератор, обеспечивающий отклонение по напряжению и по току в пределах  $\pm 0,01\%$

## 2.3 Трехмерный бесконтактный профилометр

Функциональные возможности прибора могут быть применены для таких практических приложений, как анализ морфологии поверхности, определение структурных и фазовых составляющих сталей, чугунов, цветных металлов, диэлектрических включений в металлах, гранулометрический анализ порошков и пор, анализ толщины нанометровых слоев материалов, металлографический анализ методом сравнения с эталонами и ряд других.



Рис. 15. Трехмерный бесконтактный профилометр [19]

### Назначение и область применения

- Бесконтактные измерения различных глубин с использованием набора компактных оптических датчиков.
- Выбор одной, двух или трех осей движения для точного позиционирования и сканирования поверхности предмета.
- Анализ твердых и мягких образцов, в том числе и оптически прозрачных.
- Расчет расстояний, площадей, объемов отдельных объектов и массивов.

Прибор [19] полностью автоматизирован и оснащен мощным программным обеспечением, которое управляет процессом сканирования образца, записью данных, их математической и графической обработкой. Программное обеспечение включает 260 различных функций обработки результатов измерений.

### Методика измерения

Для прямых измерений применяют технологию вычитания двух разных отражений из оптически прозрачной пленки, либо интерферометрический метод для очень тонких пленок. Для оптически непрозрачных пленок используется метод измерения высоты шага для расчета толщины пленки в том случае, если часть поверхности не имеет покрытия. Прибор идеален для измерений шероховатости, благодаря небольшому размеру светового пятна.

## 2.4 Измерение электрического сопротивления покрытий

Измерения электрического сопротивления образцов проводились на автоматизированном стенде, схема которого представлена на рис. 16.

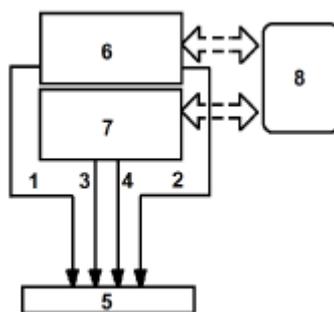


Рис. 16. Автоматизированный стенд для измерения электросопротивления металлов и сплавов: 1, 2 – контакты для подвода тока к образцу, 3, 4 – контакты для измерения напряжения на участке, 5 – исследуемый образец, 6 – цифровой источник тока, 7 – цифровой нановольтметр, 8 – компьютер. [20]

Измерения сопротивления проводились методом амперметра-вольтметра, основанным на измерении тока, протекающего через

измеряемый участок и падения напряжения на нем. Диапазон измеряемых сопротивлений в данной работе, лежит в области низких значений.

При проведении таких измерений основными источниками погрешности являются сопротивления контактов и возникающие на месте контакта двух разнородных проводников термо-ЭДС. Для исключения этого влияния в данном комплексе используется т.н. четырёх контактная схема измерения сопротивления образца.

Для устранения влияния термо-ЭДС используется специальный режим измерения сопротивления «Delta». Он основан на проведении измерений падения напряжения на исследуемом участке при разных направлениях тока. Дело в том, что термо-ЭДС и её полярность не зависят от направленности тока, а напряжение зависит. В результате его измерений при различных полярностях тока получают разные значения падения напряжения. Влияние же термо-ЭДС сводится к нулю. При известной силе тока, установленной цифровым источником питания, падение напряжения измерялось цифровым нановольтметром. Управление режимом «Delta» осуществляется автоматически при помощи программного обеспечения, разработанного компанией Keithley Instruments [21]. Величины измеренных напряжений регистрировались компьютером, после чего происходил расчёт электросопротивления согласно формуле закона Ома с учётом полученных данных и известного значения тока, протекающего через образец. В данной работе измерения проводились при токе равном 105 мкА, меняющем свою полярность. Для каждого образца было проведено 5 измерений при температуре 200 С. Точность измерения ~ 5 %.

## **2.5 Сканирующая электронная микроскопия**

Для определения структуры покрытия применялся метод сканирующей электронной микроскопии. Он представляет собой

разновидность электронной микроскопии, в которой для зондирования исследуемой поверхности используется сканирование по ней сфокусированного пучка электронов.

В этом приборе пучок электронов фокусируется системой линз в пятно диаметром 1-10 нм на поверхности исследуемого образца и сканируется с помощью системы отклоняющих катушек синхронно с электронным пучком в видеотрубке, которая используется в качестве оптического дисплея. Оба электронных пучка управляются одним и тем же генератором сканирования, поэтому увеличение просто равно отношению размеров дисплея и исследуемой области на поверхности образца.

В сканирующем электронном микроскопе используется детектирование различных сигналов, включая вторичные электроны, обратно рассеянные электроны, рентгеновское излучение и ток, проходящий через образец. Двумерная карта снимаемого сигнала и представляет собой изображение поверхности.

В данной работе использовался сканирующий электронный микроскоп [22] серии Zeiss Supra 55 (Carl Zeiss Group, Германия). Его характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики микроскопа серии Zeiss Supra 55 [22]

<b>Параметр</b>	<b>Значение</b>
Увеличение	12x – 900000x в режиме вторичных электронов
Разрешение	1,0 нм при 15 кВ 1,7 нм при 1 кВ 3,5 нм при 0,2 кВ
Ускоряющее напряжение	20 В – 30 000 В
Источник электронов	Автоэмиссионный (термоэмиссионного типа) Стабильность лучше, чем 0,2% в час

## Глава 3. Результаты и обсуждение

### 3.1 Методика получения медных покрытий

Перед началом проведения эксперимента необходимо определить скорость осаждения, при разных режимах работы магнетронной распылительной системы. Для этого необходимо провести тестовое напыление при различных условиях (источник питания: сильноточный и среднечастотный, наличие либо отсутствие аргона в рабочей камере, тип мишени: твердая и жидкая) и фиксированном времени. Затем измерить толщину полученных образцов. Перед началом напыления стеклянные подложки были подвержены ионной очистке.

Таблица 3 – Параметры ионной очистки

I, mA	U, В	t, мин	P, Па	Рост, Па
55	280	20	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$

Для определения толщины пленки использовалась сканирующая электронная микроскопия. Затем производилось расчет скорости осаждения

по формуле:  $V = \frac{d}{t}$ ,

где  $V$  – скорость осаждения, нм/с;  $d$  – толщина пленок, нм;  $t$  – время осаждение.

Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Экспериментальные результаты

№	Мишень	ИП	W, кВт	U, В	I, А	P, Па	Скорость, нм/с
1	Жидкая	HPPMS	3	605	4,96	0,2	123
2	Жидкая	HPPMS	3	606	4,95	0,02	117
3	Жидкая	MF	3	612	4,9	0,2	128
4	Жидкая	MF	3	610	4,92	0,02	136
5	Твёрдая	MF	3	316	9,5	0,2	3
6	Твёрдая	HPPMS	3	341	8,8	0,2	1,9

Из результатов, представленных в таблице 4, можно сделать следующие выводы:

- при использовании МРС с твердой мишенью скорость осаждения намного ниже (1,9-3 нм/с), чем при использовании МРС с жидкофазной мишенью (123-136 нм/с). Это происходит потому что, у МРС с жидкофазной мишенью, мишень теплоизолирована от системы охлаждения, то есть она нагревается до температуры плавления под воздействием ионов из плазмы. Скорость осаждения в жидкофазном магнетроне складывается из 2 факторов: распыления и испарения, что позволяет значительно увеличить скорость нанесения покрытий, т.к. при высоких температурах процесс испарения становится доминирующим. В стандартной МРС скорость осаждения происходит только за счет распыления;

- при работе МРС с жидкофазной мишенью и давлении 0,2 Па наблюдается незначительное увеличение (на 4%) скорости осаждения для среднечастотного источника питания. При этом для давления 0,02 Па скорость осаждения выше (на 14%) при использовании сильноточного источника питания. Для твердой мишени скорость осаждения выше при использовании среднечастотного источника питания.

Затем были получены контрольные образцы пленок меди толщиной 1 мкм на подложках из стекла и кремния. Далее у данных покрытий исследовались шероховатость поверхности, электрическое сопротивление, структура и фазовый состав.

### **3.2 Анализ шероховатости поверхности**

Полученные образцы были исследованы на оптическом профилометре. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты шероховатости поверхности.

№	Мишень	ИП	$P$ , Па	$R_a$ , нм	$R_z$ , нм
1	Жидкая	HPPMS	0,2	3,33	27,35
2	Жидкая	HPPMS	0,02	3,78	32,22
3	Жидкая	MF	0,2	1,58	28,83
4	Жидкая	MF	0,02	4,37	34,85
5	Твёрдая	MF	0,2	1,32	20,79
6	Твёрдая	HPPMS	0,2	1,66	19,99

Как видно из таблицы 5 пленки, полученные с помощью MPC с жидкой мишенью, имеют большую шероховатость. Влияние давления и источника питания на шероховатость поверхности незначительна (от ИП: +5,5% для Ag и +8% для режима самораспыления, от давления: HPPMS- 18% и MF- 21%). В случае незначительных толщин покрытия высокая плотность потока осаждаемых частиц может приводить к увеличению шероховатости поверхности, так как в этом случае не происходит значительного разогрева подложки, что затрудняет поверхностную диффузию атомов для их упорядочивания.

При этом если, разогрев подложки будет достаточен для осуществления поверхностной миграции атомов (в случае осаждения из MPC с жидкофазной мишенью «толстого» покрытия толщиной 6 мкм), то комбинация высокой плотности потока энергии и осаждаемых частиц на подложку создаёт условия для уменьшения шероховатости растущего покрытия (рис. 17).

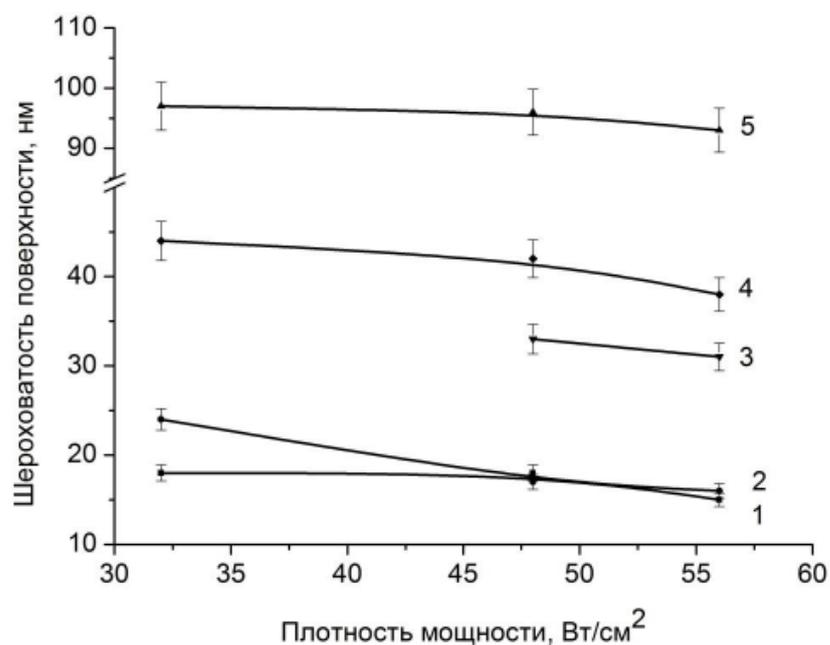


Рис.17. Зависимость шероховатости поверхности медных покрытий от плотности мощности на мишени: 1 – МРС с жидкофазной мишенью для молибденового тигля при работе с Ar ( $P = 0,18$  Па); 2 – МРС с жидкофазной мишенью для молибденового тигля в режиме самораспыления ( $P = 0,01$  Па); 3 – МРС с жидкофазной мишенью для графитового тигля в режиме самораспыления ( $P = 0,01$  Па); 4 – МРС с твёрдой мишенью ( $P = 0,18$  Па), 5 – МРС с жидкофазной мишенью для графитового тигля при работе с Ar ( $P = 0,18$  Па) [7].

