

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 160401 Техническая физика
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Особенности осаждения хромовых покрытий при работе магнетронной распылительной системы с сублимирующей мишенью

УДК 621.793.7:621.385.64:669.268

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Афанасьев Виталий Александрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кашук И.В.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООТД	Сечин А.А.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой – руководитель научно-образовательного центра на правах кафедры, НОЦ Б.П. Вейнберга	Кривобоков В.П.,	д.ф.-м.н.		

**Результаты обучения магистров
направления 16.04.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
P1	Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-2, ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012
P2	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий	Требования ФГОС (ОПК-1). СУОС ТПУ (УК 2, УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008
P3	Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты	Требования ФГОС (ОПК-5, ОПК-7, ПК-5, ПК- 8). СУОС ТПУ (УК 1). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008
P4	Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ОПК-6, ПК-6, 7). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035
P5	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учётом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.	Требования ФГОС (ПК-12,13,14). СУОС ТПУ (УК 6). <i>CDIO Syllabus</i> (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008
P6	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии.	Требования ФГОС (ПК-15, 16). СУОС ТПУ (УК 2, УК3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011
P7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). СУОС ТПУ (УК 1, УК3, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
	научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	международных стандартов EUR-ACE и FEANI . Профессиональный стандарт 40.011, 01.004
P8	Владеть приёмами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	Требования ФГОС (ОПК-3). СУОС ТПУ (УК 1, УК3). <i>CDIO Syllabus</i> (4.7). Критерий 5 (п. 2.4) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 01.004
P9	Анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоемкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.	Требования ФГОС (ПК-5). СУОС ТПУ (УК 1, УК2). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035
P10	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять своё научное мировоззрение.	СУОС ТПУ (УК 6). Критерий 5 (п. 2.6) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения	Требования ФГОС (ОПК - 7). СУОС ТПУ (УК4, УК5). <i>CDIO Syllabus</i> (2.4, 3.3). Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОПК,3 ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 3). <i>CDIO Syllabus</i> (2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011.

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

Подразделение Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки 160401 Техническая физика
Отделение Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Кривобоков В.П.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студенту:

Группы	ФИО
ОДМ81	Афанасьеву В.А.

Тема работы:

Особенности осаждения хромовых покрытий при работе магнетронной распылительной системы с сублимирующей мишенью

Утверждена приказом директора (дата, номер) 52-46/с от 21.02.2020 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы: 08.06.2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ol style="list-style-type: none">1. Вакуумно-плазменная установка с диагностическим оборудованием.2. Магнетрон с хромовой мишенью, имеющей ограниченный теплопроводный сток.3. Программный комплекс для выполнения расчётов тепловых и эрозионный процессов в мишени магнетрона, имеющей ограниченный теплопроводный сток, а также характеристик эрозионных потоков и скоростей осаждения покрытий.4. Оборудование для определения толщины покрытий Calotest CAT-S0000.3. Сканирующий электронный микроскоп4. Оборудование для коррозионных испытаний образцов.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1. Механизмы функционирования разряда при работе магнетрона с сублимирующей хромовой мишенью в режиме самораспыления и с напуском рабочего газа.2. Определение скорости осаждения покрытий при магнетронном распылении горячей хромовой мишени в режиме самораспыления и с напуском рабочего газа.

	3. Измерение ионного тока, поступающего на подложку при подаче отрицательного потенциала. 4. Определение коррозионной стойкости хромовых покрытий.
Перечень графического материала	1. Титульный лист. 2. Abstract. 3. Актуальность работы. 4. Способы осаждения хромовых покрытий. 5. Предложено. 6. Цель и задачи. 7. Оборудование для осаждения покрытий. 8. Оборудование для экспериментов. 9. Измерительное и аналитическое оборудование. 10. Математическая модель для расчёта температуры мишени и плотностей потоков эмитируемых частиц. 11. Методики расчёта плотностей потоков атомов. 12. Методика расчёта концентрации атомов Cr вблизи мишени. 13. Изменение силы тока и напряжения. 14. Рассчитанная эволюция скорости сублимации атомов хрома и температуры мишени при $Q=2250$ Вт. 15. Рассчитанная концентрация атомов в разрядном промежутке. 16. Пространственное распределение атомов хрома, эмитированных с поверхности горячей мишени при мощности 2500 Вт. 17. Скорость осаждения хромовых покрытий в зависимости от мощности магнетрона. 18. Анализ ионного тока, направленного на подложку, которая находится под отрицательным потенциалом. 19. Коррозионная стойкость хромовых покрытий. 20. Положения, выносимые на защиту. 21. Заключение.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Доцент ОСГН, Кащук И.В.
«Социальная ответственность»	Ассистент ООТД, Сечин А.А.
«Раздел на английском языке»	Старший преподаватель, Утягина Я. В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
1. Анализ проблем, возникающих при распылении горячей хромовой мишени. 2. Оборудование и методы исследования. 3. Описание и анализ результатов исследования. 4. Magnetron Sputtering System..	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	21.02.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор НОЦ Б. П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Афанасьев В. А.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Афанасьеву Виталию Александровичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование.
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Ставка отчисления во внебюджетные фонды – 0,3.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)</i>	Проведение предпроектного анализа. Выполнение SWOT-анализа проекта.
<i>2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР</i>	Определение структуры выполнения НИ. Определение трудоемкости работ. Разработка графика проведения исследования.
<i>3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	Расчет бюджетной стоимости НИ.
<i>4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Анализ проекта с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка конкурентоспособности НИ 2. Матрица SWOT 3. Диаграмма Ганта 4. Бюджет НИ 5. Основные показатели эффективности НИ 	
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кащук И.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Афанасьев В. А.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Афанасьеву Виталию Александровичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Тема ВКР:

Особенности осаждения хромовых покрытий при работе магнетронной распылительной системы с сублимирующей мишенью	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: хромовые покрытия получаемые с помощью магнетронного осаждения. Область применения: материаловедения – защитные, коррозионностойкие покрытия. Рабочее место: лаборатория 23 НОЦ Б.П.Вейнберга
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда; – СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений; – СанПин 23-05-95 Естественное и искусственное освещение; – ГОСТ 12.1.002-84. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– повышенный уровень шума; – электробезопасность; – электромагнитное излучение; – микроклимат; – освещённость рабочей зоны; – пожаробезопасность.
3. Экологическая безопасность:	– продукты реакций; – области воздействия на атмосферу, гидросферу.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– ситуация техногенного характера; – ситуация природного характера.

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООТД	Сечин А.А.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Афанасьев Виталий Александрович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 131 страницы, 32 рисунка, 50 источников литературы, 19 таблиц, 1 приложение на английском языке.

Ключевые слова: магнетронное распыление, горячая мишень, самораспыление, хромовые покрытия, высокоскоростное осаждение.

Объектом исследования являются магнетронный разряд, функционирующий на парах мишени, изготовленной из хрома, а также свойства хромовых покрытий.

Цель работы – выявить закономерности функционирования разряда с сублимирующей хромовой мишенью, в том числе в режиме самораспыления, а также влияние режима самораспыления на коррозионную стойкость хромовых покрытий, осаждённых в этих условиях.

В процессе исследования определялась минимальная мощность, при которой магнетронная распылительная система стабильно функционировала в режиме самораспыления. Изучался механизм поддержания магнетронного разряда при использовании сублимирующей хромовой мишени. Выявлялись зависимости скорости роста хромовых покрытий от мощности магнетрона. Изучались особенности условий осаждения при подаче на подложку отрицательного потенциала смещения. Анализировались антикоррозионные свойства хромовых покрытий, полученных в разных режимах магнетронного осаждения.

В результате работы показано, что магнетрон стабильно работает в режиме самораспыления хромовой мишени при минимальной мощности 2250 Вт. Скорость осаждения плёнок хрома, полученных путём распыления сублимирующей мишени, увеличена на порядок по сравнению с обычным распылением. Хромовые покрытия, осаждённые при минимальной мощности магнетрона в режиме самораспыления, продемонстрировали более высокую коррозионную стойкость, по сравнению с покрытиями, полученными в присутствии рабочего газа.

Область применения: защита конструктивных деталей и узлов от коррозии, для повышения износостойкости и твердости деталей.

Оглавление

Введение.....	14
Глава 1 Анализ проблем, возникающих при распылении горячей хромовой мишени	17
1.1 Вакуумное напыление	17
1.2 Принципы работы магнетронных распылительных систем.....	21
1.3 Особенности магнетронного распыления металлических мишеней, испытывающих испарение или сублимацию	32
1.4 Режим самораспыления.....	37
1.5 Проблема неравномерности распыления сублимирующей мишени и предполагаемые способы её решения.....	39
1.6 Постановка задач исследования	44
Глава 2 Оборудование и методы исследования	46
2.1 Описание использованного оборудования для осаждения хромовых покрытий.....	46
2.2 Приборы и методы диагностики	52
2.2.1 Измерение толщины покрытий	52
2.2.2 Исследование коррозионной стойкости покрытий	54
2.3 Методики расчётов	57
2.3.1 Математическая модель тепловых и эрозионных процессов теплоизолированной горячей мишени.....	57
2.3.2 Методика расчёта скорости осаждения покрытий и частиц и их концентрацию в пространстве между мишенью и подложкой	59
2.3.3 Методика расчета концентрации атомов в пространстве между мишенью и подложкой	60

Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	77
Введение.....	77
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	77
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	77
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений	78
4.2 SWOT-анализ	79
4.3 Планирование научно-исследовательских работ	81
4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	81
4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	81
4.3.3 Разработка графика проведения исследования	82
4.4 Бюджет научно-технического исследования	86
4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ.....	86
4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ.....	86
4.5 Основная заработная плата исполнителей темы	87
4.5.1 Дополнительная заработная плата исполнителей темы	89
4.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	89
4.7 Накладные расходы	90
4.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта ...	90
4.9 Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности исследования	91
Глава 5 Социальная ответственность.....	95
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	95

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	95
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	96
5.2 Производственная безопасность	98
5.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	99
5.3.1 Производственный шум	99
5.3.2 Микроклимат.....	99
5.3.3 Расчет искусственной освещенности.....	100
5.3.4 Электробезопасность.....	104
5.3.5 Электромагнитное излучение	106
5.3.6 Пожарная безопасность.....	108
5.4 Экологическая безопасность.....	109
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	110
Выводы по разделу «Социальная ответственность».....	112
Заключение	113
Список литературы:	114
Приложение А	119

Введение

На сегодняшний день защитные, износостойкие, декоративные и тому подобные плёнки нашли широкое применение при изготовлении обрабатываемых инструментов, в современных технологиях машиностроения, микроэлектроники, медицины и других областях.

Для нанесения тонкопленочных покрытий широкое распространение получило магнетронное осаждение, процесс которого основан на распылении материала мишени ионами из газоразрядной плазмы. Применение магнетронных распылительных систем (МРС) получило широкое применение благодаря тому, что они позволяют получать покрытия высокого качества и практически любые по составу и функциональным свойствам. Так получается при правильном выборе большого количества рабочих параметров: мощности разряда, ионного тока, направляемого на подложку, рабочего давления в вакуумной камере, параметров электрического питания и пр.