Результаты исследования были сравнены с результатами, которые были получены в работе [10]. В данной работе толщина образцов составляла 6 мкм и исходная толщина поверхности составляла 14 нм.

При сравнении можно наблюдать обратную зависимость, которая показывает, что для данной толщины использование мишени в жидкой фазе приводит к уменьшению шероховатости и наилучшие результаты получаются при использовании молибденового тигля (кривые 1 и 2). В нашем исследовании так же использовался молибденовый тигель. Так же режим работы МРС дает незначительный вклад в шероховатость образцов, который может быть обусловлен погрешности измерительного прибора. Результаты с режимом работы так же сходятся с результатами для пленок толщиной 1 мкм т.е. вклад режима работы несущественен.

### 3.3 Электросопротивление

Как видно из полученных результатов, представленных в таблице 6 использование жидкой мишени, помогает уменьшению сопротивления тонких пленок. Для твердой мишени использование различных источников питания дает незначительный вклад в электропроводимость пленок (2,2%), как и для жидкой мишени в режиме самораспыления (3%), но в случае использования Ag в качестве рабочей среды влияние источника питания выше (15%). Так же можно наблюдать, что вне зависимости от источника питания влияние режима распыления заключается в том, что сопротивление тонких пленок ниже при использовании режима самораспыления.

Таблица 6 – Результаты исследования сопротивления

№	Мишень	ИП	$P$ , Па	$\rho$ , Ом·см
1	Жидкая	HPPMS	0,2	2,61E-06
2	Жидкая	HPPMS	0,02	2,19E-06
3	Жидкая	MF	0,2	2,22E-06
4	Жидкая	MF	0,02	2,13E-06
5	Твёрдая	MF	0,2	3,59E-06
6	Твёрдая	HPPMS	0,2	3,67E-06

Данные результаты совпадают с результатами, представленными в работе [10], которые показывают, что для пленок толщиной в 6 мкм получают схожие результаты по электрическому сопротивлению.

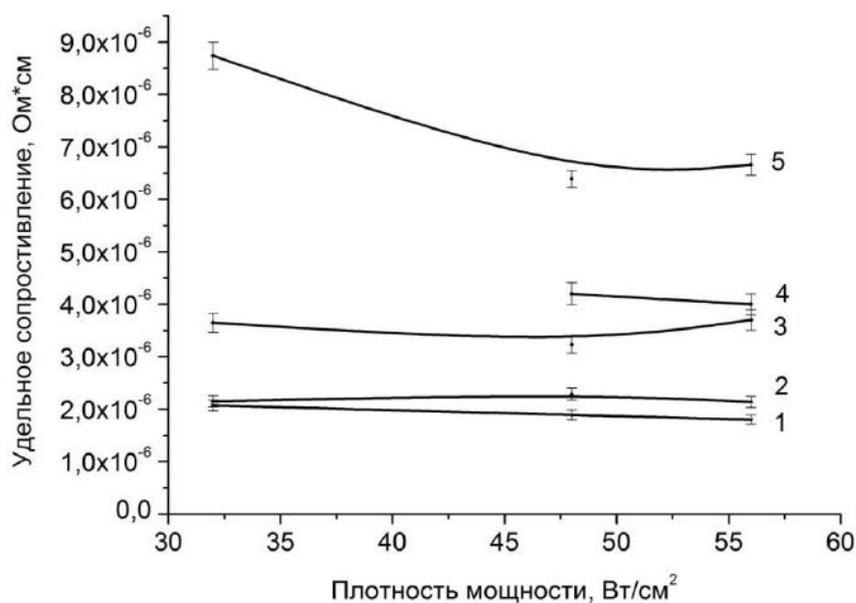


Рис. 18. Зависимость удельного сопротивления медных покрытий от плотности мощности: 1 – МРС с жидкофазной мишенью для молибденового тигля в режиме самораспыления ( $P = 0,01$  Па), 2 – МРС с жидкофазной мишенью для молибденового тигля при работе с Ag ( $P = 0,18$  Па); 3 – МРС с твердой мишенью ( $P = 0,18$  Па); 4 – МРС с жидкофазной мишенью для графитового тигля в режиме самораспыления ( $P = 0,01$  Па); 5 – МРС с жидкофазной мишенью для графитового тигля при работе с Ag ( $P = 0,18$  Па). [7]

Как показано на рис. 18 удельное сопротивление ( $\rho$ ) зависит от режима работы МРС с жидкой мишенью. В режиме самораспыления удельное сопротивление достигает величины  $1,8 \cdot 10^{-6}$  Ом·см. что довольно близко к объемному сопротивлению чистой меди  $1,72 \cdot 10^{-6}$  Ом·см.

На электропроводимость тонких пленок оказывает влияние температура подложки. При высоких температурах покрытия образуются из больших структурных элементов (кристаллитов). Поликристаллическая пленка обладает большим количеством кристаллитов, разделенных межкристаллической фазой на границах которых образуются дефекты, которые выступают в качестве ловушек для электронов. При попадании электрона в данные ловушки уменьшается проводимость пленок.

Таким образом МРС с жидкой мишенью в режиме самораспыления является наилучшим режимом распыления, а вклад от источников питания незначителен.

### 3.4 Рентгеноструктурный анализ

В таблице 7 представлены результаты исследования пленок меди толщиной 1 мкм. В данной таблице представлены данные о параметрах решётки и микронапряжения, сделанные с помощью рентгеноструктурного анализа.

Таблица 7 – Данные рентгеноструктурного анализа медных покрытий

Метод получения покрытий	Вид источника питания	P, Па	Фазовый состав	Параметр решётки, Å	ОКР, нм	Микронапряжения, отн. ед.
МРС с жидкофазной мишенью	HPPMS	0,2	Кубическая решётка, 100%	3,5968	245,6	0,0016
	HPPMS	0,02		3,5970	307,7	0,00272
	MF	0,2		3,5963	306,8	0,00195
	MF	0,02		3,5965	272,8	0,00156
МРС с твёрдой мишенью	MF	0,2		3,5976	94,3	0,0018
	HPPMS	0,2		3,6281	43,7	0,00401

Как видно из таблицы 7 параметры решетки для полученных образцов близки к значению объемной меди ( $a=3,615 \text{ \AA}$ ). Как было сказано выше для электропроводимости большое значение имеет размер кристаллитов полученных пленок. Значения ОКР подтверждают, что при использовании жидкой мишени образуется пленки с большим значение кристаллитов и электрическое сопротивление уменьшается. Для пленок, полученных с помощью МРС с твердой мишенью ОКР в 3-4 раза меньше, чем при использовании жидкой мишени. Уменьшение ОКР позволяет получить плотноупакованную структуру (которые подтверждаются с результатами на СЭМ), но данное покрытие имеет наибольшее микронапряжение.

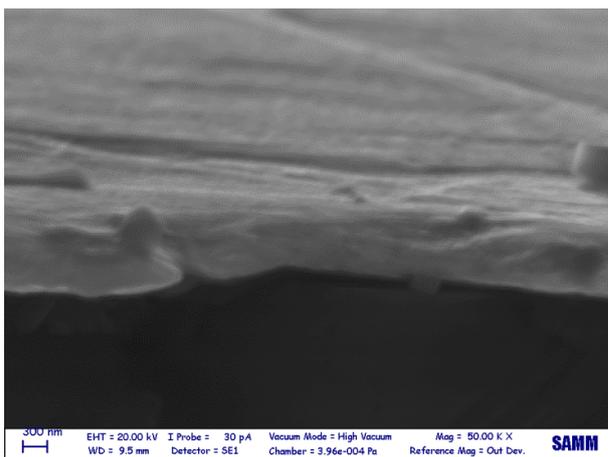
При работе на МРС с жидкой мишенью с использованием аргона ОКР, полученных тонких медных пленок, уменьшается на 20% (245,6 и 306,8нм) для сильноточного источника питания, а для режима самораспыления

наблюдается увеличение на 10% (307,7 и 278,8нм) для сильноточного источника.

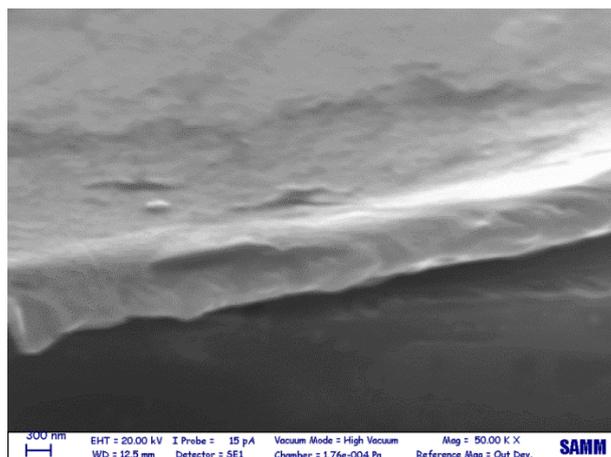
### **3.5 Структура медных пленок**

Для обнаружения влияния вида источника питания (среднечастотный, сильноточный) на свойства покрытий, получаемых в режиме самораспыления с помощью магнетрона с интенсивным испарением мишени (жидкофазный магнетрон с молибденовым тиглем) были получены медные плёнки толщиной 1 мкм при мощности разряда 3 кВт. Для сравнения были получены образцы покрытий такой же толщины с помощью стандартного твердотельного магнетрона.

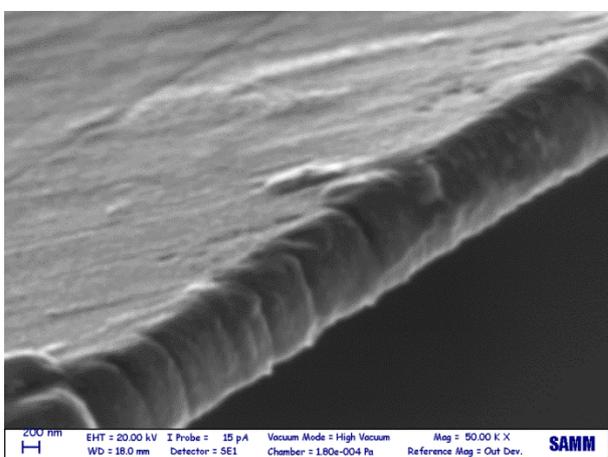
На рис. 19 представлены результаты исследования структуры медных покрытий.



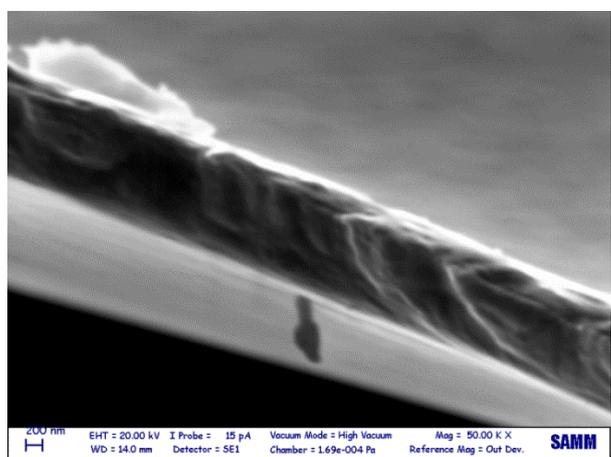
**а)** МРС с жидкофазной мишенью ( $P = 0,2$  Па)



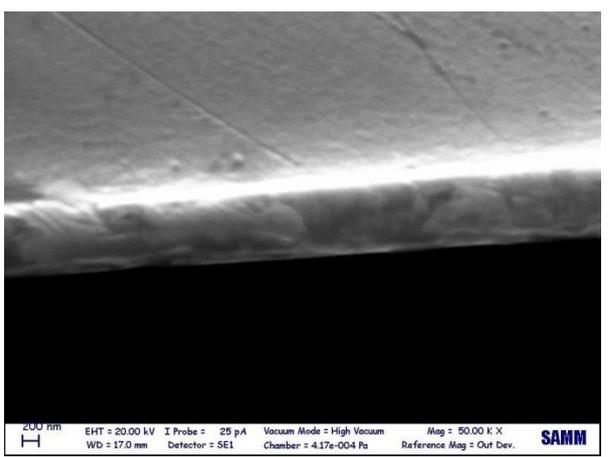
**г)** МРС с жидкофазной мишенью ( $P = 0,2$  Па)



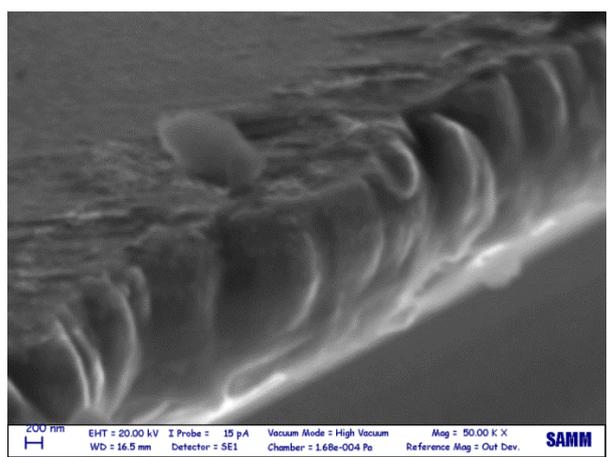
**б)** МРС с жидкофазной мишенью в режиме самораспыления ( $P = 0,02$  Па)



**д)** МРС с жидкофазной мишенью в режиме самораспыления ( $P = 0,02$  Па)



**в)** МРС с твёрдой мишенью ( $P = 0,2$  Па)



**е)** МРС с твёрдой мишенью ( $P = 0,2$  Па)

Рис.19. Структура медных плёнок, полученных при использовании: а, б, в – сильного источника питания (НППМС); г, д, е – среднечастотного источника питания (МФ). Мощность разряда 3 кВт, толщина покрытий 1 мкм.