Однако у метода с использованием МРС есть недостатки, основными из которых является низкая скорость осаждения покрытий и необходимость поддержания относительно высокого давления в рабочей камере. Низкая скорость осаждения связана с тем, что у типичных МРС основным механизмом создания осаждаемого потока частиц является распыление. Высокое давление в камере, т.е. для типичных магнетронов, как правило, от 0,1 до 1 Па, связано с необходимостью присутствия рабочего газа (часто используют аргон), поддерживающего функционирование разряда. Но при этом атомы рабочего газа и попадающих вместе с ним в камеру посторонних частиц могут быть захвачены в осаждаемые слои формируемого покрытия. В этом случае происходит его загрязнение, что может приводить к ухудшению функциональных характеристик. В последнее время выяснено, что одним из возможных способов повышения скорости осаждения, а так же уменьшения давления в камере является использование МРС с мишенями, вещество

которых испытывает испарение или сублимацию дополнительно к распылению. В катодных узлах подобных МРС мишень теплоизолируется от охлаждаемого корпуса диода, и энергия плазмы эффективно расходуется на её нагрев. При определённой плотности мощности возможны фазовые превращения первого рода (плавление, испарение). Если вещество мишени имеет высокие скорости сублимации (например, хром), то нет необходимости доводить его до плавления. В этом случае можно организовать работу МРС с твердотельной горячей мишенью, которая становится эффективным средством для высокоскоростного осаждения металлических плёнок.

Опыты с медными мишенями продемонстрировали, что разряд переходит в режим самораспыления при достаточно высоких плотностях энергии, при котором атомы материала мишени участвуют в качестве рабочего газа, и рабочее давление в камере снижается на один два порядка, что в свою очередь увеличивает качество получаемых покрытий [1,2]. Важным обстоятельством является то, что получается значительно увеличить плотность потока эмиссии частиц благодаря испарения и приблизительно на один – два порядка увеличить скорость роста осаждаемого покрытия. Применительно к МРС с сублимирующими хромовыми мишенями подобная задача не решалась. Но её решение может быть востребовано и для практических применений, и для понимания фундаментальных процессов функционирования магнетронного разряда. Поэтому возникла идея выполнить серию исследований по выводу магнетрона с сублимирующей хромовой мишенью в режим самораспыления и изучить характеристики покрытий, получаемых в этих условиях.

Для того чтобы исследовать основные механизмы осаждения покрытий при работе МРС с сублимирующей мишенью, была поставлена цель – выявить закономерности функционирования разряда с сублимирующей хромовой мишенью, в том числе в режиме самораспыления,

а также особенности структурных и функциональных свойств плёнок, осаждённых в этих условиях, а так же поставлены следующие задачи:

➤ исследовать параметры разряда (вольт-амперные характеристики, давление в камере) при работе магнетрона с сублимирующей хромовой мишенью в присутствии аргона и в режиме полного самораспыления при разной мощности источника питания;

• найти минимальную мощность, при которой магнетрон с горячей хромовой мишенью стабильно работает в режиме самораспыления;

• исследовать условия осаждения при подаче отрицательного смещения (U_{bias}) на подложку при работе магнетрона с горячей мишенью в режимах с аргоном и в условиях полного самораспыления;

➤ изучить механизмы поддержания разряда при работе магнетрона с сублимирующей хромовой мишенью в режиме самораспыления;

➤ получить данные о зависимости скорости роста хромовых покрытий от мощности магнетрона, фазового состояния мишени (горячая сублимирующая или охлаждаемая) и фактора самораспыления ;

➤ сравнить функциональные (точнее, антикоррозионные) свойства хромовых покрытий, полученных при работе магнетрона с охлаждаемой мишенью и с сублимирующей мишенью в присутствии аргона и в режиме полного самораспыления.

Предполагалось, что будут получены более чистые покрытия, и это приведёт к значительному улучшению их функциональных характеристик. При этом будут значительно увеличены скорости осаждения за счёт того, что к распылению добавляется процесс сублимации.

Глава 1 Анализ проблем, возникающих при распылении горячей хромовой мишени

1.1 Вакуумное напыление

Вакуумное напыление (ВН) включает в себя группу методов получения тонких пленок и покрытий, в которых атомарный поток осаждаемого вещества формируется при помощи физических процессов испарения материалов в вакууме или распыления атомов поверхности изначального материала в результате бомбардировки ускоренными ионами или нейтральными атомами. Напыление реализуют в камере, в которой благодаря средств вакуумирования достигается и постоянно поддерживается разрежение. Благодаря этому обеспечивается перенос атомов и фактически исключается их взаимодействие с газами.

Поток испаренных или распыленных атомов, сталкиваясь с поверхностью твердого тела, адсорбируется и конденсируется на ней, образуя различные слоистые структуры. По аналогии с любым процессом получения покрытий ВН можно разбить на три последовательно протекающие стадии: 1) преобразование исходного напыляемого материала в парообразный поток испаренных (распыленных) атомов; 2) распространение потока пара в направлении поверхности напыления; 3) взаимодействие атомарного потока с твердым телом, конденсация и формирование покрытия.

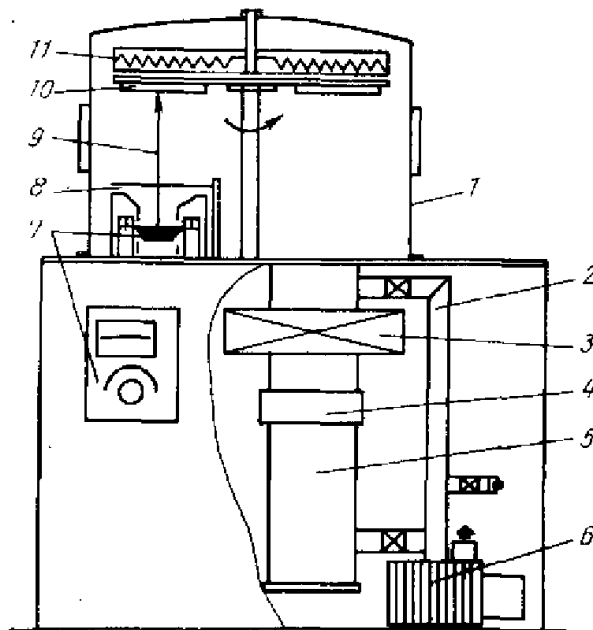


Рисунок 1.1 – Схема установки вакуумного напыления[3]:

1 — рабочая камера; 2 — вакуумопровод с вентилями; 3 — высоковакуумный затвор; 4 — азотная ловушка; 5 — диффузионный паромасляный насос; 6 — механический насос; 7 — резистивный испаритель с источником питания; 8 — заслонка; 9 — поток испаренных атомов; 10 — детали подложки; 11 — подложкодержатель

Каждый из этих этапов характеризуется рядом параметров, которые определяют, в конечном счете, эксплуатационные и функциональные показатели осажденных покрытий. К основным параметрам относят: плотность атомарного потока вещества, сталкивающегося с поверхностью напыления и его энергетическое состояние; давление и состав остаточных газов в рабочей камере; температуру нагрева обрабатываемой детали перед и во время напыления и активацию процессов, протекающих на поверхности зарождения и роста конденсата.

Схема ВН показана на рис. 1.1. Основными узловыми элементами установки являются рабочая камера и система вакуумирования (1); источник, обеспечивающий создание атомарных потоков вещества (2); внутрикамерная оснастка (подложкодержатель) для крепления напыляемых деталей-подложек, нагрева их перед и при напылении, активации подложки и поверхности роста с помощью обработки заряженными частицами и обеспечения осаждения покрытий равномерных по толщине (3).

Рассмотрим различные виды вакуумного напыления.

В соответствии с физическим процессом, положенным в основу создания атомарных потоков вещества, ВН можно подразделить на термовакуумное напыление (ТВН) и напыление с помощью ионного распыления (ИР).

Метод ТВН заключается в нагреве исходных материалов с помощью какого-либо источника энергии (резистивный нагрев, электронный луч, электрический разряд и т.п.) до температуры испарения, их испарении и конденсации паров на поверхности твердых тел в виде тонких пленок и покрытий. Давление остаточных газов в рабочей камере $\leq 10^{-2}$ Па.

В процессе испарения или сублимации вещества переходят в парообразную фазу. Пар, находящийся в термодинамическом равновесии с жидкостью или твердым телом, называется насыщенным. Испарение обусловлено тем, что кинетическая энергия молекул и атомов в поверхностном слое жидкости или твердого тела настолько превышает их среднюю энергию в объеме при данной температуре, что они отрываются и распространяются в свободное пространство.

Движущей силой переноса частиц является различие давлений насыщенных паров над поверхностью испарения и вблизи поверхности конденсации. С повышением температуры нагрева испарение интенсифицируется.

Ионное распыление – метод ВН, в котором осаждаемый атомарный поток получают в результате бомбардировки ускоренными ионами поверхности исходного напыляемого материала и последующей инжекции распыленных атомов в паровую фазу.

Характер взаимодействия бомбардирующих ионов с поверхностью твердого тела определяется их энергией. При энергиях, меньших 5 эВ, взаимодействие ограничивается физически и химически адсорбированными слоями, вызывая их десорбцию и обуславливая протекание различных химических реакций. При кинетических энергиях, превышающих энергию связи атомов в кристаллической решетке, бомбардировка вызывает

разрушение приповерхностного слоя и выброс атомов в паровую фазу (распыление). Минимальная энергия ионов, приводящая к выбиванию атомов с поверхности, называется пороговой энергией распыления.

Характеристикой процесса ИР служит коэффициент распыления, определяемый количеством атомов, выбитых с бомбардируемой поверхности падающим ионом. Распыление вызывается, в основном, передачей импульса энергии от бомбардирующей частицы атомам кристаллической решетки в результате серии последовательных столкновений.

К ионному распылению можно отнести магнетронные распылительные системы (МРС). Они позволяют распылять и наносить покрытия практически из всех металлов, сплавов и проводящих и диэлектрических керамик. При этом толщина покрытия может быть от нескольких нанометров до нескольких десятков микронов.

Преимуществами МРС являются:

- высокие скорости нанесения покрытия (более чем в десять раз по сравнению с обычным катодным распылением);
- невысокие тепловые нагрузки на подложку, что важно при нанесении покрытий на полимерные подложки;
- возможность нанесения покрытий сложного состава из сплавов (например, при термовакuumном испарении происходит сепарация компонентов сплава);
- возможность нанесения покрытий в среде реактивного газа (оксиды, нитриды, карбиды);
- возможность нанесения покрытия с хорошей воспроизводимостью и однородностью по толщине и составу на подложки больших размеров; эта особенность магнетронного осаждения определяет его преимущество по сравнению с другими вакуумными методами при нанесении покрытий на рулонные и листовые материалы.

1.2 Принципы работы магнетронных распылительных систем

Магнетронная распылительная система включает в себя (см. рис.1.2) распыляемый катод-мишень 1, магнитопровод 2, магнит 3, , анод 4, электростатический экран 5, штуцера подачи воды 6.