При наличии интенсивного испарения и работы магнетрона в присутствии аргона при давлении 0,2 Па (рис. 19, а, г) вид источника питания не оказывает влияния на структуру медных покрытий. Плёнки имеют плотную беззёрненную структуру.

В случае работы в режиме самораспыления при давлении 0,02 Па (рис. 19, б, д) наблюдается «столбчатая» структура, однако данное обстоятельство не зависит от вида источника питания.

При отсутствии испарения, т.е. при работе с твердотельной мишенью (рис. 19 в, е) наблюдаются заметные различия в структуре медных плёнок. В случае использования сильноточного источника питания (рис. 19 в) образовались плотные бездефектные покрытия, в то время как при работе со среднечастотным источником питания плёнки имеют ярко выраженную столбчатую структуру.

## Выводы

В результате проделанной работы можно сделать следующие основные выводы:

- При осаждении покрытий из МРС с жидкофазной мишенью скорость напыления на порядок выше, чем у обычного МРС. Наилучший результат достигается при работе со среднечастотным источником питания (128-136 нм/с).
- Шероховатость поверхности не зависит от источника питания и режима распыления. Для тонких пленок с небольшой толщиной (~ 1 мкм) наблюдается увеличение шероховатости при использовании жидкой мишени.
- Наилучшее сопротивление получается при использовании жидкой мишени в сочетании среднечастотного источника и режима самораспыления.
- На структуру полученных медных покрытий, полученных с использованием жидкой мишени, не влияет вид источника питания и режим распыления.
- Структура медных тонких пленок, полученных с помощью твердой мишени, зависит от источника питания. Использование высокопоточного источника питания (НППМС) образует плотные бездефектные покрытия, в то время как при работе со среднечастотным источником питания (МФ) плёнки имеют ярко выраженную столбчатую структуру.

## **Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

**Темой магистерской работы является:** Исследование свойств медных покрытий, полученных в режиме самораспыления при работе магнетрона с испоряющейся мишенью.

**Цель данной работы:** Изучение влияния конструкционных материалов, режимов распыления и источника питания на свойства полученных тонких пленок в зависимости от состояния мишени.

### **4.1 Потенциальные потребители исследования**

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

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

Исследуемая магнетронная распылительная система с жидкой мишенью используется для высокоскоростного осаждения тонкопленочных пленок на разные поверхности.

Потенциальными потребителями являются научно-исследовательские центры, исследовательские институты и корпоративные лаборатории с исследовательскими системами, а в перспективе, индустриальные предприятия с промышленными установками и интегрированными системами производства.

## 4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурирующих разработок, необходимо проводить систематически, поскольку существующие рынки пребывают в постоянном движении. Данный вид анализа помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим конкурентам. Конкурентами выбраны технологии HiPIMS (K1) и магнетронная распылительная система с холодной мишенью (K2).

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 8, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

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

Данный анализ был проведен с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 9.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \beta_i \quad (6)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

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

$\beta_i$  – балл  $i$ -го показателя

В данном исследовании:

$B_{k1}$  – бал соответствующему HiPIMS,

$B_{k2}$  – бал соответствующему магнетронная распылительная система с холодной мишенью.

$K_{k1}$  – конкурентоспособность HiPIMS;

$K_{к2}$  – конкурентоспособность магнетронная распылительная система с холодной мишенью.

Таблица 8 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентность		
		$B_{\phi}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$K_{\phi}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Скорость осаждения покрытий	0,2	5	4	3	1	0,8	0,6
2. Адгезия	0,15	4	4	4	0,6	0,6	0,6
3. Легкость эксплуатации	0,1	4	4	5	0,4	0,4	0,5
4. Повторяемость	0,2	3	4	5	0,6	0,8	1
5. Возможность автоматизации	0,1	4	4	5	0,4	0,4	0,5
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	5	4	0,5	0,5	0,4
2. Цена	0,1	3	2	4	0,3	0,2	0,4
3. Послепродажное обслуживание	0,05	2	3	2	0,1	0,15	0,1
Итого	1	30	30	32	3,9	3,85	4,1

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

Из полученных результатов можно сделать вывод о среднем уровне конкурентоспособности технологии. Судя по всему, надо улучшать показатели повторяемости, уменьшать цену и облегчать эксплуатацию.

### 4.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ (Strengths – сильные стороны, weaknesses слабые стороны, opportunities – возможности и threats – угрозы) применяется для определения слабых и сильных сторон проекта. Результаты SWOT-анализа представлены на таблице 9.

Таблица 9 – Результаты SWOT-анализа

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. Высокая скорость осаждения. С2. Более полное использование материала мишени. С3. Режим «самораспыления» с низким рабочим давлением.	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> Сл1. Необходимость дополнительного обучения кадров для работы с технологией Сл2. Большой набор требований к продукту со стороны предприятий
<b>Возможности:</b> В1. Появление новых сфер применения технологии. В2. Интерес промышленных предприятий. В3. Повышение стоимости конкурентных разработок	Новые сферы применения увеличат финансирование разработки. Интерес предприятий поможет понять конечные требования к продукту.	Новые сферы применения технологии помогут найти область с легко выполнимыми требованиями.
<b>Угрозы:</b> У1. Отсутствие спроса на новые технологии у производства. У2. Развитие альтернативных технологий и аналогов оборудования. ...	У1. Отсутствие спроса на новые технологии у производства. У2. Развитие альтернативных технологий и аналогов оборудования.	1. Главной угрозой является отсутствие спроса, данная угроза решается поиском новых сфер применения и демонстрацией достоинств технологии.

Использование интерактивной матрицы помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей SWOT. Интерактивные матрицы проекта представлены в таблицах 10-13.

Таблица 10– Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта				
		C1	C2	C3
Возможности проекта	B1	+	+	+
	B2	+	+	+
	B3	0	0	-

Таблица 11 – Интерактивная матрица проекта

Слабые стороны проекта			
Возможности проекта		C1	C2
	B1	-	0
	B2	-	+
	B3	-	0

Таблица 12 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		C1	C2	C3
	У1	+	+	-
	У2	0	0	-

Таблица 13 – Интерактивная матрица проекта

Слабые стороны проекта			
Возможности проекта		C1	C2
	У1	+	+
	У2	+	+

#### 4.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Перечень вопросов приведен в табл. 14.

Таблица 14 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	4
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	3	4
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	4
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	4
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	4	4
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	4
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	4	4
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	4
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	3	4
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	3	4
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	93	59

При проведении анализа по таблице, приведенной выше, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При этом система измерения по каждому направлению (степень проработанности научного проекта, уровень имеющихся знаний у разработчика) отличается. Так, при оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаю, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i , \quad (7)$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Так, если значение  $B_{\text{сум}}$  получилось от 75 до 60, то такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной ее коммерциализации. Если от 59 до 45 – то перспективность выше среднего. Если от 44 до 30 – то перспективность средняя. Если от 29 до 15 – то перспективность ниже среднего. Если 14 и ниже – то перспективность крайне низкая.

По результатам оценки делается вывод что данный проект является перспективным, а знания разработчика являются достаточным для ее успешной коммерциализации.

## 4.5 Инициация проекта

### 4.5.1 Заинтересованные стороны проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в уставе проекта.

Ниже, в таблицах 15-17 представлены все необходимые данные, которые входят в устав проекта.

Таблица 15– Заинтересованные стороны проекта

<b>Заинтересованные стороны проекта</b>	<b>Ожидания заинтересованных сторон</b>
ТПУ, НОЦ Б.П. Вейнберга	Связь конструкционных материалов, режима распыления, источника питания и свойства тонких медных покрытий..

Таблица 16 – Цели и результаты проекта

<b>Цели проекта:</b>	Изучение влияния источника питания, параметров распыления и конструкционных материалов на свойства получаемых тонких медных пленок, получаемых с помощью МРС с жидкой мишенью.
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Результаты по влиянию на свойства тонких медных пленок
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Результаты испытаний при различных режимах, параметрах распыления и конструкционных материалов на МРС с жидкофазной мишенью.
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b>
	Хорошие показатели шероховатости и высокая электропроводимость
	Достоверность научных результатов
	Согласованность научных данных с рядом другими научными исследованиями

Таблица 17 – рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, час.
	Юрьева Алена Викторовна, к.т.н. Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ ТПУ	Руководитель	Координация деятельности проекта	27
	Торломоев Алексей Эженович, ТПУ ИЯТШ, магистр	Исполнитель	Выполнение исследовательской работы	360

## 4.6 План проекта

Таблица 18 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Получения задания	1	04.02.2019	04.02.2019	Юрьева А.В.
2	Составления плана выполнения работ по проекту	4	05.02.2019	08.02.2019	Юрьева А.В.
3	Обзор литератур по тематике работы	24	09.02.2019	11.03.2019	Торломоев А.Э.
4	Обучение работе на вакуумной ионно - плазменной установке	13	12.03.2019	26.03.2019	Торломоев А.Э.
5	Получение образцов при разных параметрах	5	27.03.2019	1.04.2019	Торломоев А.Э.
6	Исследование образцов	13	02.04.2019	16.04.2019	Торломоев А.Э. Юрьева А.В.
7	Анализ результатов исследования	9	17.04.2019-	26.04.2019	Торломоев А.Э. Юрьева А.В.
8	Составление пояснительной записки	8	27.04.2019	14.05.2019	Торломоев А.Э.

В таблице 19 приведен календарный план-график проведения НИОКР по теме магистерской диссертации

Таблица 19 – календарный план-график проведения НИОКР

Код работ ы (из ИСР)	Вид работ	Исполни тели	Т <sub>к</sub> , ка л, дн .	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составления задачи для исследования	Руководитель	5	■													
2	Изучение литературы	Магистрант	24		■	■											
4	Обучение работе на вакуумно - плазменной установке	Магистрант	13				■	■									
5	Получение образцов при разных параметрах	Магистрант	5						■								
6	Исследование образцов	Магистрант, руководитель	13							■	■						
7	Общий анализ результатов исследований	Руководитель, магистрант	9									■	■				
8	Составления пояснительной записки	Магистрант	8									■	■				
10	Итого дней		77														

#### 4.7 Бюджет научного исследования

Был составлен полный бюджет научных исследований. Расходы научных исследований состоит из материальных затрат, расходов на специальные оборудования, основной и дополнительной заработной платы, социальные отчисления, и накладные расходы. Была составлена таблица 20 с группировкой затрат по статьям.

Таблица 20 – Группировка расходов по статьям

Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, руб.	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления на социальные нужды, руб.	Прочие прямые расходы, руб.	Накладные расходы, руб.	Итого плановая себестоимость, руб.
42745	3196	93057	13957	28893	2805	32104	216757

## Сырье, материалы, покупные изделия (за вычетом отходов)

В статью расходов входит затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. В таблице 21 приведены таблица расходов по данной статье.

Таблица 21 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Медная мишень (технически чистая 99%)		4	3500	14000
Молибденовый тигель		2	12500	25000
Стеклянные подложки		50	50	2500
Всего за материалы				41500
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				1245
Итого по статье $C_m$				42745

## Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

При выполнении исследования дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное оборудование являлось собственностью НОЦ Б.П. Вейнберга НИ ТПУ.

Необходимо рассчитать амортизационные отчисления для использованного оборудования. Затраты на амортизационные отчисления рассчитываются по формуле

$$C_{\text{аморт}} = C_{\text{об}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{n} \cdot 100\%\right)}{N} \cdot T, \quad (8)$$

где  $C_{\text{об}}$  – стоимость оборудования,  $n$  – эксплуатационный срок оборудования,  $N$  – количество календарных дней в году,  $T$  – количество дней использования оборудования.

В исследовании использовались: вакуумная установка «КВО». В таблице 22 приведены результаты вычисления амортизационных отчислений для оборудования.

Таблица 22 – Амортизационные отчисления оборудования

№	Наименование	Первоначальная цена $C_{об}$ , руб.	Срок эксплуатации оборудования, год	Количество рабочих дней использования оборудования, дни	Амортизационные отчисления, руб.
1	Вакуумная установка «КВО»	3500000	15	5	3196
	Итого	3196 рублей			

Потребляемая мощность анализатора составляет 15 кВт/час. Длительность ежедневной работы на установке составляет 5 часов. Стоимость электроэнергии в Томске составляет 5,8 рубля за 1 кВт/час. Следовательно, стоимость электропотребления за 5 дней составляет:

$$15 \times 5 \times 5,8 \times 5 = 2175 \text{руб.}$$

Время работы на персональном компьютере составляет 77 дней. Длительность ежедневной работы составляет 5 часов. Потребляемая мощность ноутбука составляет 0,282 кВт\*час.

$$0,282 \times 5 \times 5,8 \times 77 = 630 \text{руб.}$$

### Основная заработная плата

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

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (9)$$

$Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб} \quad (10)$$

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (11)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 24). Баланс составлялся для 6 дневной рабочей недели.

Таблица 23 – Баланс рабочего времени

<b>Показатели рабочего времени</b>	<b>Руководитель</b>	<b>Инженер</b>
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_b \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p \quad (12)$$

Где:  $Z_b$  – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3;

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет 0,3;

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

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью доцента и ученой степенью кандидата физика математических наук заработная плата по окладу которого составляет 33664 рублей.

$$Z_m = 33664 \cdot (1 + 0,3 + 0,3) \cdot 1,3 = 70021 \text{ рублей}$$

Инженер получает оклад, равный 12663 руб./месяц. Месячный должностной оклад инженера равен:

$$Z_m = 12663 \cdot (1 + 0,3 + 0,3) \cdot 1,3 = 26339 \text{ рублей}$$

Среднедневная заработная плата руководителя равна:

$$Z_{дн} = \frac{70021 \cdot 10,4}{251} = 2901 \text{ рублей}$$

Среднедневная зарплата инженера составляет:

$$Z_{дн} = \frac{26339 \cdot 10,4}{251} = 1091 \text{ рублей}$$

Основная заработная плата руководителя равна:

$$Z_{осн} = 2901 \cdot 5 = 14505 \text{ рублей}$$

Основная заработная плата инженера равна:

$$Z_{осн} = 1091 \cdot 72 = 78552 \text{ рублей}$$

В табл. 24 приведена форма расчёта основной заработной платы.

Таблица 24 – Таблица расчета основной заработной платы

Исполнители	З <sub>б</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	33664	0,3	0,3	1,3	70021	2901	5	14505
Инженер	12663	0,3	0,3	1,3	26339	1091	72	78552

### Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (13)$$

Где:

Z<sub>доп</sub> – дополнительная заработная плата, руб.;

k<sub>доп</sub> – коэффициент дополнительной зарплаты, который 15 %;

Z<sub>осн</sub> – основная заработная плата, руб.

Дополнительная заработная плата руководителя равна:

$$Z_{\text{доп}} = 14505 \cdot 0,15 = 2175 \text{ рублей}$$

Дополнительная заработная плата инженера равна:

$$Z_{\text{доп}} = 78552 \cdot 0,15 = 11782 \text{ рублей}$$

В таблице 25 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 25 – Таблица основной и дополнительной заработной платы.

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	14505	78552
Дополнительная зарплата	2175	11782
Зарплата исполнителя	16680	90334
Итого по статье C <sub>зп</sub>	107014	

## Отчисления на социальные нужды

Данная статья расходов рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (14)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), который равняется  $k_{\text{внеб}} = 0,27$

Таблица 26 – Таблица отчислений на социальные нужды

<b>Зарботная плата</b>	<b>Руководитель</b>	<b>Инженер</b>
Зарплата	16680	90334
Отчисление на социальные нужды	4503	24390

## Накладные расходы

Накладные расходы составляют 30 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{нак}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (15)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов, который равен 30 % (0.3).

Таблица 27 – Таблица накладных расходов

<b>Зарботная плата</b>	<b>Руководитель</b>	<b>Инженер</b>
Зарплата	16680	90334
Накладные расходы	5004	27100

## 4.8 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. В таблице 28 сведены возможные риски проекта

Таблица 28 – Реестр рисков проектов

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Невыполнение исследований в срок	Наказание за невыполнения контрактных обязательств	3	2	Средний	Привлечение дополнительных рабочих сил	Систематические остановки экспериментальных исследований
2	Отсутствие необходимого оборудования и образцов	Невозможность проведения необходимых исследований для проекта	2	3	Средний	Более тщательное планирование проекта	Недостаток финансирования
3	Недостоверность полученных результатов	Низкая точность выводов из эксперимента	2	4	Средний	Тщательное проведение экспериментальных работ	Неправильное использование используемого оборудования

#### 4.9 Оценка сравнительной эффективности исследования

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} \quad (16)$$

где  $I_{\Phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;

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

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

Так как разработка имеет одно исполнение то:

$$I_{\Phi}^p = \frac{216757}{230000} = 0.94$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{\Phi}^{a1} = \frac{230000}{230000} = 1$$

$$I_{\Phi}^{a2} = \frac{220000}{230000} = 0,96$$

$I_{\Phi}^{a1}$  – соответствует HiPIMS;

$I_{\Phi}^{a2}$  – соответствует магнетронная распылительная система с холодной мишенью.

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:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^m \quad (17)$$

$$I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i^p \quad (18)$$

где  $I_m^a$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для аналога;

$I_m^p$  – интегральный показатель ресурсоэффективности разработки;

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

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

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 29– Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя		0,25	4	3	3
2. Удобство в эксплуатации		0,3	4	3	5
3. Энергосбережение		0,15	3	4	2
4. Надежность		0,2	5	4	3
5. Материалоемкость		0,1	5	4	4
ИТОГО		1	21	18	17

$$I_m^p = 0.25 \cdot 4 + 0.3 \cdot 4 + 0.15 \cdot 3 + 0.2 \cdot 5 + 0.1 \cdot 5 = 4.15$$

$$I_1^a = 0.25 \cdot 3 + 0.3 \cdot 3 + 0.15 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.1 \cdot 4 = 3.45$$

$$I_2^a = 0.25 \cdot 3 + 0.3 \cdot 5 + 0.15 \cdot 2 + 0.2 \cdot 3 + 0.1 \cdot 4 = 3.55$$

Интегральный показатель эффективности разработки  $I_{\text{финр}}^p$  и аналога  $I_{\text{финр}}^a$  определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p}; \quad I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\text{ф}}^a} \quad (19)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} \quad (20)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  – сравнительная эффективность проекта;  $I_{m^p}^p$  – интегральный показатель разработки;  $I_{m^a}^a$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{4,15}{0,98} = 4,56$$

$$I_{\text{финр}}^{a1} = \frac{3,45}{1} = 3,45$$

$$I_{\text{финр}}^{a2} = \frac{3,55}{0,99} = 3,81$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}1} = \frac{4,56}{3,45} = 1,32$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср}1} = \frac{4,56}{3,81} = 1,2$$

Таблица 30 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,96	0,94
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,45	3,55	4,15
3	Интегральный показатель эффективности	3,45	3,81	4,5+6
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,32	1,2	1

## **Выводы**

В данной главе был проведен расчет затрат на выполнение научно-исследовательской работы. В процессе формирования бюджета были использованы группировки по материальным затратам (42745 руб.), по амортизационному отчислению оборудования (3196 руб.), затратам по основной заработной плате исполнителей (93057 руб.), затратам по дополнительной заработной плате (13957 руб.), отчислениям на социальные нужды (28893 руб.), накладные расходы (32104 руб.), прочие прямые расходы (2805 руб.). Таким образом, всего бюджет составил 216757 руб. Основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве выполненной разработки над аналогами. Полученные в ходе исследования результаты, могут быть использованы для дальнейших исследований магнетронно-распылительной системы с жидкой мишенью, а также имеет практическую ценность и в полной мере способствует решению многих фундаментальных задач.

## **Глава 5. Социальная ответственность**

В связи с различными чрезвычайными ситуациями, происходящими на предприятии, соответственно очень важным является обеспечение безопасности рабочих мест на предприятии, и предотвращение возможных опасных ситуации для обеспечения безопасности, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

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

При выполнении настоящей магистерской работы были использованы: напылительная установка «КВО», персональная электронно-вычислительная машина (ПЭВМ), газовые баллоны со сжатым аргоном. Приведем анализ вредных и опасных производственных факторов, также комплекс защитных мероприятий.

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Исследовательские работы проводились на вакуумной установке «КВО» и ПЭВМ. Основная работа заключалась в управлении и регулировании автоматизированного процесса нанесения тонких медных покрытий. Исходя из этого необходимо рассматривать эргономические требования для рабочего место оператора, рабочее место которого связана с обработкой результатов на ПЭВМ данных полученных на вакуумной установке «КВО». Для обоснования эргономических требований используются следующие нормативно правовые документы:

ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования

СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года)

ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения)

ГОСТ Р ИСО 6385-2016 Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем

ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения

Согласно ПНД Ф 12.13.1-03 к работе в аналитических лабораториях допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование для решения вопроса о возможности работы в лаборатории. Каждый сотрудник лаборатории должен соблюдать правила безопасности лаборатории.

Рабочие места должны быть спроектированы таким образом, чтобы способствовать достижению целей производственной системы, в том числе достижению оптимальной общей рабочей нагрузки на сотрудников (ГОСТ Р ИСО 6385-2016). Рабочая среда должна быть разработана и поддерживаться таким образом, чтобы минимизировать неблагоприятные физические, химические, биологические и социальные условия, влияющие на здоровье и безопасность людей, а также на их способность и готовность выполнять стоящие перед ними задачи

Согласно ГОСТ Р 50923-96 рабочее место с дисплеем должно обеспечивать оператору возможность удобного выполнения работ в положении сидя и не создавать перегрузки костно-мышечной системы.

Основными элементами рабочего места оператора являются: рабочий стол, рабочий стул (кресло), дисплей, клавиатура; вспомогательными – пюпитр, подставка для ног. Рабочий стул должен быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья. Требования каждому из этих элементов рабочего места рассмотрено в ГОСТ Р 50923-96 подробно. Дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову.

Дисплей на рабочем месте должен быть установлен ниже уровня глаз оператора. Угол наблюдения экрана оператором относительно горизонтальной линии взгляда не должен превышать  $60^\circ$ , как показано на рисунке 20.