Магнитопровод и магнит образуют магнитную систему, создающую арочное магнитное поле над поверхностью катода. Вместо постоянного магнита может использоваться электромагнит. Анодом часто служат стенки вакуумной камеры, в которой располагается магнетронная распылительная система. В некоторых случаях применяют отдельный анод, изолированный от вакуумной камеры и имеющий относительно неё положительный потенциал. Электростатический экран, охватывающий катод, служит для предотвращения зажигания разряда на боковых поверхностях магнитопровода или катодного узла. Электростатический экран может находиться под потенциалом камеры или анода.

В МРС используется разряд низкого давления в неоднородных скрещенных электрическом (E) и магнитном (B) полях, локализованный у поверхности распыляемой мишени, которая является катодом. Причем силовые линии электрического поля (напряжённость E) перпендикулярны, а магнитного поля (магнитная индукция B) параллельны катоду. Эмитируемые с поверхности катода при ионной бомбардировке электроны захватываются магнитным полем и совершают сложные циклические движения у распыляемой поверхности, многократно сталкиваясь с атомами рабочего газа. Полученные в результате ионизирующих столкновений электроны также удерживаются в магнитной ловушке. Таким образом, вблизи поверхности катода образуется область с высокой концентрацией частично замагниченной плазмы. Полученные в результате ионизации рабочего газа ионы ускоряются приложенным разрядным напряжением в направлении катода-мишени и распыляют ее.

Магнетронную распылительную систему характеризуют следующие параметры:

- максимальные и типичные напряжение разряда, ток разряда и средняя плотность тока на катоде;
- допустимый диапазон давления рабочего газа;
- величина и форма магнитного поля над поверхностью катода;
- вольт-амперная характеристика разряда;
- скорость распыления катода /скорость роста покрытия;
- коэффициент использования материала катода;
- максимальная электрическая мощность разряда и максимальная мощность, снимаемая с катода.

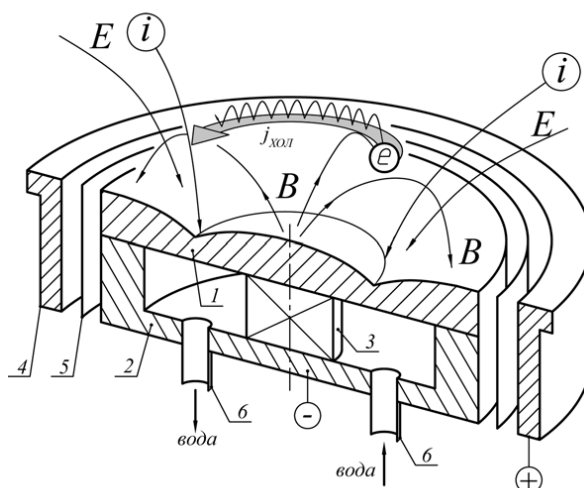


Рисунок 1.2 – Схема магнетронной распылительной системы и движение заряженных частиц в разрядном промежутке: 1-катод-мишень, 2- магнитнопровод, 3-магнит, 4-анод, 5-электростатический экран, 6-штуцер подачи воды

Магнетронные распылительные системы могут питаться как постоянным, так и переменным током различной частоты и формы. Напряжения разряда лежат в диапазоне 300-800 В.

В случае переменного тока частота питающего напряжения лежит в диапазоне от 2 кГц до 30 МГц. Наиболее часто применяются магнетронные распылительные системы постоянного тока. При частотах от 2 кГц до 100

кГц работают импульсные магнетроны [4]. Их работа похожа на работу магнетронов постоянного тока. В настоящее время импульсные магнетроны начинают вытеснять магнетроны постоянного тока при реактивных процессах [5]. При частотах порядка нескольких МГц работают высокочастотные магнетроны. Такие устройства применяются для распыления диэлектрических материалов. В высокочастотных магнетронных распылительных системах применяется ёмкостной высокочастотный разряд [6].

Разряд в МРС горит по всему катоду, но плотность тока на катоде распределяется неравномерно (рис.1.3). Поэтому следует различать среднюю плотность тока и максимальную плотность тока. Средняя плотность тока j_{cp} равна току разряда J_p , поделенному на площадь катода S_k :

$$j_{cp} = \frac{J_p}{S_k} \quad (1)$$

Средние плотности тока на катоде равны $J_{cp}=150-1000 \text{ А/м}^2$. Максимальная плотность тока J_{max} приходится на зону максимальной выработки катода. Величина максимальной плотности тока превышает среднюю плотность тока в 8-12 раз. Соответственно, плотность теплового потока q_T , приходящая на катод из разряда, распределена также неравномерно. Максимальная плотность теплового потока q_{Tmax} превышает среднюю плотность теплового потока q_T потока в 8-12 раз. Это следует учитывать при расчете охлаждения катода.

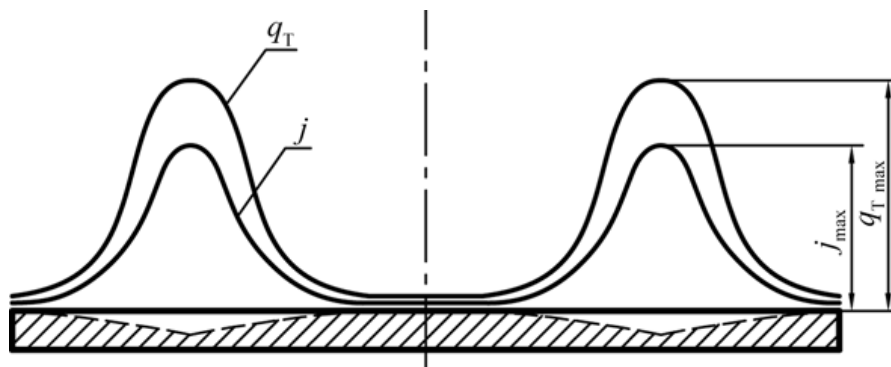


Рисунок 1.3 – Распределение плотности тока j и теплового потока q_T на поверхности катода

Определяющее влияние на разряд оказывают величина и форма магнитного поля над поверхностью катода, давление и вид рабочего газа, размер и форма катода, материал катода.

Магнетроны работают при давлении рабочего газа (как правило, аргона) 0,03-0,5 Па. Если давление выше указанного диапазона, разряд горит, но эффективность магнетрона снижается. Расстояния от катода до подложки обычно более 0,1 м. При давлениях выше 0,5 Па длина свободного пробега менее 0,02 м. Это приводит к снижению потока распыленного материала за счет столкновений распыленных атомов с атомами аргона. Поэтому желательно обеспечить работу магнетронной распылительной системы при более низких давлениях. Разряд в МРС можно зажечь при давлениях ниже 0,03 Па, причем нижняя граница допустимого давления сильно зависит от конструктивных особенностей МРС и конфигурации магнитного поля.

Известно, что в МРС с меньшими линейными размерами катода труднее зажечь разряд, они требуют больших магнитных полей и более высоких давлений рабочего газа. При больших линейных размерах катода разряд зажигается при более низких давлениях рабочего газа.

Наиболее важным проектным параметром магнетронной распылительной системы является максимальная величина составляющей индукции магнитного поля B_{max} , параллельной поверхности катода. Наибольшая величина B_{max} достигается на поверхности катода, под аркой из силовых линий магнитного поля. Там же достигается наибольшая плотность тока и происходит максимальная выработка катода. Величина B_{max} лежит в диапазоне 0,03-0,12 Тл.

Можно выделить два типа конфигурации магнитного поля над поверхностью катода или два типа магнитной системы, создающих такие конфигурации. Это сбалансированная магнитная система и несбалансированная магнитная система. В сбалансированной магнитной системе магнитный поток, проходящий через внутренний полюс магнитной

системы $\Phi_{внутр}$ равен магнитному потоку, проходящему через внешний полюс $\Phi_{внеш}$. В несбалансированной магнитной системе магнитный поток, проходящий через внутренний полюс магнитной системы $\Phi_{внутр}$, меньше магнитного потока, проходящего через внешний полюс $\Phi_{внеш}$.

Вольтамперная характеристика разряда сильно зависит от величины магнитного поля и давления рабочего газа [7,8]. Рост индукции магнитного поля приводит к возрастанию тока разряда при неизменных значениях напряжения и давления. Рост давления рабочего газа вызывает возрастание тока при постоянных величинах напряжения и индукции поля B на поверхности катода (см. рис.1.4).

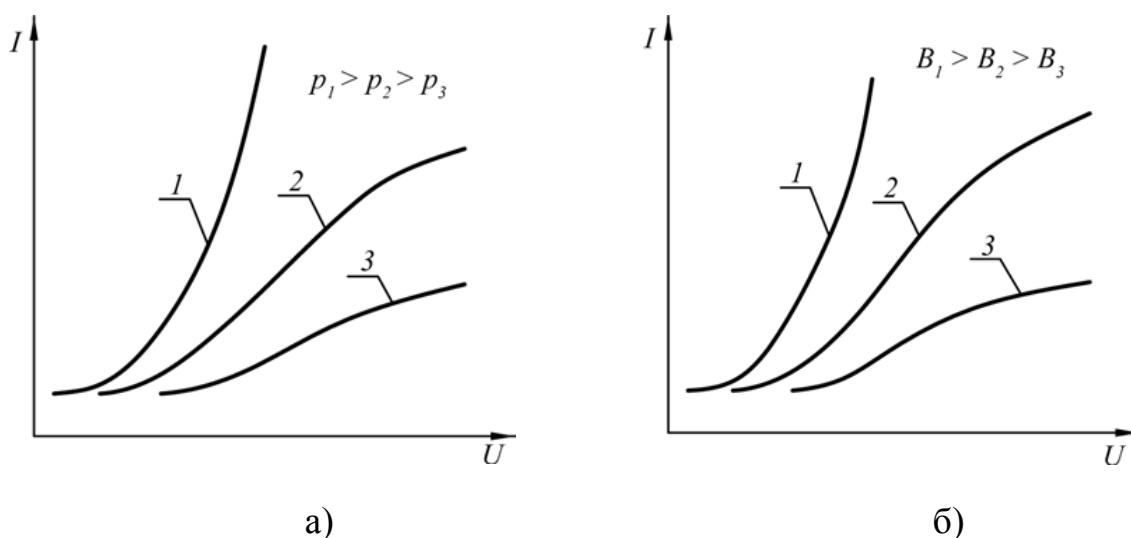


Рисунок 1.4 – Влияние давления рабочего газа p (а) и индукции магнитного поля B (б) на вольтамперную характеристику разряда в магнетронной распылительной системе

Скорость роста покрытия, наносимого МРС, определяется скоростью распыления катода, расстоянием от катода до подложки H и давлением рабочего газа (длиной свободного пробега распыленных атомов в рабочем газе λ). Причем, соотношение между расстоянием H и длиной свободного пробега λ определяет, насколько будет ослаблен поток распыленного материала. Если длина свободного пробега превышает расстояние до подложки, то поток материала, приходящий к подложке, значительно ослабляется. Поток распыленного материала определяется скоростью распыления катода dM/dt и зависит от коэффициента распыления S и тока

разряда J_p . Коэффициент распыления S показывает, какое количество атомов выбивает из мишени (катода) один падающий ион. Коэффициент распыления зависит от энергии падающих ионов. В типичном для МРС диапазоне разрядных напряжений коэффициент распыления монотонно возрастает и лежит в диапазоне $S=0,5-2,0$ в зависимости от материала катода и напряжения разряда.

Энергия ионов, бомбардирующих катод равна $0,8...0,9$ от напряжения разряда[9]. Как будет показано ниже, на распыление тратится малая часть этой энергии (примерно 10-15 эВ), а основная часть энергии ионов рассеивается в кристаллической решетке катода и идет на его нагрев. Таким образом, в катоде выделяется 80-90% электрической мощности разряда. Остальная мощность распределяется между анодом и подложками, на которые осаждается распыленный материал.

Важным параметром, определяющим длительность непрерывной работы магнетрона и его экономичность, является коэффициент использования материала катода K_u . Коэффициент использования материала катода показывает, какая часть массы катода может быть распылена при полной выработке катода. Полная выработка катода наступает при достижении минимальной допустимой толщины катода в зоне максимальной выработки.

$$K_u = \frac{m_0 - m_k}{m_0} \quad (2)$$

где: m_0 - начальная масса катода; m_k - конечная масса катода при минимальной допустимой толщине в зоне максимальной выработки.

Типичные значения коэффициента использования материала катода лежат в диапазоне $K_u=0,25-0,35$. В некоторых МРС коэффициента использования материала катода может достигать значений $K_u=0,65-0,85$.

Электрическая мощность разряда определяется произведением напряжения разряда на ток разряда. Максимальная допустимая

электрическая мощность разряда определяется средней плотностью мощности q_{cp} , снимаемой с катода и площадью катода A .

$$W = U_p J_p = \frac{1}{(0.8...0.9)} \frac{q_{cp}}{A} \quad (3)$$

При прямом водяном охлаждении твердого катода удается обеспечить среднюю плотность мощности $q_{cp} = 40-60 \text{ Вт/см}^2$.

Классификация схем МРС может быть проведена по виду питающего напряжения и тока разряда, форме катода-мишени, типу магнитной системы, фазовому состоянию катода.

Основным элементом МРС является распыляемый катод-мишень. Можно выделить три наиболее применяемые типа магнетронов различающихся по форме катода:

- плоские МРС с дисковым катодом или протяженным катодом (планарные МРС) (рис.1.5 а);
- цилиндрические МРС (рис. 1.5 б);
- МРС с конической мишенью (рис. 1.5 в).

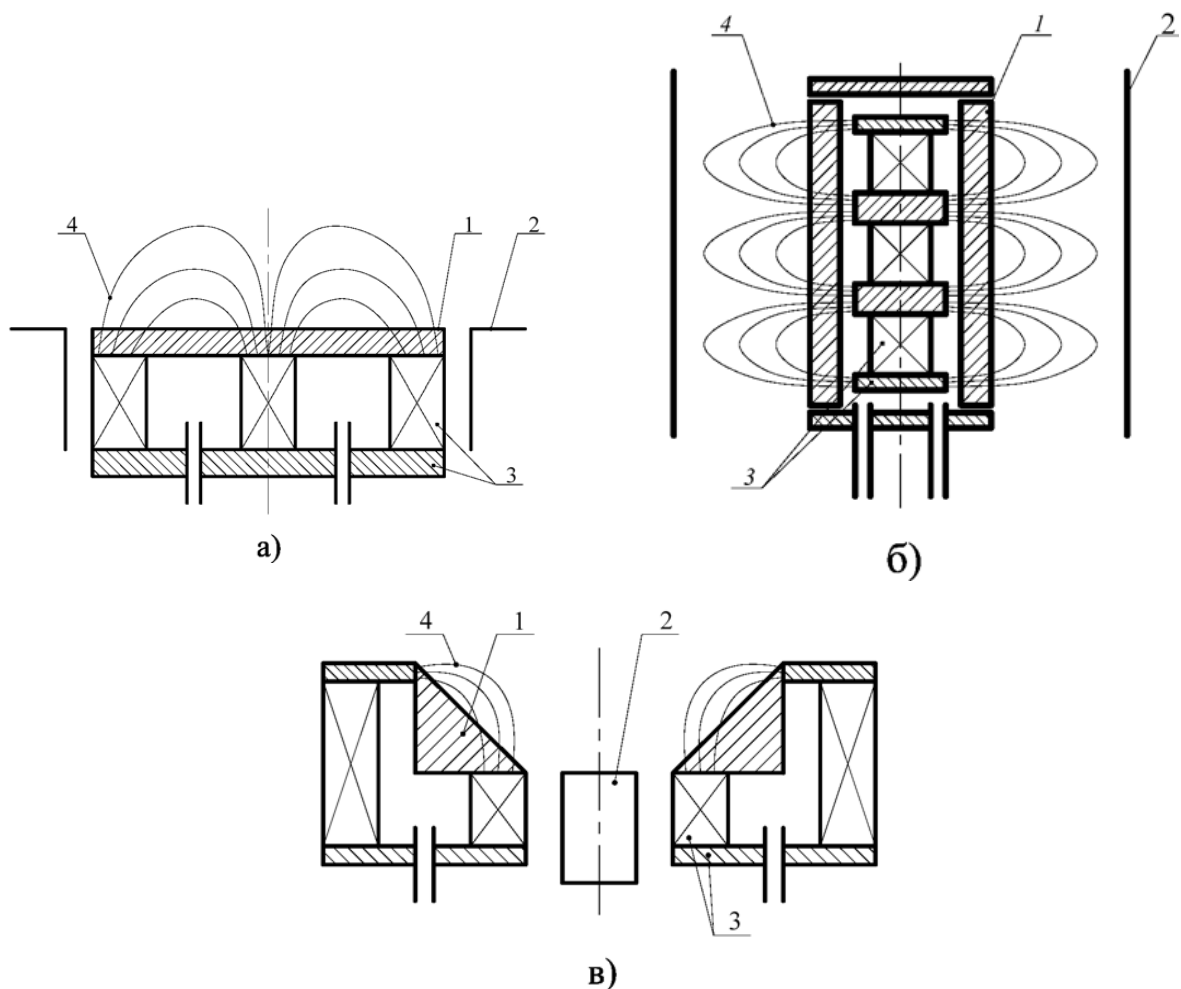


Рисунок 1.5 – Основные конструктивные схемы МРС: а) плоская (планарная) МРС, б) цилиндрическая МРС, в) МРС с конической мишенью. 1 – катод-мишень; 2 – анод; 3 – магнитная система; 4 – силовые линии магнитного поля

Самыми распространенными являются МРС с плоской мишенью. Магнетрон с дисковым катодом может использоваться в небольших установках для нанесения упрочняющих покрытий, проводящих дорожек в микросхемах, отражающих и интерференционных покрытий на небольшие оптические детали.

Плоские МРС с протяженным катодом применяются в установках для нанесения покрытий на листовые материалы больших размеров (до 3200x6400 мм) или рулонные материалы. Например, архитектурное стекло, листовой металл, лавсановая пленка и т.п. В МРС с плоским катодом коэффициент использования материала имеет относительно низкие величины 20 - 30 %.

Цилиндрические МРС используются тогда, когда необходимо обеспечить максимальную загрузку камеры обрабатываемыми изделиями. При этом обеспечивается максимальная площадь обрабатываемой поверхности, высокая скорость напыления покрытия и хорошая равномерность по толщине [7]. Магнитная система в таких магнетронах состоит из нескольких цилиндрических магнитов, разделенных вставками из ферромагнитного материала (см. рис.1.5 б). Разряд горит в виде нескольких колец расположенных внутри арок магнитного поля. В цилиндрических МРС коэффициент использования материала катода достигает величины 35-45%.

Стремление повысить коэффициент использования материала привело к созданию цилиндрических магнетронов с подвижной относительно катода магнитной системой. Магнитная система в этих МРС похожа на магнитную систему плоских магнетронов с протяженным катодом (см. рис.1.6а). Разряд горит в форме беговой дорожки, а поверхность катода все время перемещается относительно разряда вслед за магнитной системой. При небольших диаметрах катода магнитная система может иметь крестообразный вид с четырьмя магнитными полюсами (см. рис.1.6б). Разряд горит в форме "бейсбол", а магнитная система перемещается относительно катода электроприводом. Разряд перемещается вслед за магнитной системой по поверхности катода. Коэффициент использования материала в этих МРС достигает 90%.

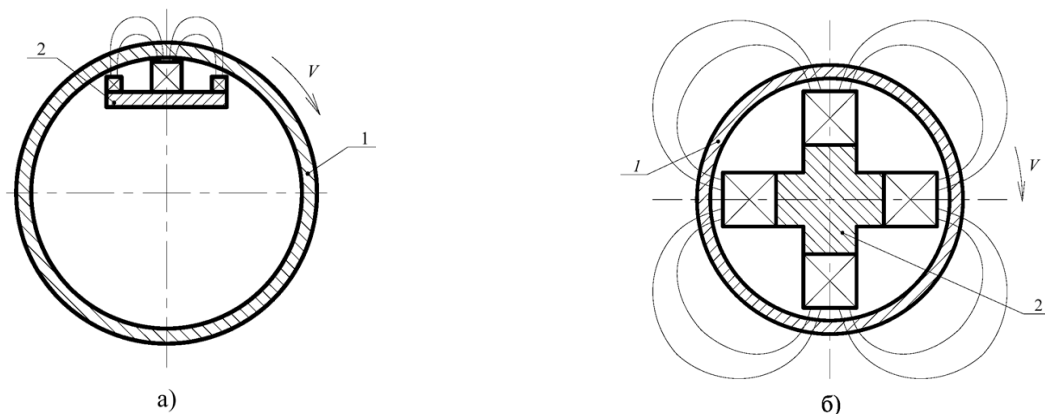


Рисунок 1.6 – Магнетронная распылительная система с цилиндрическим катодом и перемещаемой относительно катода магнитной системой: а) разряд в виде беговой дорожки; б) разряд в форме "бейсбол"; 1 –катод; 2 – магнитная система

Магнитная система магнетронной распылительной системы предназначена для создания арочного магнитного поля, служащего для удержания плазмы около катода. Наиболее раннее упоминание об арочном магнитном поле, используемом в магнетронных распылительных системах, встречается в работе И.Г. Кесаева и В.В. Пашковой [10].

Как говорилось ранее, выделяют два типа конфигурации магнитного поля над поверхностью катода или два типа магнитной системы, создающих такие конфигурации. Это сбалансированная магнитная система и несбалансированная магнитная система.

Магнитная система магнетронных распылительных систем может быть собрана как на постоянных магнитах, так и электромагнитах. Любая конфигурация магнитного поля, полученная на постоянных магнитах, может быть получена на электромагнитах. На рисунке 1.7 показаны магнитные системы МРС с плоским катодом, выполненные на постоянных магнитах и эквивалентные им по конфигурации магнитного поля магнитные системы, выполненные на электромагнитах. На рис. 1.7а, 1.7в показаны сбалансированные магнитные системы. На рис.1.7б, 1.7г показаны несбалансированные магнитные системы.