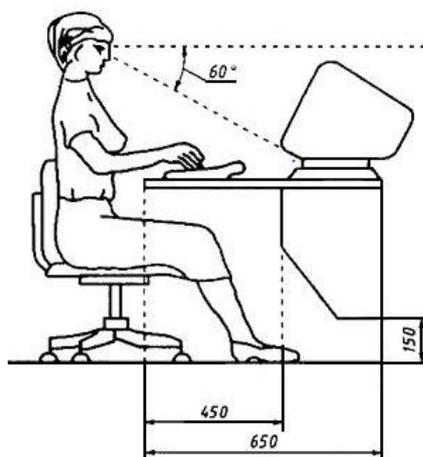


Рисунок 20 – Расположение дисплея на столе

## 5.2. Вредные факторы проектируемой производственной среды

Для идентификации потенциальных факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлены в виде таблицы 31.

Таблица 31 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработк	Изготовле	Эксплуата	
1. Вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего	+	+	+	ГОСТ 12.1.005-88. СН-245-71
2. Вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями переменного характера	+	+	+	СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03
3 Вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в	-	-	+	ГОСТ 12.1.003-2014  ГОСТ 12.4.026-2015.

производственной среде				
4 Вредные производственные факторы, связанные со световой средой	+	+	+	ГОСТ 12.4.026-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний.
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	-	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ГОСТ 12.1.030-81
6 пожаровзрывоопасность.	-	-	+	НПБ 105-03

В процессе научно исследовательских работ возможна воздействие следующих вредных производственных факторов:

- вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего

- вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями переменного характера

- вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде

- вредные производственные факторы, связанные со световой средой

- 

### **5.2.1 Вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего**

Основными факторами, характеризующими микроклимат производственной среды, являются: температура, подвижность и влажность воздуха. Отклонения данных параметров от нормы оказывает вредное влияние на человека, при этом обычно возникают ухудшение самочувствия работника, снижение эффективности работы и различные заболевания. Неблагоприятные условия могут вызывать перенапряжение механизма терморегуляции, что ведет к перегреву или переохлаждению организма.

Высокая температура приводит к быстрой утомляемости работника, может привести к перегреву организма, тепловому удару. А низкая температура может вызвать местное или общее охлаждение организма, и привести к простудному заболеванию либо обморожению. Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное

нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи. Низкая влажность вызывает неприятные ощущения в виде сухости слизистых оболочек дыхательных путей работающего.

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. На установке «КВО» установлена принудительная вытяжка из вакуумного насоса.

При нормировании метеорологических условий в производственных помещениях учитывают время года, физическую тяжесть выполняемых работ, а также количество избыточного тепла в помещении. Оптимальные и допустимые метеорологические условия температуры и влажности воздуха устанавливаются согласно ГОСТ 12.1.005-88.

Для поддержания нормальных параметров микроклимата в рабочей зоне применяются следующие мероприятия: устройство систем вентиляции, кондиционирование воздуха и отопление. вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. Общий объем притока воздуха в помещении должен соответствовать объему вытяжки.

Согласно СН-245-71 объем производственных помещений должен быть таким, чтобы на одного работающего приходилось не менее 15 м<sup>3</sup> свободного пространства и не менее 6 м<sup>2</sup> площади.

## 5.2.2 Вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями переменного характера

В процессе научно исследовательских работ, наиболее интенсивным и длительным источником электромагнитного поля был персональный компьютер. Воздействие электромагнитных полей на организм человека в течении длительного времени оказывает негативное влияния на сердечно-сосудистую и нервную систему. Имеет место негативное влияния на зрения, когнитивные способности человека. Безопасные уровни излучений регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и представлены в табл. 32

Таблица 32– Временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц – 2кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2кГц – 400кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2кГц – 400кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Для того, чтобы снизить вредное влияние электромагнитного излучения при работе с ПК необходимо соблюдать следующие общие гигиенические требования:

1. Необходимо обязательно делать перерывы после 2 часов непрерывной работы на компьютере. Во время перерыва необходимо делать простейшие физические упражнения для тела и органов зрения.

2. Необходимо чередовать тип работы на ПК.

3. Естественное освещение должно падать слева. Расстояние между двумя мониторами не менее 1,2 м. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 60 – 70 см, но не ближе 50 см.

### **5.2.3 Вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде**

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 и установке КВО уровень шума на рабочем месте составляет 52 дБ на расстоянии 1м. Источниками шумового загрязнения являются вращающиеся части механических насосов. Длительность возникновения максимальных шумов составляет не более 5 минут. Рабочее место расположено в 2-2,5 метров от установки.

В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума при сосредоточенной умственной работе составляет 75 дБ. Зоны с уровнем звука или эквивалентным уровнем звука выше 80 дБ обозначены знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026-2015.

Методы и средства коллективной защиты включают в себя:

- изменение направленности излучения шума;
- рациональную планировку предприятий и производственных помещений;
- акустическую обработку помещений;
- применение звукоизоляции.

- Индивидуальные средства защиты от звука

Применение средств индивидуальной защиты от шума наиболее эффективно в области высоких частот. Средства индивидуальной защиты включают в себя специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумные каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения звука.

#### **5.2. 4 Вредные производственные факторы, связанные со световой средой**

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность. Основной задачей данной части является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещенности. Для производственных помещений всех назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) освещения и комбинированного (общего и местного) освещения.

Освещение комбинированное. Для освещения помещения используется естественный источник света (окна в количестве 5 штук) и лампы (20 штук)

#### **5.2.5 Выявление опасных факторов проектируемой производственной среды**

Существует два опасных фактора, который имеют места при проведение исследовательских работ. Это:

- опасные производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов;
- пожаровзрывоопасность.

## **5.2.6 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека**

Воздействие электрического напряжения на человека связано с протеканием через него тока. Действие электрического тока на человека носит сложный и разнообразный характер. При замыкании электрической цепи через организм человека ток оказывает термическое, электролитическое, биологическое и механическое воздействие.

Основными причинами воздействия тока на человека являются:

- случайное прикосновение или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям;
- появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции или ошибочных действий персонала;
- шаговое напряжение на поверхности земли в результате замыкания провода на землю;
- появление напряжения на отключенных токоведущих частях, на которых работают люди, вследствие ошибочного включения установки;
- освобождение другого человека, находящегося под напряжением;
- воздействие атмосферного электричества, грозových разрядов.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82 предельно допустимые уровни напряжения прикосновения и токов, воздействию которых человек может подвергаться в процессе работы с электрооборудованием, составляют для установок в нормативном режиме: для постоянного тока – не более 0,8 В и 1 мА соответственно, для переменного тока (частота 50 Гц) - не более 2,0 В и 0,3 мА соответственно. Установки работающие напряжения выше 42 В должны иметь заземления. Необходимо иметь возможность быстро отключить оборудования в случае попадания человека под напряжения (ГОСТ 12.1.030-81).

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещение без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещение с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (особо опасное помещение). Лаборатория относится к помещениям без повышенной опасности поражения электрическим током, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность. Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

- содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;
- своевременно проводить техническое обслуживание;
- соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;
- проводить инструктаж для работников

В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

Индивидуальные защитные средства от напряжения подразделяются на основные и дополнительные. К основным защитным изолирующим средствам в установке до 1000 В относятся изолирующие штанги, клещи изолирующие и электроизмерительные указатели напряжения, диэлектрические перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками. К дополнительным изолирующим защитным средствам относятся средства, которые дополняют основные средства защиты, а также могут служить для защиты от напряжения прикосновения и шагового напряжения. Дополнительными защитными средствами в

установках до 1000 В служат диэлектрические галоши, диэлектрические коврики, изолирующие подставки.

### **5.2.7 Пожаровзрывоопасность**

Согласно НПБ 105-03 по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 - В4, Г и Д

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д. Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- использование только исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу (рисунок 21).



Рисунок 21 – План эвакуации при пожаре и других ЧС

### **5.3 Правила безопасной работы на установке «КВО»**

Выполнение магистерской работы происходило с использованием установки магнетронного распыления, газовых баллонов со сжатым аргонem и кислородом. Установка построена на базе диффузионного насоса, принцип его работы основан на разогреве паров масла. Касание нагреваемой части насоса может привести к сильному поражению кожных покровов – ожогу.

Для защиты от движущихся механизмов и повышенной температуры поверхностей оборудования, применяются защитные ограждения в соответствии с ГОСТ 12.2.062-81. Оборудование производственное. Ограждения защитные.

Предпочтительно применение сплошных ограждений. Ограждения, изготовленные из сетки (25x25 мм), должны иметь конструкцию, обеспечивающую постоянство формы и установленную жесткость. Сплошные ограждения - кожухи в электрических установках до 1000 В. Сетчатые ограждения применяются в установках напряжения до 1000 В и выше 1000 В.

Обращение с газовыми баллонами описано в ПБ10-115-96. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. К работе с газовыми баллонами должны быть допущены лица, прошедшие обучение и имеющие соответствующее удостоверение. Не допускается работа с неисправными баллонами, а также с баллонами, имеющими истекший срок хранения, за исключением слива баллонов при негерметичности газового арматурного блока или других фитингов.

Заправка и установка баллонов не допускается вблизи открытого огня, работающих электроприборов и автомобилей, а также запрещается курение. Баллоны при заправке и сливе должны быть установлены на заземлённую поверхность. Обязательно наличие исправного огнетушителя.

Обслуживающий персонал должен иметь одежду из не оплавляемой ткани, иметь на руках перчатки или рукавицы.

Категорически запрещается заправка баллонов более 85% общего объёма. Контроль осуществляется по началу выхода жидкой фазы из ниппеля.

В остальном, что не оговорено в настоящем разделе в части заправки и проверки баллонов, необходимо руководствоваться местными правилами.

Заправка газовых баллонов должна производиться вне помещений на специально оборудованных станциях.

Слив (перелив) газа следует производить на открытой, хорошо продуваемой площадке.

Заправленные или частично заправленные баллоны должны храниться вертикально под навесом, огороженным сеткой или иным способом, при этом площадь, через которую может свободно проходить воздух, не должна быть меньше 25% от площади всего ограждения и располагаться равномерно или в нижней части ограждения. На месте хранения должны находиться исправные огнетушители.

В одном месте должно храниться не более 200 баллонов. Расстояние от места хранения баллонов до других мест хранения газа не менее 5 м, до зданий и сооружений не менее 15 м.

Навес должен обеспечивать защиту от прямой солнечной радиации и прямого воздействия осадков.

Совместное хранение исправных и неисправных баллонов, а также баллонов с истекшим сроком технического освидетельствования не допускается. При хранении на баллонах должны быть закрыты все вентили и установлены заглушки.

## **5.4 Экологическая безопасность**

Экологическая безопасность в данном случае представляет собой способность отходов исследования не оказывать отрицательного воздействия на окружающую среду за пределами допустимых значений. В данном исследовании в качестве отходов могут выступать использованные или полные емкости аргона. Но данные емкости в качестве экологических отходов имеют высокую влияние на окружающую среду, но их утилизация и хранение происходит с выполнением определенных условий и требований, которые указаны в разделе выше.

## **5.5 Защита в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. Есть два вида чрезвычайных ситуации:

- техногенная;
- природная.

К техногенным ЧС относиться можно отнести пожары, взрывы, диверсии, выбросы ядовитых веществ, пожары, взрывы. К природным ЧС можно отнести природные катаклизмы. К наиболее вероятным техногенной ЧС является пожары. Для предотвращения пожаров, взрывов необходимо соблюдать правила техники безопасности и организовывать мероприятия, упомянутые в разделе 5.2.2.

При возникновении пожаров необходимо:

- сообщит о возникновении возгорания пожарным службам;

- отключить по мере возможности все электрические оборудования от розетки;
- закрыть по мере возможности все окна в помещении;
- покинуть помещения по схеме эвакуации.

Наиболее вероятным природным катаклизмом являются сильные морозы. Для защиты от сильных морозов производственные здания должны быть оборудованы запасными электрогенераторами и теплогенераторами. Помещения при сильном морозе должны быть обеспечены приборами обогрева. Для транспортировки персонала к рабочему месту и обратно домой, предприятия должны иметь рабочий транспорт. Производственные помещения должны быть обеспечены суточной нормой питьевой воды.

## **Выводы**

В результате рассмотрения условия работы с установкой, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы. Проведен расчет освещенности помещения, который удовлетворяет требуемым нормам общего равномерного освещения.

Вредные производственные факторы такие как отклонение микроклимата от нормы, производственный шум, электромагнитные волны, недостаточная освещенность можно и контролировать и свести к минимуму путем применение вытяжки, кондиционеров, специальных звукоизолирующих материалов, рациональным планированием помещений, контролированием работы за ЭВМ. Для предотвращения опасных производственных факторов необходимо соблюдение правил пожарной и электрической безопасности.

Влияния исследовательской работы на окружающей среды высокое, но соблюдаются меры предосторожности которые предотвращают его влияние на окружающую среду.

Для предотвращения техногенной ЧС необходимо соблюдение правил пожарной и электробезопасности. Наиболее вероятным природным катаклизмом является сильные морозы

## Заключение

Данная диссертационная работа посвящена исследованию осаждения медных покрытий с помощью магнетронной распылительной системы с жидкофазной мишенью. В работе были изучены скорость осаждения, шероховатость, структура покрытий и сопротивление пленок.

По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

- При осаждении покрытий из МРС с жидкофазной мишенью скорость напыления на порядок выше, чем у обычного МРС. Наилучший результат достигается при работе со среднечастотным источником питания (128-136 нм/с).
- Шероховатость поверхности не зависит от источника питания и режима распыления. Для тонких пленок с небольшой толщиной ( $\sim 1$  мкм) наблюдается увеличение шероховатости при использовании жидкой мишени.
- Наилучшее сопротивление получается при использовании жидкой мишени в сочетании среднечастотного источника и режима самораспыления.
- На структуру полученных медных покрытий, полученных с использованием жидкой мишени, не влияет вид источника питания и режим распыления.
- Структура медных тонких пленок, полученных с помощью твердой мишени, зависит от источника питания. Использование высокопоточного источника питания (НППМС) образует плотные бездефектные покрытия, в то время как при работе со среднечастотным источником питания (МФ) пленки имеют ярко выраженную столбчатую структуру.

## Список литературы

- 1) Громов Д. Г., Мочалов А. И. Материалы и процессы формирования систем металлизации кремниевых интегральных схем. – М.: МИЭТ, 2006. – 179с.;
- 2) Кукушкин С. А., Осипов А. В. Процессы конденсации тонких пленок //С-П.: УФН.1998. - 1083-1116с.
- 3) Sze S. M. Semiconductor devices: physics and technology. – John Wiley & Sons, 2008.
- 4) Пронин В., А. Горнов В.Н., Липин А.В., Лобода П.А., Мчедlishvili Б.В., Нечаев А.Н., Сергеев А.В. Ионно-лучевой метод модификации поверхности трековых мембран //Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71. – №. 11. – С. 96-100.
- 5) Mattox D. M. Ion plating—past, present and future //Surface and Coatings technology. – 2000. – Т. 133. – С. 517-521.
- 6) Берлин Е. В., Сейдман Л. А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. – М. Техносфера, 2010.
- 7) Бабурин А. С. и др. Монтаж и запуск жидкофазного магнетрона НМСА-52 на установке МВТУ-11-1 //Будущее машиностроения России. – 2015. – С. 370-374.
- 8) Donald L. S. et al. Thin-film deposition: principles and practice //McGraw-Hill. – 1995. – С. 8-9
- 9) Данилин Б.С. Осаждение металлических плёнок путем распыления из жидкой фазы/ Какурин М.В., Минайчев В.Е., Одинокоев В.В., Сырчин В.К. // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. - 1978. - тВып.. 2(74). – С. 84-87
- 10) Юрьева А. В. Осаждение металлических покрытий с помощью магнетрона с жидкофазной мишенью: дис. канд. тех. наук. Томский политехнический университет, Томск, 2017.

- 11) Тумаркин А. В. и др. Магнетронный разряд с расплавленным катодом //Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1. – №. 3. – С. 276-282.
- 12) Дубровский В. Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур: учебное пособие //Редактор ЛВ Шаронова. – 2006.
- 13) Пустовалова А. А. Структурные особенности и свойства азотсодержащих тонких плёнок диоксида титана, сформированных методом реактивного магнетронного распыления, для применения в биомедицине: дис. канд. тех. наук. Томский политехнический университет, Томск, 2017.
- 14) Lüth H. Collective Phenomena at Interfaces: Superconductivity and Ferromagnetism //Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films. – Springer, Cham, 2015. – С. 449-526.
- 15) Mickan M., Helmersson U., Horwat D. Effect of substrate temperature on the deposition of Al-doped ZnO thin films using high power impulse magnetron sputtering //Surface and Coatings Technology. – 2018. – Т. 347. – С. 245-251.
- 16) Wu B. H. et al. Plasma characteristics and properties of Cu films prepared by high power pulsed magnetron sputtering //Vacuum. – 2017. – Т. 135. – С. 93-100.
- 17) Техническое описание «Комплект вакуумного оборудования КВО для плазменной лабораторной установки»
- 18) Техническое описание «Рентгеновский дифрактометр XRD 6000»
- 19) Техническое описание «Трёхмерный бесконтактный профилометр»
- 20) Системы энергодисперсионного анализа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://emicroscope.ru/microscopes/microanaliz/eds/>;
- 21) Keithley Instruments official site [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.keithley.com/>;

- 22) Аналитический электронный микроскоп Zeiss Supra 55/55VP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rusnanonet.ru/equipment/zeiss\\_supra55/](http://www.rusnanonet.ru/equipment/zeiss_supra55/);
- 23) Иевлев В. М. Тонкие пленки неорганических материалов: механизм роста и структура. - Воронеж. ИПЦВГУ– 2008. - 496с.
- 24) Venables J. Introduction to surface and thin film processes. – Cambridge University Press, 2000.
- 25) Пичугин В. Ф. Материаловедение поверхности и тонких пленок. – Томск : Ветер,- 2007- 139с.
- 26) Кривобоков В. П. Радиационные и плазменные технологии. – 2010.
- 27) Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы //Киев: Аверс. – 2008.-Т.244.

## Приложение А

### Chapter 1 Thin metal coating

---

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ71	Торломоев Алексей Эженович		

Консультант школы отделения (НОЦ) – Экспериментальной физики:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель ОИЯ ШБИП	Шайкина Ольга Игоревна			

## **Introduction**

The relevance of this work is increasing due to the intensive development of the microelectronic industry and the increase in production volumes in equipment manufacturing plants that use thin metal and dielectric coatings that must meet modern standards. In particular, copper films as electrically conductive coatings, which are used as conductors on various coatings. In this connection, more productive technologies for the creation of microelectronic products are needed as a replacement for the already used magnetron sputtering of solid DC targets. It is required to create new technologies that will come to replace those already used, which will be more productive and less expensive in design. At the moment, research is being conducted on a new technology, the magnetron sputtering of a liquid target, which is an improved model of a magnetron sputtering with a solid target. This device consumes less energy than the magnetron sputtering system (MSS), also has good performance on the deposition rate of coatings, which are an order of magnitude more than the MSS

Purpose: Investigate the influence of various operating modes, structural materials and power sources on the properties of the obtained thin copper films depending on the state of the target.

The tasks required to achieve this goal:

1. Study the modes of operation of the MSS with a liquid target.
2. Obtain samples of thin films with a thickness of 1  $\mu\text{m}$  using MSS with a liquid target in various sputtering conditions (Ar + and Ar-) and using different power sources (MF and HPPMS).
3. Obtain samples of thin films with a thickness of 1  $\mu\text{m}$  using a solid target MSS using various power sources (MF and HPPMS).
4. Investigate the properties of the obtained thin films: roughness, structure and electrical conductivity.

Object of investigation - Properties of films obtained with the help of MSS with a liquid target.

The subject of the investigation is MSS with a liquid target.

## **Chapter 1 Thin metal coatings**

### **1.1 Methods for obtaining thin metallic coatings**

There are many methods of applying thin metal coatings. Among this set of methods, one can single out vacuum ion-plasma technologies. Streams of deposited particles are divided into two subgroups: Chemical Vapor Deposition, Physical Vapor Deposition [16]. This work belongs to the technologies of the second group. Therefore, CVD methods will not be considered here [2,3,8].

#### A. Chemical deposition methods:

- deposition from the gas phase;
- plasma-chemical deposition from the gas phase;
- deposition from the gas phase assisted by an electron beam;
- deposition from the gas phase initiated by a laser beam;

#### B. Physical deposition methods:

- thermal evaporation due to resistive heating;
- laser evaporation;
- ion-beam spraying;
- cathode sputtering;
- magnetron sputtering.

For the deposition of metal films for the purpose of metallization of dielectric plates, it is most advantageous to use physical deposition methods, this is due to the basic working parameters of physical deposition processes, their advantages with respect to chemical methods of coating formation. Among the main advantages of the methods of physical deposition of coatings are the following:

- high stability and repeatability of the process;
- possibility of automation;
- the possibility of controlling the deposition rate with greater accuracy;
- more high purity of coatings.

The main reasons why chemical deposition methods are not used to form metal films include:

- the inconstancy of speed;
- the need for high temperature (minimum 300 ° C);
- Poor stabilization of the process;
- the need to use the initial reagents in the form of gas, which leads to the need to use special systems to protect people from damage to volatile compounds;
- the need for recycling of volatile waste chemical reaction;
- complexity of localization of the process of deposition of coatings due to the realization of a chemical reaction in the entire volume of the working chamber.

In view of the above-described parameters, it is the physical methods of depositing coatings that are most often used in technological chains for the production of dielectric plates with metallization. We describe the main ones.

## **1.2. Magnetron Sputtering Systems: Principle of Operation, Their Parameters and Basic Configurations**

Magnetron Sputtering Systems (MSS) is a technology that replaced cathode sputtering, which has been used extensively in the manufacture of thin metal coatings since the early 1970s. The introduction of MRS has become widespread and has supplanted other technologies for the formation of thin metal films, such as thermovacuum and electron-beam evaporation.

Advantages of IFAs:

- 1) Coating of complex composition from alloys
- 2) Coatings with good uniformity in thickness and structure
- 3) Low thermal loads on the substrate
- 4) Continuous coating (large material stock)

Disadvantages of MSS:

- 1) Instability of the process for the deposition of oxides of nitrides and metal carbides
- 2) High process capacity

The devices of the magnetron sputtering system are very simple and are shown in Fig. 4.

The deposition process is divided into several stages:

- 1) Supply of negative potential to the cathode relative to the anode
- 2) Intensive ionization of the atoms of the working medium and the formation of plasma in the glow discharge region
- 3) Acceleration of ions in the near-cathode layer in the target region. The fraction of ions in the near-cathode layer, as calculated in Ref. [9], is about 90% of the total current
- 4) Sputtering the target material onto the substrate at energies of the order of 0.5 ... 0.7 keV

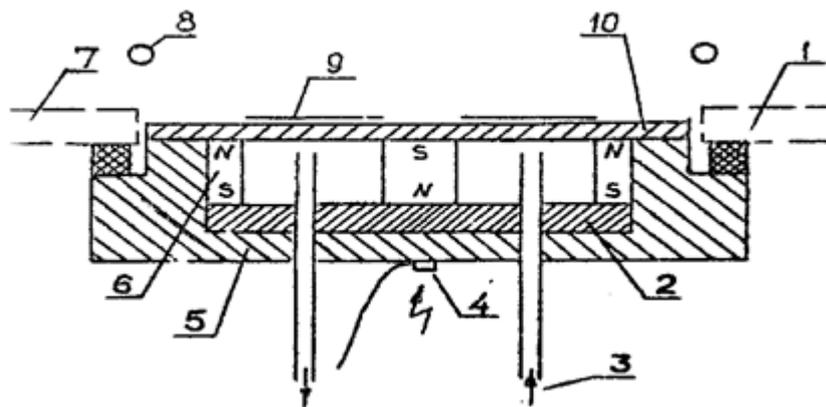


Fig.4 - Scheme of the planar magnetron system: 1 - ceramic gaskets; 2 - base; 3 - water channel; 4, 5 - body; 6 - permanent magnets; 7 - vacuum chamber; 8 - anode; 9 - zone of erosion; 10 - target cathode. [4]

The magnetic field plays the role of a trap for ionized electrons. In the trap, electrons precessional motion, which increases the frequency of their collisions with the atoms of the working medium, which leads to an increase in ionization and current density. The characteristic values of the magnetic induction vector in the near-cathode region are 10 ... 100 mT. Ions having smaller Larmor radius values are not affected by the magnetic field. The performance of magnetron sputtering systems is small (no more than 2  $\mu\text{m} / \text{min}$ ).