Для несбалансированной магнитной системы характерна следующая конфигурация магнитного поля. На оси магнитной системы существует точка O (рис. 1.8), в которой величина магнитного поля равна нулю. Через точку O и симметрично расположенные в плоскости катода точки A и B можно провести линию которая разделит магнитные потоки выходящие из внешнего полюса магнитной системы. При этом весь магнитный поток, находящийся внутри этой линии, проходит через центральный полюс магнитной системы и равен $\Phi_{внутр}$. Магнитный поток, проходящий снаружи линии AOB , проходит через наружный полюс магнитной системы и замыкается в виде потоков рассеяния с обратной стороны магнитопровода $\Phi_{рас}$. Магнитный поток,

проходящий через внешний полюс $\Phi_{внеш}$ равен сумме потока через внутренний полюс $\Phi_{внутр}$ и потоку рассеяния $\Phi_{рас}$:

$$\Phi_{внеш} = \Phi_{внутр} + \Phi_{рас} > \Phi_{внутр} \quad (4)$$

Положение точек A , B и O зависит только от соотношения числа ампервитков в основной K_0 и компенсационной K катушках или от соотношения намагничивающих сил внешних и внутренних магнитов.

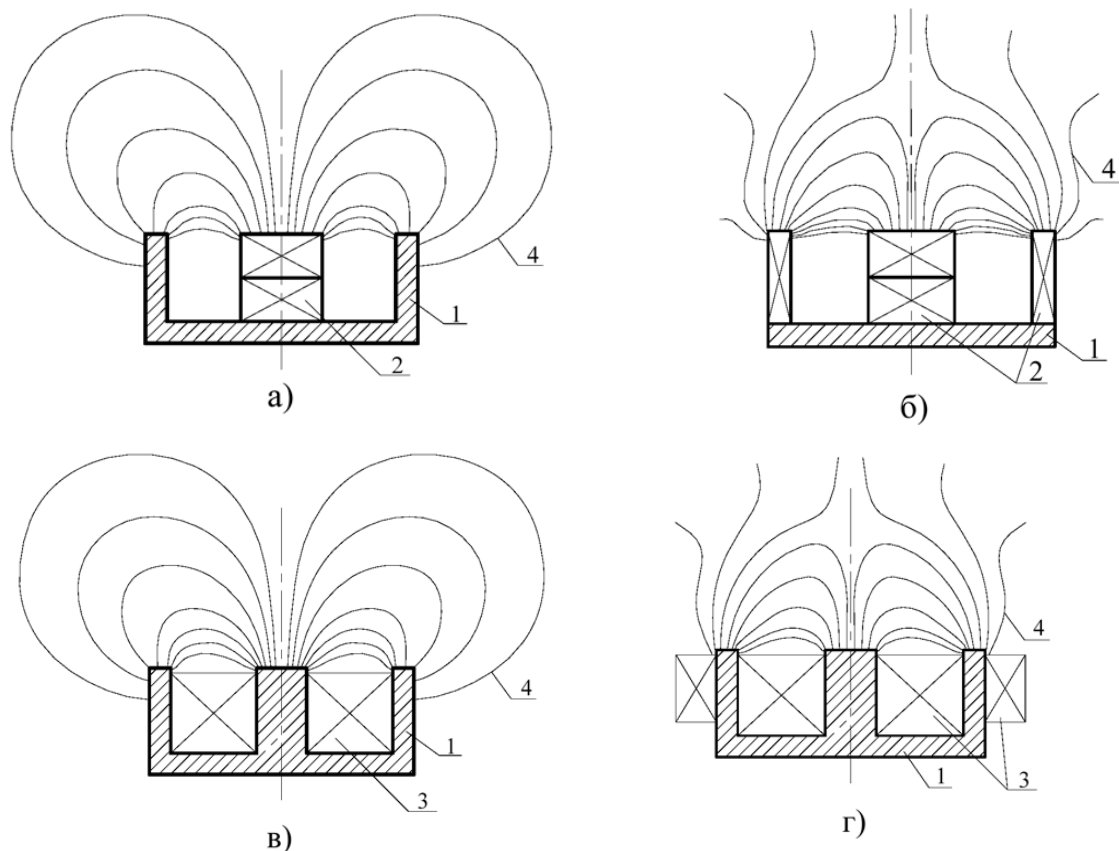


Рисунок 1.7 – Магнитные системы МРС с плоским катодом. Магнитные системы на постоянных магнитах (а), (б). Магнитные системы на электромагнитах (в), (г): 1- магнитопровод; 2- постоянный магнит; 3-электромагнитная катушка; 4 – магнитные силовые линии

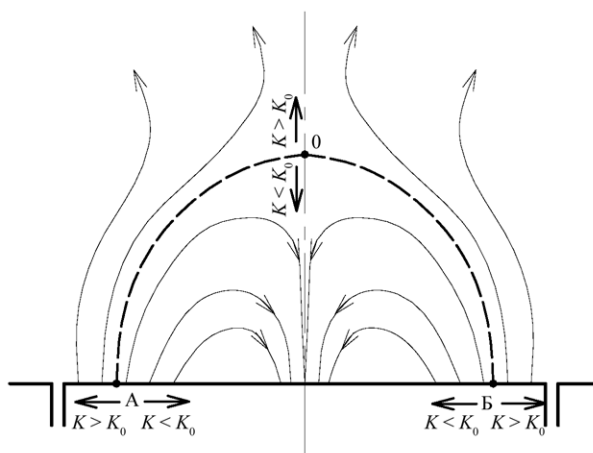


Рисунок 1.8 – Схема изменения конфигурации магнитного поля в магнетронной распылительной системе с "несбалансированной" магнитной системой при изменении соотношения числа ампервитков в основной и компенсационной катушке K . Конфигурация магнитного поля дана для параметра K_0 . Стрелками показано направление смещения точек A , O , B при изменении параметра K

О преимуществах МРС было сказано выше. К их недостаткам, помимо невысокой скорости осаждения плёнок, можно отнести:

- нестабильность реактивных процессов при нанесении оксидов нитридов и карбидов металлов;
- низкий коэффициент использования материала катода;
- относительно высокая электроёмкость процесса (500 эВ на один распыленный атом против 50 эВ в вакуумно-дуговом испарении).

1.3 Особенности магнетронного распыления металлических мишеней, испытывающих испарение или сублимацию

Для одновременного увеличения производительности МРС и повышения эффективности её работы можно использовать дополнительный механизм эрозии поверхности мишени за счёт испарения (сублимации).

Магнетронные распылительные системы (МРС) с испаряющимися (сублимирующимися) мишенями могут быть эффективным инструментом для высокоскоростного осаждения покрытий. За счёт того, что дополнительно к потоку распылённых атомов на поверхности мишени появляется поток испарённых частиц, скорость осаждения покрытий может увеличиться на один-два порядка [11-12].

Физически процесс испарения твёрдого тела связан с преодолением отдельными атомами или молекулами потенциального барьера на границе раздела фаз «твёрдое тело – газ». Поток испарившихся частиц в вакууме образуется в случае, когда давление насыщенного пара при заданной температуре испаряемого материала превышает давление остаточных газов в камере. Тогда возникает поток пара, направленный от испарителя к подложке.

Осаждение плёнок с использованием испарения мишеней производят с помощью мощных импульсных пучков заряженных частиц. Многочисленные исследования [13-14] показывают, что они тоже могут эффективно использоваться для получения тонкоплёночных покрытий. Здесь принципиальное преимущество их заключается в том, что мишень под действием пучка не только распыляется. Она подвержена быстрому нагреванию, которое сопровождается её плавлением и (в том числе благодаря вакууму) интенсивным испарением. Вовлечение испарённых атомов и молекул в процесс формирования плёнки в принципе позволяет на порядки увеличить поток частиц, движущихся от мишени к подложке. Соответственно заметно возрастает скорость роста покрытия.

Энергия, переносимая пучком, поглощается в поверхностном слое, толщина которого определяет пробегом ионов и теплопроводностью среды. Как правило, для технологических мощных импульсных пучков наносекундной длительности эта величина составляет ~ 1 мкм [15]. Температуру поверхностного слоя можно повышать увеличением плотности тока вплоть до температуры кипения с образованием паровой фазы на облучаемой поверхности.

Одним из эффектов, сопровождающих взаимодействие мощных импульсных радиационных потоков энергии с твёрдыми телами, является абляция (выброс) материала, возникающая из-за резкого нагрева вещества в области поглощения энергии пучка и его перехода в пароплазменное состояние. Она наблюдается на пучках нано- и микросекундной

длительности при интенсивностях облучения и флюенсах, превышающих некоторые пороговые значения. Воздействие мощного ионного пучка наносекундной длительности с плотностью мощности 10^7 - 10^8 Вт/см² на твердотельную мишень сопровождается образованием высокоплотной паровой фазы, которая может быть использована для высокоскоростного осаждения тонких плёнок.

Метод осаждения покрытий мощным импульсным ионным пучком представлен двумя последовательными стадиями: (1) испарением материала с поверхности в виде расширяющегося плотного пароплазменного облака, взаимодействующего с пучком; (2) адиабатическим расширением его в вакууме и конденсация на подложке в виде тонкой плёнки.

Характер воздействия электронных пучков на материалы отличается от воздействия на твёрдые тела потоков ионов. Так как в данном случае пробег электронов в веществе значительно больше глубины проникновения ионов. Воздействие характеризуется количеством теплоты, переданной облучаемому материалу, а также скоростью нагрева и охлаждения.

Независимо от способа подвода энергии к мишени испарение вещества происходит преимущественно в направлении, близком к нормали относительно испаряемой поверхности. В процессе движения атомы (молекулы) пара могут взаимодействовать с газами остаточной атмосферы камеры. Это вызывает рассеяние потока осаждаемых частиц и загрязнение плёнки. Поэтому процесс осаждения покрытия желательно проводить в высоком вакууме (10^{-4} Па и ниже).

Для создания покрытия значительная часть частиц должна адсорбироваться на подложке или вследствие химической реакции образовать новое химическое соединение. Для получения требуемых структуры и состава плёнки на данном этапе необходимо принимать во внимание целый ряд параметров, таких как материал и структуру подложки, её температуру, состав и давление пара, интенсивность его поступления. При этом одной из основных характеристик получаемых плёнок является адгезия.

Предполагается, что она во многом зависит от энергии частицы, падающей на подложку: чем выше энергия, тем лучше адгезия. Энергия испарённых атомов определяется температурой испарения и составляет 0,1- 0,3 эВ [16], поэтому покрытия, полученные с помощью термического испарения, имеют низкую адгезию.

Принципы создания эрозионных потоков на поверхности мишеней при работе МРС имеют сходство с процессами осаждения плёнок в случае с мощными импульсными ионными пучками. Но, в отличие от мощного импульсного ионного облучения, здесь процессы происходят гораздо более медленно. Вещество мишени, как правило, должно расплавиться, и из расплава испаряться. Для этого нужен тигель, в который помещается вещество мишени. При этом нужна его теплоизоляция от охлаждаемых элементов катодного узла (рис. 1.9). В этом катодном узле мишень помещается в тугоплавкий тигель и через графитовые прокладки устанавливается на корпусе магнетрона, который интенсивно охлаждается водой.