MSS is classified according to the following sections:

- 1) in geometry (planar, disk, cylindrical, complex geometry, etc.);
- 2) by type of power supply (DC, AC, pulse-periodic, packaged);
- 3) by the type of magnetron discharge (stationary, high-current);

4) on the operating frequency range of the power source (low-frequency, medium-frequency, high-frequency);

5) by the principle of the formation of a magnetic field (on permanent magnets, with the help of electromagnets);

6) by the type of magnetic field (balanced, unbalanced);

7) by the type of target (with a solid target, with a liquid-phase target).

Depending on the type of technological task, one resorts to the use of one or another configuration of MSS. For the deposition of metallic films, for the most part, planar MSS of direct current is used. The deposition process is realized exclusively in an inert gas environment at pressures of the order of  $10^{-2}$  ...  $10^{-1}$  Pa. To increase the productivity of the spraying system and minimize the contamination of metal coatings with chemical inclusions, operating modes are used to ensure the maximum power of the power source. At low discharge powers, the atoms and ions of the working medium (predominantly Ar) are embedded in the coating structure, thereby degrading the functional characteristics of the films. The characteristic values of the rates of deposition of metal films when using a direct current MRC are no more than  $2 \mu\text{m} / \text{min}$ .

#### Advantages of MSS

- 1) high deposition rate;
- 2) no overheating of the workpiece surface
- 3) high uniformity of coatings;
- 4) low degree of contamination of films

### **1.3 Magnetron Sputtering System with Liquid-Phase Target**

The main disadvantage of MRS remains the low growth rate of coatings and low energy efficiency of the deposition process, due to the fact that only 3% of the energy is spent on the ion sputtering process, and the rest energy is transferred to heat. The idea of increasing the performance of the MSS led to the creation of a liquid-target MSS. The presence of the evaporation component and the merit of MSSs that are integrated into the MSS with a liquid target made it possible to

increase the flux density of the deposited particles. The principle of operation of the MSS is based on the spraying of the surface of the material by plasma flows. To obtain the evaporation component in the MSS with the liquid target, the cooling system is not connected to the magnetic system (MS) and the MSS casing. Therefore, the heat that is released in the target site in the presence of plasma goes to the heating of the target material.

For a material in a solid state, the maximum permissible specific power and, consequently, the spraying rate is limited by its thermal conductivity. When heated for metals, the thermal conductivity decreases.

For a material in a solid state, the maximum permissible specific power, and, consequently, the spraying speed is limited by its thermal conductivity. For most metals, when heated, the thermal conductivity gradually decreases, and when passing from a solid state to a liquid phase, its total increase usually does not exceed a five-fold value. In the molten state, large powers can be introduced to the target, thereby increasing the rate of generation of the substance and raising the temperature of the melt to a value at which, along with the spraying, an intensive evaporation process begins. In connection with the foregoing, it seems advisable to use the thermal energy, which is currently spent on heating water, on the generation of matter by its evaporation, and thus combine the process of atomization and evaporation into a single spray-evaporation process.

The ratio of the contributions of the two components depends on the temperature of the metal surface, which, in turn, is determined by the power of the energy flux from the plasma and the properties of the target material. Thus, the energy, which is lost as a heat from the solid phase, is used for additional generation of the atomized substance. At sufficiently high energy densities, it is possible to transfer the magnetron discharge to the self-sputtering regime, in which the atoms of the target material act as the working gas, which substantially reduces the contamination of the film by the residual gases.

Despite the fact that in the self-sputtering mode, the plasma of the magnetron discharge contains a large number of ions (sufficient to maintain an

electrical discharge), the main part of the atoms deposited on the substrate is formed during evaporation, they are neutral and their velocity is small. For many metals, the evaporation component becomes noticeable when the target temperature exceeds the melting point by a factor of 1.3-1.5. Here, the growth of the film on the substrate occurs similar to the case of thermal evaporation, when the deposited atoms have thermal velocities.

It is known that the best quality films are obtained when a large number of ionized and excited atoms are present in the particle flux in the region of the substrate. This condition is achieved in various ways: using special ionizers of atomic flows, heating the substrate, feeding a negative bias to it, creating an unbalanced magnetron sputtering system, using ion assisting.

Let us consider the change in the discharge voltage and current during the transition of the cathode from the solid state to the molten state. The heating of the target metal to the melting point is carried out by ions bombarding the target.

The dynamics of the change in the discharge parameters, when the target material is heated to the melting point, is approximately the same for all metals.

In Fig. 10 shows the characteristic change in the voltage and discharge current at a constant power supply. Copper is used as the target material.

After ignition of the discharge as the target warms up, the current decreases sharply, and the voltage increases due to the decrease in the sputtering coefficient, since at a temperature close to the melting point, the sprayed surface becomes uniform and flat, which results in a decrease in the sputtering ratio by approximately 1.5 times.

After the start of the melting of the target, the reverse process occurs: the current sharply increases due to additional ionization of the vapor of the sputtered material and an increase in the thermionic emission current from the melt and reaches saturation after the equilibrium temperature is established in accordance with the supplied power, and the voltage decreases. At the same time, the discharge stably burns at a pressure of  $10^{-2}$  Pa, that is, an order of magnitude lower than when sputtered from the solid phase. Under the conditions indicated

above, the target material under the action of intense ion bombardment passes into the liquid state within 5-10 minutes, first the plasma localization zone melts, then the central part of the target and, finally, its edge region. [24.25]

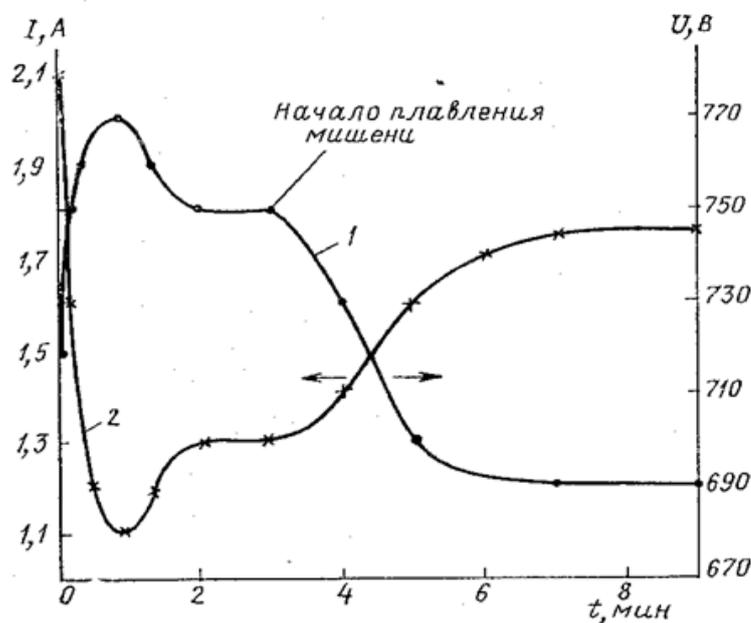


Fig.10 - Change of voltage and discharge current in time [8].

Начало плавления мишени- The beginning of the melting of the target

Experiments have shown that ions, in addition to sputtered and evaporated atoms, also enter the substrate. This indicates the possibility of implementing sputtering processes with a bias potential on the substrate and obtaining an ionic coating. For example, giving a negative potential of 100 V to the substrate allows it to draw on it an ion flux of 25% of the discharge current, which improves adhesion and other characteristics.

The main disadvantage of this design is the design of the target disk and the crucible. Because of this, there is an uneven melting of the target. First, the target melts in the plasma burning zone (along the ring), then in its central part, etc. Due to the difference in the temperature of the melt zone and relatively cold edges of the target, it breaks, therefore the magnetic field induction decreases and the discharge goes out. The discharge is difficult to ignite, even if the gap is filled with additional material, therefore the target requires melting. This requires additional material and time costs.

Another design of a magnetron sputtering system with a liquid-phase target is shown in Fig.11

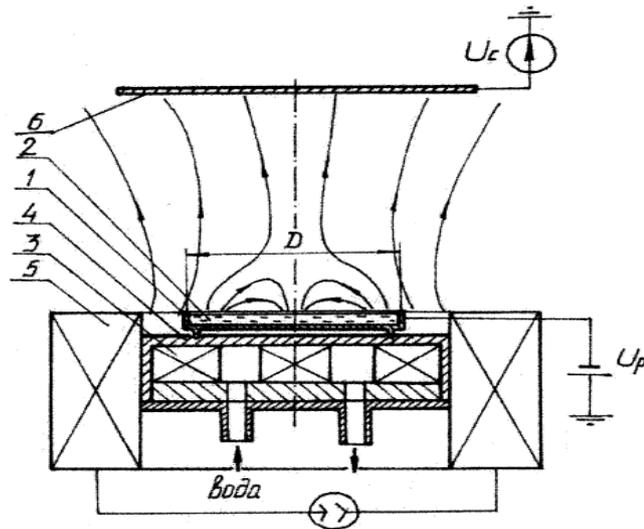


Fig.11 - Magnetron with liquid metal cathode:

1 - crucible; 2 - melt of the material of the target cathode; 3 - magnetic system; 4 - magnetron housing, 5 - external electromagnetic coil; 6 - substrate [7].

Вода -water

The sprayed material (2) is placed in a crucible (1) of refractory non-magnetic material. The crucible was made of tungsten foil. The target material used was aluminum, copper, lead and tin. Between the crucible and the water-cooled magnetic system, a small gap is made, about 2 mm wide, which prevents the heat from the crucible from being drawn off. The crucible is mounted on a magnetic system on thin needle legs. The legs are placed in the groove of the body of the magnetic system and provide fixation of the crucible in a certain position relative to the magnetic system so that the magnetic field above the target is of an arched configuration and also creates the necessary heat-insulating gap with the minimum area of contact with the cooled surface. The crucible has the shape of a cylinder with a diameter  $d_m = 50$  mm and a height  $h_m = 5$  mm. The blanks of the sputtered metals are disks with a diameter  $d_z = 45$  mm and a height  $h_3 = 3$  mm. The crucible has four legs, the area of the contact zone of each leg with the body of the magnetic system is  $1.96 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>. An arched magnetic field above the target

is created by a magnetic system on permanent neodymium magnets. The magnetic system consists of a central magnet and an external magnetic ring (3) fixed to a plate of ferromagnetic material and placed in a copper water-cooled casing (4). [25.24]

An external electromagnetic coil (5) was used to control the area of the sprayed surface. The number of turns  $n = 1000$ , the coil current varied in the range from 0 to 8 A. Changing the direction and current in the external coil can affect the magnitude of the magnetic induction and the configuration of the magnetic field above the target surface. The magnetron and the electromagnetic coil are attached to the body of the vacuum chamber, which is the anode. The disadvantage of this design is its small size. This magnetron is complicated in the implementation and it can not be used when the films are deposited on large-area substrates. Also in this system there is no evaporation process, which accordingly reduces the spraying rates.