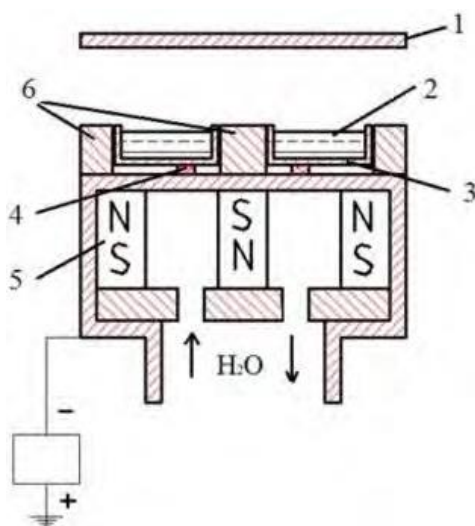


Рисунок 1.9 – МРС с жидкофазной мишенью [17]: 1 – подложка, 2 – мишень, 3 – тигель, 4 – графитовые прокладки, 5 – магниты, 6 – полюсные наконечники

В качестве материала тигля обычно используют тугоплавкие металлы (молибден, вольфрам), графит и проводящую керамику [17]. Здесь можно добиться значительного разогрева и весьма высокой скорости осаждения покрытий.

Процессу распыления жидкой мишени присущи существенные недостатки [17].

1. При отсутствии смачиваемости между материалом мишени и тигля, жидкий металл может выплёскиваться из тигля, а также растворять его. Материал тигля должен иметь минимальную пористость, она приводит к снижению эффективной скорости откачки рабочего объёма. Поэтому только ограниченный набор материалов можно использовать в качестве тиглей.

2. При испарении жидкой мишени возможно наличие кластеров атомов и капель в эрозионном потоке вещества, поступающего на подложку.

3. При разогреве мишени до температуры фазового перехода и выше заметным становится поток теплового излучения с её поверхности.

Однако, если вещество мишени имеет высокие скорости сублимации (хром, титан, магний, цинк и др.), то можно не доводить вещество мишени до температуры плавления, а использовать так называемую «горячую» твердотельную мишень. Ряд проблем жидкофазного магнетрона при этом может исчезнуть.

Одно из преимуществ магнетронов с «горячей» мишенью – отсутствие капель и кластеров атомов в эрозионном потоке.

В статьях [18,19] было показано, что при увеличении температуры мишени напряжение разряда, необходимое для его поддержания, снижается. Это было обнаружено как для случая стабилизации тока разряда, так и его мощности. Данный эффект обусловлен тем, что при ионной бомбардировке «горячей» мишени повышается интенсивность эмиссии с её поверхности (термоэлектронная эмиссия, сублимация и пр.) [20], которые способствуют усилению ионизации атомов в разрядном промежутке. Поэтому требуется меньшее напряжение для поддержания заданной мощности или тока разряда.

У МРС с горячей металлической мишенью интенсивность эмиссионных процессов с её поверхности выше. Данная особенность явно проявляется в мультикатодных системах [19]. В этом случае существенно повышается плотность ионного тока на подложку. Этот приём можно

использовать как инструмент управления свойствами получаемых покрытий. На примере МРС с Ti мишенью было показано, что формируются более плотные и однородные по структуре плёнки и выявлено повышение их адгезии к подложке.

1.4 Режим самораспыления

Процесс распыления на парах вещества мишени в отсутствие инертного газа называется самораспылением. В этом случае распыление мишени производится в результате бомбардировки её поверхности ионами элементов, из которых она состоит. Ионизация распыленного материала и устранение инертного газа сильно влияет на механизм роста пленки и повышает химическую реактивность при образовании сплавов и соединений [21]. Это открывает новые возможности для подготовки новых материалов и разработки новых технологий, например, осаждения тонких пленок на дно глубоких отверстий для субмикронных применений с использованием процесса самораспыления.

Привлекательность режима самораспыления для создания потока частиц, формирующих покрытие, обусловлена тем, что в этом случае в вакуумную камеру не нужно подавать рабочий газ, который при работе МРС в стандартных режимах служит для поддержания магнетронного разряда. Величина предельной концентрации атомов рабочего газа в вакуумной камере зависит от геометрии, формы и размеров мишеней, конфигурации магнитного поля, параметров источника питания. Ниже неё магнетрон работать не будет. Современные МРС обычно функционируют при давлении в камере от 0,1 до 1 Па и при напряжении от 300 до 500 В [22-23]. Как уже отмечалось выше, довольно высокая концентрация атомов рабочего газа в вакуумной камере, соответствующая этому давлению, приводит к проблеме, связанной с проникновением нежелательных атомов в структуру покрытий в процессе их формирования. Для ряда технологий, например, нанесения оптических и электропроводящих покрытий, эта проблема оказывается

ключевой, так как функциональные свойства покрытий, сформированных в таких условиях, могут не обладать требуемыми характеристиками [24-25]. Кроме этого, чем выше давление в камере, тем ниже скорость осаждения. Уменьшается также средняя энергия осаждаемых частиц, так как они рассеиваются на атомах рабочего газа из-за того, что длина их свободного пробега оказывается меньше расстояния между распыляемой мишенью и подложкой, являющейся обрабатываемой поверхностью [26]. Из-за этого структура покрытий становится менее плотной.

Существует проблема создания устойчивого самораспыления при работе МРС и понижении рабочего давления при осаждении покрытий. Сначала её пытались решить с помощью значительного повышения мощности магнетронов на постоянном токе для того, чтобы обеспечить более высокую скорость распыления атомов мишени и их концентрацию вблизи её поверхности, достаточную для поддержания разряда. Здесь столкнулись с проблемой нестабильности разряда из-за случайного формирования дуги [25]. Когда появились мощные импульсные магнетронные распылительные системы (HIPIMSS), выяснилось, что благодаря высокой импульсной мощности для этих устройств характерно появление самораспыления [27]. Причём, импульсный характер подачи мощности в электрическую цепь МРС защищает разряд от появления дуги. В плазме повышается плотность ионизированных состояний, что способствует развитию самораспыления [27]. Однако за счёт того, что плазма успевает рассеяться между импульсами тока, режим самораспыления при работе HIPIMSS оказался весьма неустойчивым.

В этой связи, идея использования МРС с испаряющимися мишенями для осаждения покрытий при общем пониженном давлении в вакуумной камере и без подачи рабочего газа представляется весьма перспективной. Дело в том, что в этом случае имеет место не только высокая интенсивность эмиссии атомов на поверхности мишени, но и высокая плотность потока

осаждаемых частиц, что может положительно повлиять на структуру и функциональные свойства формируемых покрытий [27].

1.5 Проблема неравномерности распыления сублимирующей мишени и предполагаемые способы её решения

Проблемы функционирования магнетронов, связанные с неравномерностью распыления мишеней, при появлении сублимации только усугубляются. В этом случае, по сравнению с ситуацией, где используются расплавляющиеся мишени, отсутствует механизм выравнивания поверхностного профиля. Поэтому рассмотрим более подробно способы «смягчения» этой проблемы, разработанные в настоящее время в исследовательских лабораториях.

Известно, что источник вышеуказанной проблемы обусловлен локализацией плазмы магнитным полем. Это вызывает эрозию катода в виде узкой замкнутой канавки. Причем концентрация плазмы максимальна в центральной части распыляемой канавки из-за фокусирующего действия магнитного поля, силовые линии которого имеют форму дуги. От размеров эрозионной канавки, определяемых магнитным полем, зависит коэффициент использования материала мишени (КИМ), представляющий собой часть объема мишени, распыленную за время, прошедшее до момента, когда глубина эрозионной канавки сравняется с толщиной мишени.

Известно, что в магнетронах с плоскими круглыми или прямоугольными мишенями КИМ очень низок и лежит в пределах 20–25 %. Однако существует ряд способов, позволяющих повысить эффективность использования материала мишени. К ним относятся:

- оптимизация конструкции магнитной системы магнетрона, заключающаяся в выборе размеров, формы, мощности и расположения магнитов;

- использование магнетронов с подвижными магнитными системами, перемещение которых подвергает распылению большую часть мишени;
- использование магнетронов с цилиндрическими мишенями, вращающимися вокруг неподвижной магнитной системы.

Использование первых двух способов позволяет увеличить коэффициент использования мишени до 40-60 %. Наиболее эффективным является третий способ, с использованием которого КИМ может достигать значения 80 %.

Обнаружено, что большое влияние на ширину зоны эрозии и работу магнетрона в целом играет форма магнитов. В работе [29] обычные магниты были заменены магнитами с усеченной формой, как показано на рис. 1.10. Такие усеченные магниты создают линии магнитного поля, охватывающие более протяженную часть мишени, что приводит к более широкой зоне эрозии. Использование усеченных магнитов в магнетроне с диаметром мишени 5 см, работающем на мощности 100 Вт при давлении аргона 5 мТорр, показало увеличение коэффициента использования мишени с 18 % до 35 %. Одновременно с этим было обнаружено увеличение скорости нанесения пленок меди с 0.8 нм/с до 1.1 нм/с, однородности толщины нанесенной пленки с $\pm 5\%$ до $\pm 3\%$, повышение величины магнитного поля на поверхности мишени с 400 до 800 Гс, а также снижение рабочего давления от 2 мТорр до 0.1 мТорр.

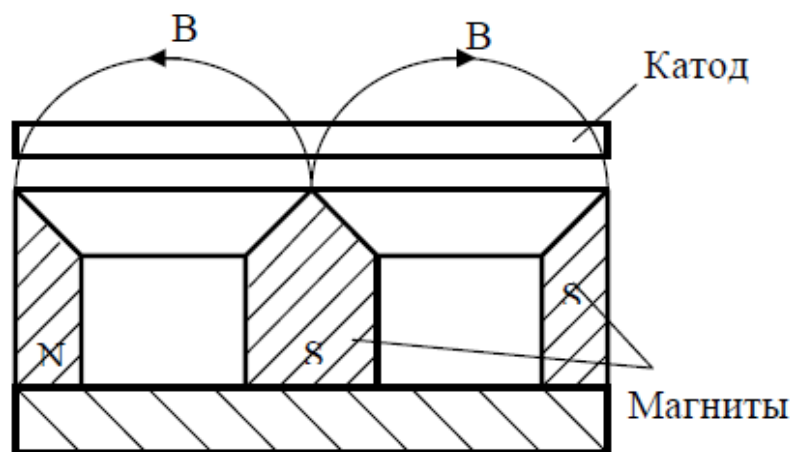


Рисунок 1.10 – Конструкция магнитной системы магнетрона с использованием усеченных магнитов [29]

Значительно повысить эффективность использования материала мишени позволяют механически перемещаемые магнитные системы. В магнетронах с плоскими круглыми мишенями широкое распространение получили магнитные системы в виде сердца, вращаемые вокруг оси мишени (рис. 1.11).

Вращение магнитной системы вызывает эрозию практически всей поверхности мишени. Было показано, что профиль эрозии мишени зависит даже от незначительных изменений формы сердцевидной магнитной системы [30].

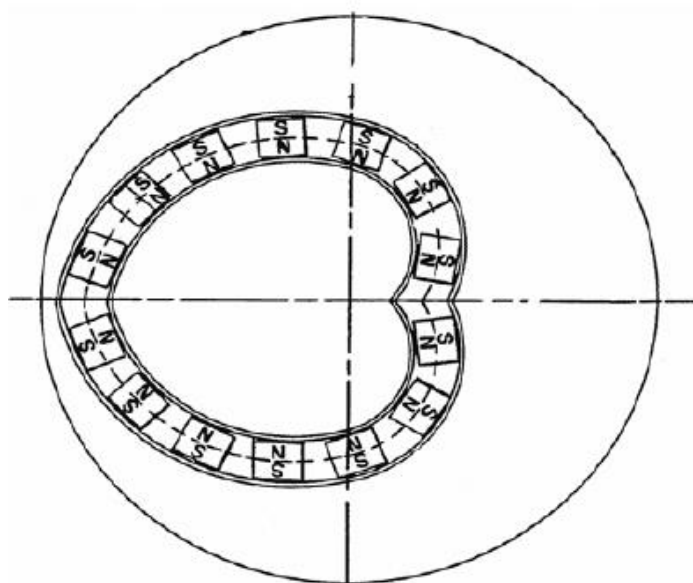


Рисунок 1.11 – Конструкция вращаемой магнитной системы круглого планарного магнетрона [30]

Как уже упоминалось выше, наибольший коэффициент использования мишени имеют магнетроны с цилиндрической мишенью, вращаемой вокруг неподвижной магнитной системы (рис. 1.12). Впервые конструкция такого магнетрона была предложена в 1982 году. В ней магнитная система создает на поверхности катода замкнутый контур силовых линий магнитного поля, также как и в планарных магнетронах. Вращающиеся магнетроны имеют более сложную конструкцию, чем планарные, но, как правило, это компенсируется такими его достоинствами как высокие коэффициент использования мишени и рабочая мощность. Хотя существуют случаи, в которых использование цилиндрических мишеней не является наилучшим вариантом. Выполнение мишеней в виде труб возможно не из всех материалов. Например, изготовить катоды из керамических материалов легче в плоской форме.

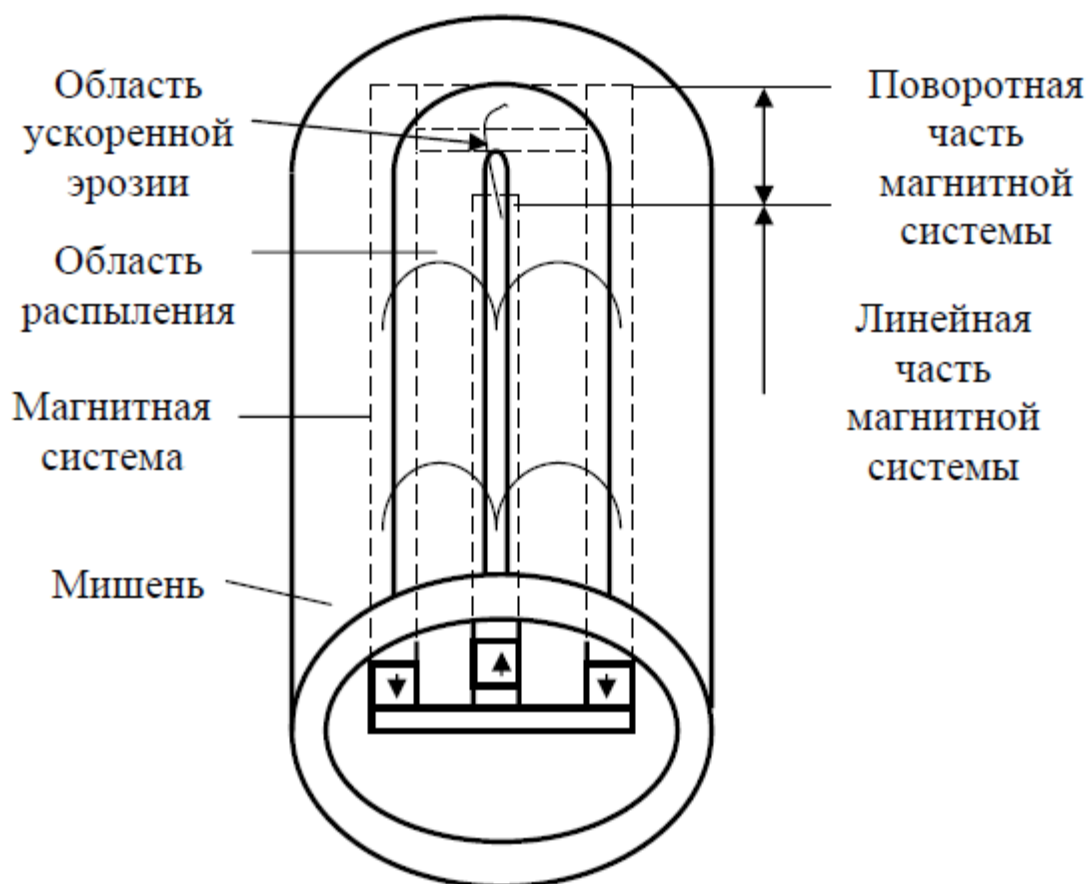


Рисунок 1.12 – Схема магнетронной распылительной системы с цилиндрическим катодом

Существует два недостатка, свойственных цилиндрическим магнетронам с вращающимся катодом из-за их геометрии. Ширину магнитной системы, как правило, приходится делать небольшой, что приводит к довольно резким поворотам совершающих дрейфовое движение электронов, на концах магнитной системы. В результате происходит увеличение потерь электронов на концах мишени.

Поэтому желательно располагать магниты как можно ближе к внутренней стороне мишени, для того чтобы иметь максимальное магнитное поле на ее поверхности. Другим недостатком вращающихся магнетронов является ускоренная эрозия мишени в местах, где магниты (и распыляемая канавка) совершают U-образный поворот (рис. 1.12). Верх этого поворота представляет собой часть распыляемой канавки, которая всегда остается в одном и том же продольном положении при вращении мишени. Это приводит к появлению на обоих концах мишени канавок, в которых скорость эрозии превышает среднюю по длине мишени.

В работе [31] предлагаются конструкции поворотной части магнитной системы вращающегося магнетрона, отличительной чертой которых является большой радиус поворота магнитов. Наиболее предпочтительной считается форма поворота в виде эллипса, изображенная на рис. 1.13,а. Существует множество комбинаций “r”, “p” и “s” при которых радиус поворотной части будет достаточно большим, для того чтобы свести до минимума потери электронов и разницу в эрозии поворотной и линейной частей распыляемой канавки.

Эта разница может быть снижена до менее чем 20 % при использовании конструкций поворотной части магнитной системы, изображенных на рис. 1.13,б и в. Недостатком этих конструкций является сложность изготовления. Однако она может быть частично упрощена заменой ряда магнитов полюсными наконечниками из магнитно-мягкого материала, которому легко придать любую криволинейную форму.

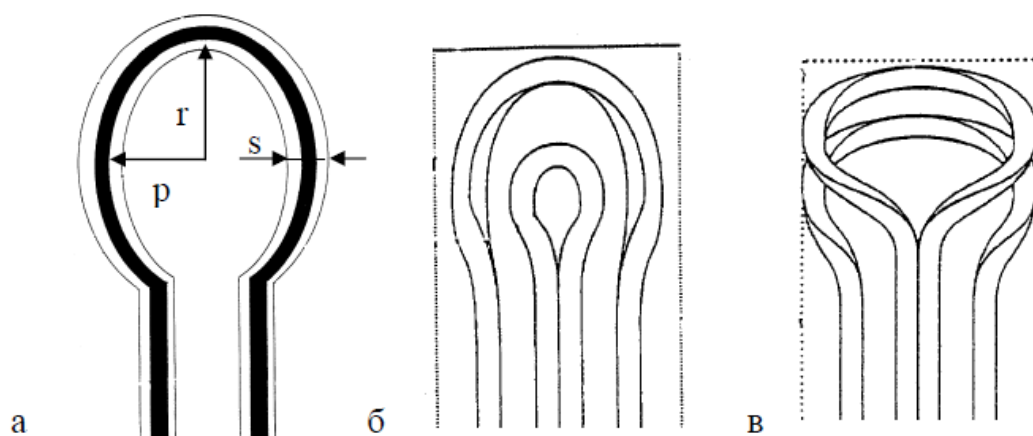


Рисунок 1.13 – Конструкции поворотной части магнитной системы с большим радиусом поворота [31]: а – идеализированная конструкция в форме эллипса, б и в – варианты конструкции

1.6 Постановка задач исследования

Ещё до конца не изучены все аспекты работы МРС с сублимирующей мишенью, поэтому необходимо выяснить, как различные факторы влияют на поддержание магнетронного разряда, функционирующего на парах вещества мишени, а также исследовать особенности осаждения покрытий в этих условиях. Основными факторами являются:

- работа МРС при сублимации;
- мощность разряда и вид источника питания;
- влияние конфигурации магнитного поля на процесс распыления и сублимации мишени;
- фактор самораспыления (наличие или отсутствие рабочего газа в камере);
- подача потенциала смещения на подложку, в том числе в условиях осаждения при полном самораспылении.

Влияние некоторых из них будем изучать с помощью следующих экспериментальных измерений:

- эволюции вольт-амперных характеристик разряда и давления в камере;
- тока смещения на подложке в условиях работы с аргоном и в режиме полного самораспыления.

Для изучения механизмов стабильного функционирования магнетрона с горячей хромовой мишенью и выявления роли сублимированных атомов в поддержании разряда, нужны расчёты тепловых и эрозионных процессов в мишени, а также пространственного распределения концентрации атомов хрома вблизи мишени.

Таким образом, основными задачами данной работы являются:

- исследовать эволюцию вольт-амперных характеристик и давления в вакуумной камере в присутствии аргона, а также в режиме самораспыления при разной мощности источника питания;
- изучить механизмы функционирования разряда при работе магнетрона с сублимирующей хромовой мишенью в режиме самораспыления;
- найти минимальную мощность, при которой магнетрон с горячей хромовой мишенью стабильно работает в режиме самораспыления;
- исследовать условия осаждения при подаче отрицательного смещения на подложку в случае магнетрона с горячей мишенью, функционирующего при подаче аргона и в режиме самораспыления;
- проанализировать функциональные характеристики хромовых покрытий (на примере антикоррозионных свойств), полученных при работе магнетрона с сублимирующей мишенью в присутствии аргона и в режиме самораспыления, а также с охлаждаемой мишенью.

Глава 2 Оборудование и методы исследования

2.1 Описание использованного оборудования для осаждения хромовых покрытий

В работе по осаждению хромовых покрытий при работе МРС с сублимирующей хромовой мишенью выполнялись на примере магнетрона планарного типа.