In Fig. 12 shows the design of a liquid-phase magnetron with an annular target. The target is placed in a refractory crucible, which is thermally insulated by means of ceramic inserts from the magnetron housing, and is surrounded by pole pieces of the central and outer magnetic circuits. The magnetic system includes a magnetic circuit and a set of permanent magnets cooled by running water. [24]

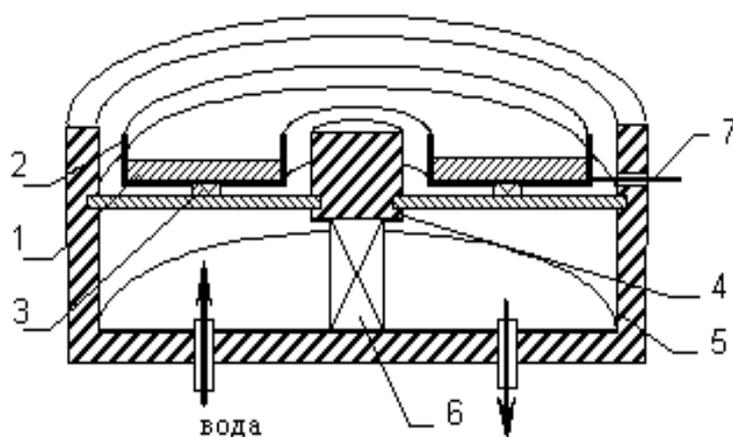


Fig. 12 - Design of a ring magnetron with a liquid-phase target:

- 1 - copper target; 2 - graphite crucible; 3 - ceramic inserts; 4 - central magnetic circuit; 5 - magnetron housing; 6 - permanent magnets; 7 - thermocouple [7].

Вода -water

The magnetic field on the surface of the target was created by permanent magnets, the induction was of the order of 0.1-0.2 T. The discharge voltage of the presented magnetron varied in the range 340-610 V at a current density of 40-190 mA / cm<sup>2</sup>. [25]

At first, the magnetron works in the usual mode. The target remains solid. But as the plasma of the magnetron discharge expands, it gradually heats up and melts. After that, the nature of the erosion of its surface changes completely, since a significant part of the atoms leave the target due to evaporation, rather than atomization, as in the case of a solid target. At the same time, their number can be so large that it is possible to cut off the supply of working gas and the magnetron will work on metal vapors. It should be noted that the proportion of metal ions in the gas-discharge plasma is gradually increasing also because their ionization potential is lower than that of argon. Thus, the magnetron goes into self-sputtering mode, where the atoms of the target material act as the working gas [24].

The field of how the whole target has completely passed into the liquid state, it does not remain in a state of rest, but begins a circular rotation with an angular velocity of about 1.25 s<sup>-1</sup>. This is explained by the interaction of electric and magnetic fields in a liquid metal. As a consequence, a force appears that causes the liquid metal to move in the direction that is set by the known rule of the left hand. This behavior of the liquid metal positively influences the spraying process, since residual dirt is removed from the target surface onto the crucible walls. [25,24]

## **1.4. Mechanisms of formation and properties of thin films and the influence of bias voltage on them**

### **1.4.1. Mechanisms of formation of thin films**

To describe, the processes that occur during the condensation of complex multicomponent thin films, a great deal of work has been devoted [17, 18]. In these works, the processes occurring on the surface of solids in the appearance of a new

phase on them are considered in detail. The nucleation of thin-film structures on the surface of a substrate from a supersaturated vapor proceeds in two stages:

- 1) Nucleation - the emergence of embryos capable of further growth;
- 2) Growth of the film - an increase in the number of embryos and their combination with the subsequent formation of a continuous film on the surface of the substrate.

The mechanism of interaction between a film and a substrate is divided into three types (Fig. 13) [20]:

1. Volmer-Weber's islet growth mechanism;
2. The layered mechanism of Franck-van der Merwe;
3. The mixed mechanism of Stranski-Krastanov.

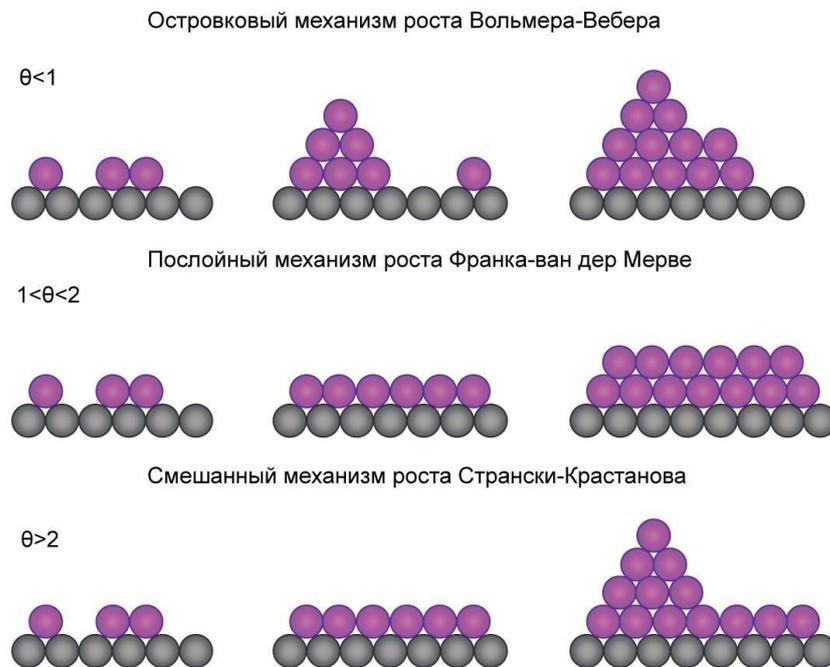


Fig.13 - Schematic representation of film growth mechanisms (degree of coverage  $\theta$ , in fractions of monolayers) [20]

Островковый механизм роста Вольмера-Вебера- Volmer-Weber's islet growth mechanism;  
 Послойный механизм роста Франка-ван дер Мерве- The layered mechanism of Franck-van der Merwe;  
 Смешанный механизм роста Странски-Крастанова- The mixed mechanism of Stranski-Krastanov.

Island mechanism. The first type of film growth occurs through the initial formation of two-dimensional or three-dimensional embryos, which are combined into a continuous film on the surface of the substrate. An island growth mechanism occurs in the interactions of adatoms with adatoms. With this mechanism, the substance settles on the surface in the form of multilayer conglomerates at the beginning of the growth process.

The layered mechanism. The second type of film growth occurs by filling each subsequent film layer. The second layer is formed only after the complete formation of the previous layer. The layered growth mechanism occurs with a much greater interaction between the substrate and adatoms than the interaction of neighboring adatoms with each other.

The mixed mechanism. The third type of film growth combines the two previous mechanisms. The first layer is formed completely and in the future the growth of three-dimensional islands of the film occurs. Many factors contribute to this growth mechanism, one of which may be a large discrepancy between the parameters of the substrate and the crystal lattice of the film.

A condition differentiating the origin of these growth mechanisms can be obtained within the framework of a dome-shaped three-dimensional nucleus model (Fig. 15) with a radius of curvature ( $r$ ) and a boundary angle ( $\varphi$ ) determined from the ratio of surface tension at three-phase interfaces: primary phase-substrate ( $\sigma_S$ ), primary phase-secondary phase ( $\sigma_F$ ) and secondary phase-substrate ( $\sigma_{S/F}$ ). The force interpretation of surface tension allows us to represent them in the form of power vectors, as shown in Fig. 14. Young's equation [20] for the edge angle follows from the equilibrium condition of these forces:

$$\cos\varphi = \frac{\sigma_S - \sigma_{S/F}}{\sigma_F} \quad (3)$$

The Young equation (3) provides a better understanding of the three film growth mechanisms presented in Fig. 13

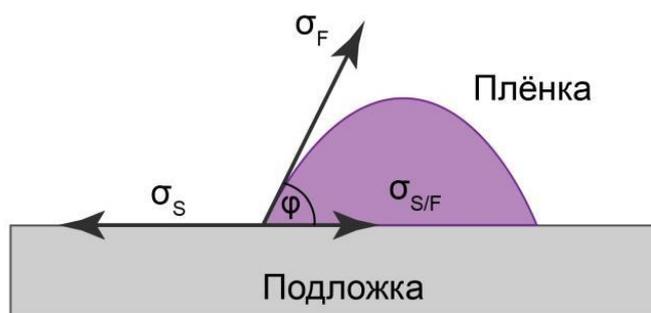


Fig. 14. - Three-dimensional island of a film on a substrate [20]

Пленка - film

Подложка – substrate.

When  $\varphi = 0$ , the island forms a thin layer on the surface of the substrate - a layered growth mechanism. The relationship between the coefficients of surface tension under this condition has the following form:

$$\sigma_S \geq \sigma_{S/F} + \sigma_F \quad (4)$$

An island growth mechanism takes place for  $\varphi > 0$ , according to the following condition:

$$\sigma_S < \sigma_{S/F} + \sigma_F \quad (5)$$

The implementation of a particular growth mechanism depends on the choice of parameters and conditions for the formation of films and the physico-chemical nature of the substrate, which affect the structure and performance characteristics of the resulting films. [20]

#### 1.4.2. The bias voltage

The bias voltage for magnetron sputtering is used to enhance the adhesion properties of thin films. [22] This article presents the results of a study of the influence of bias voltage when depositing copper (Cu) thin films with HiPiMS (high-power pulsed magnetron system). Owing to the high density of the plasma in HiPiMS, the amount of neutral metal ions in the deposition stream rises, reaching ~ 70% in the case of copper (Cu). In addition, the trajectory of high-momentum metal ions facilitates deposition in substrates with a high aspect ratio [22], which is

advantageous for the deposition of homogeneous films on substrates with complex geometries, such as metallization for ULSI devices. In general, the topology of the surface, the concentration of point defects, the mass density, the grain size, and the texture of copper (Cu) films affect their physical and mechanical properties [22]. The strict arrangement and the large size of the grains allow us to talk about improving the texture and microstructure of thin copper films during copper incrustation. In HiPiMS, the energy of the incident ions on the substrate can be easily controlled by the bias voltage of the substrate to increase the ability to control crystalline phases, the microstructure and the chemical composition of the resulting films.

Copper (Cu) films were deposited on Si (100) plates with a closed-field unbalanced magnetron sputtering system. The unbalanced magnetron sputtering system consisted of four rectangular magnetrons. HPPMS power supply (Chengdu Pulsetech Electrical, HPS-450D) was used to power magnetrons in this work. The vacuum chamber was evacuated to a base pressure of  $10^3$  Pa using a turbomolecular pump. During the deposition, only one of four rectangular targets measuring 134 mm X 170 mm.

The other three targets were not involved in the study, but were stored in the chamber to close the magnetic field. The effective sputtering area was  $42\text{ cm}^2$ , which was measured on the discharge track on the target surface. In this paper, the average power was maintained at approximately 592 watts. A typical set of discharge parameters consisted of a trigger voltage of 800 V, a pulse width of 100 ms and a frequency of 200 Hz, maintaining the pressure of the plates 0.42 Pa. Si (100) was mounted on the substrate holder with a distance from the target to the base of 100 mm. The time of spraying was 20 min. The bias voltage of the substrate was changed from floating, up to 100 V with a DC power supply.

According to the results of the study, it was concluded that the type of current on the substrate consists of both ionic and electronic currents. Electrons are the dominant contributors at the beginning of the pulse, and then the positive ions (Ar + and Cu +). As the displacement of the substrate increases from 17.3 V

(floating) to 100 V, the electron current decreases, and the ion current rises to stable values at 50 V. However, changes in deposition rate, tensile stress and topology of copper Cu films deposited from floating to 50 B are barely distinguishable compared to copper Cu films deposited from -50 V to 100 V. Although the flow of positive ions on the substrate increases from floating to 50 V, the ion energy remains low. The bias voltage increases from 50 V to 100 V, the number of positive ions does not change, but the energy of ions bombarding the substrate increases. As a result, the deposition rate decreases due to the re-spraying effect and the tensile stress of the Cu films increases. At a bias voltage of ~ 100 V, the Cu film exhibits a strong (111), and its resistivity reaches a minimum value of 1.79 mV cm, which is close to that of the bulk phase of Cu. This result can be explained by the high ratio of neutral ions in HPPMS. A large number of positive ions, accelerated by a negative substratum of the bias voltage, leads to increased migration and diffusion of the surface, which leads to a smooth surface and an increase in the grain size. The improved texture (111) and the large grain size of copper Cu films deposited at 100 V can be more effective for prolonged electromigration.