Пример схемы катодного узла магнетрона с ограниченным теплопроводным контактом горячей твердотельной мишени показан на рис. 2.1.

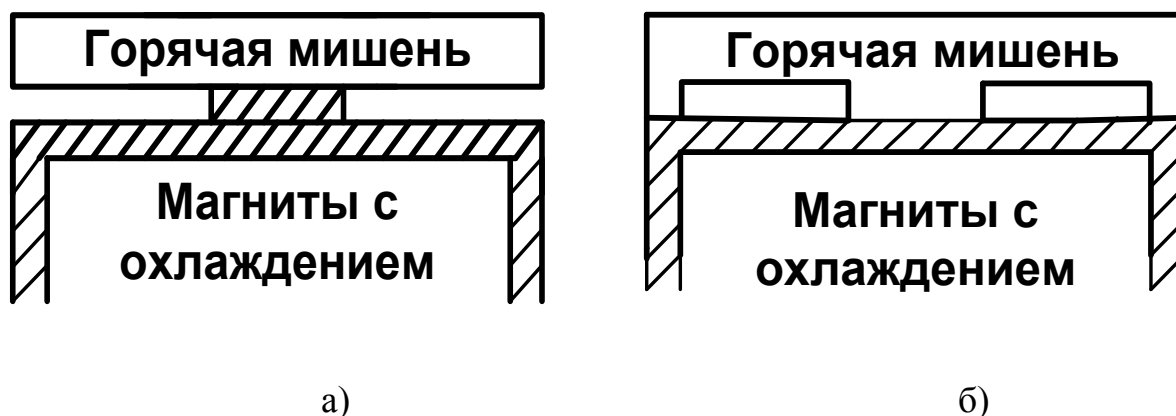


Рис. 2.1 – Схема организации теплопроводного контакта мишени с охлаждаемым корпусом магнетрона: (а) - пластинчатая мишень крепится к корпусу магнетрона через распорное кольцо (или диск) небольшого диаметра; (б) - на задней стороне мишени сделаны выемки, так что область её соприкосновения с корпусом магнетрона значительно сокращена

Геометрические параметры мишени в экспериментах и расчётах приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Геометрические параметры мишени

Вид мишени	Форма	Размеры
Теплоизолированная твердотельная хромовая мишень	Диск	$R_m=4,5$ см, $S_m=63,6$ см ² , $h_m=0,8$ см
S_m и h_m – площадь поверхности и высота мишени, R_m – радиус мишени, h_m и w_m – высота и ширина тигля, S_{m+m} – суммарная площадь поверхности мишени и стенок тигля		

Схематическое изображение катодного узла МРС, который использовался в исследованиях, приведен на рисунке 2.2.

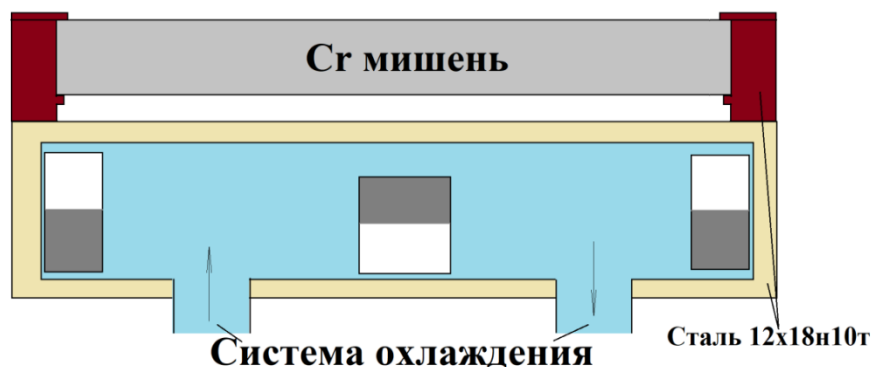


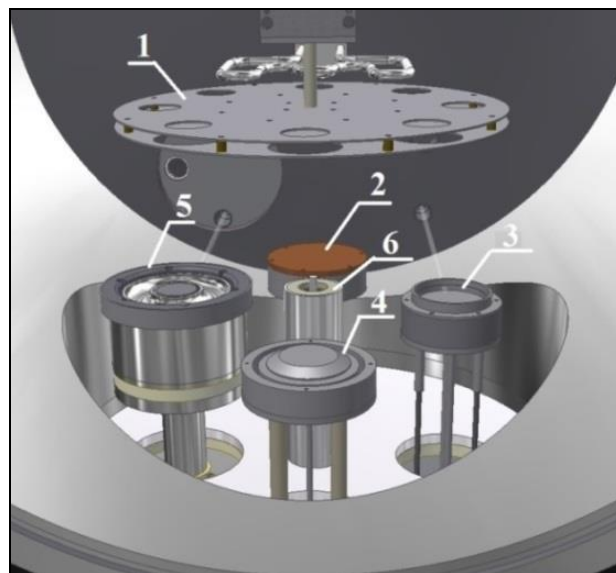
Рисунок 2.2 – Схематическое изображение катодного узла с мишенью, имеющей ограниченный теплопроводный контакт с охлаждаемым корпусом магнетрона

Вакуумная плазменная установка, в которую помещался магнетрон, создана и эксплуатируется в лаборатории плазменных технологий научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга ТПУ. Она предназначена для нанесения модифицирующих покрытий на поверхность твёрдых тел с использованием плазменных источников.

Установка представляет собой рабочую камеру, оснащённую различными конструкциями магнетронных распылительных систем и ионным источником с замкнутым дрейфом электронов. Внешний вид установки и расположение устройств в камере изображены на рис. 2.3.



а)



б)

Рисунок 2.3 – Внешний вид ионно-плазменной установки (а) и расположение элементов внутри вакуумной камеры (б): 1 – вращающийся стол для подложек; 2 – МРС с «горячей» мишенью; 3 – МРС с жидкофазной мишенью в виде диска; 4 – ионный источник с замкнутым дрейфом электронов; 5 – МРС с жидкофазной кольцевой мишенью; 6 – посадочное место для заслонки

Основные технические характеристики ионно-плазменной установки представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики установки

Параметр	Величина
Объем рабочей камеры, м ³	0,36
Предельной остаточное давление рабочей камеры, Па	$3 \cdot 10^{-4}$
Напряжение питания магнетронов, В	100 – 750
Максимальный ток магнетронного разряда, А	11
Ускоряющее напряжение ионного источника очистки, кВ	3
Ток ионного пучка, А	0,1 – 2
Число каналов подачи рабочего газа, шт	1
Напряжение питающей сети, 3 фазы, 50,60 Гц, В	380 ÷ 220
Максимальная потребляемая мощность установки, кВт	20
Расход охлаждающей воды 20°С, м ³ /час	0,5
Расход рабочего газа, л/час	1 – 3
Габаритные размеры, в плане:	

Параметр	Величина
Вакуумная камера (с опорным основанием), мм. Шкаф управления, мм	1650 x 800 600 x 800
Высота: Вакуумная камера, мм Шкаф управления, мм	2300 1600
Масса установки, кг	600
Установочная площадь с зоной обслуживания, м ²	15

Схематическое расположение элементов вакуумной камере для проведения экспериментов представлено на рисунке 2.4.

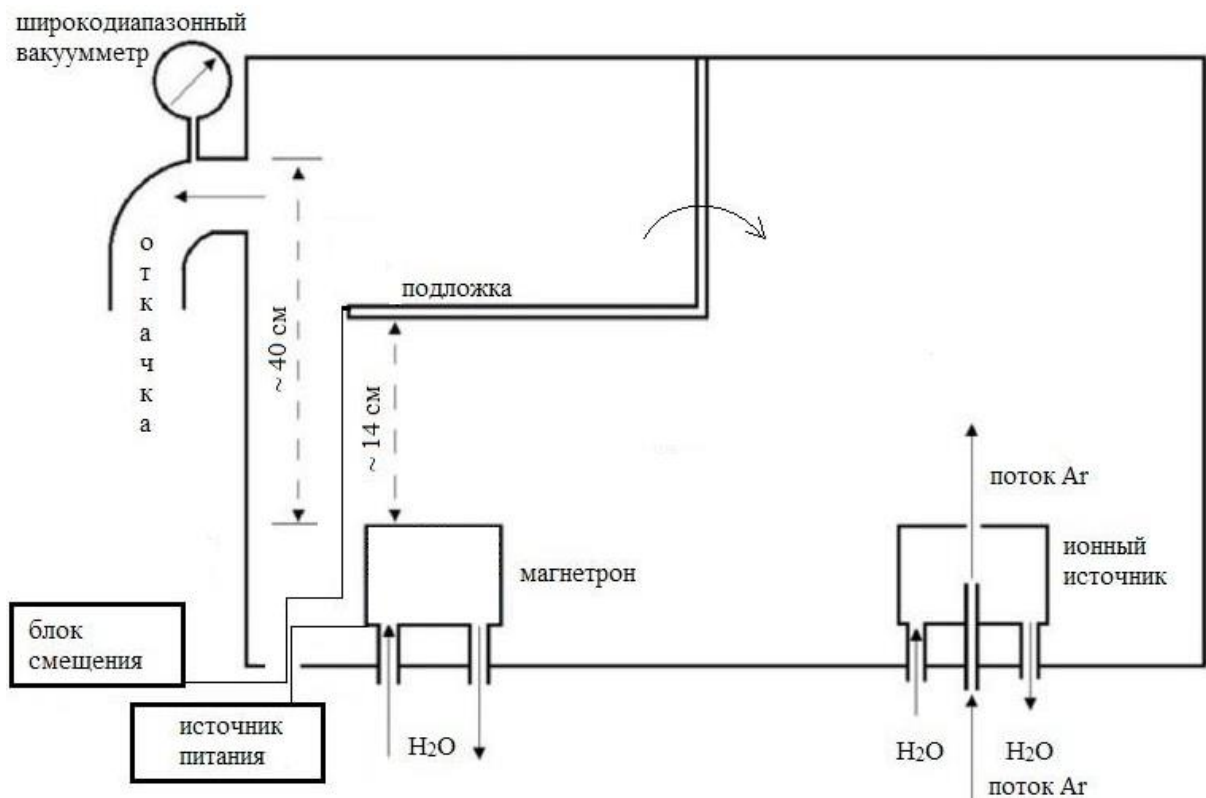


Рисунок 2.4 – Схематическое расположение элементов в вакуумной камере

Изучение основных механизмов работы МРС с горячей мишенью выполнялось в ряде экспериментов. Рассматривалось влияние различных факторов: мощности источника питания МРС, давления в камере, наличия или отключения рабочего газа, подачи отрицательного электрического потенциала на подложку.

Измерения эволюции тока и напряжения в цепи МРС проводились с помощью осциллографа Tektronix TDS 2022B. Давление в вакуумной камере определялось с помощью широкодиапазонного вакуумметра Hornet. Его ввод располагался на стыке трубопровода с вакуумной камерой, на расстоянии примерно 40 см от магнетрона (см. рис. 2.4).

Эксперименты проводились следующим образом. Сначала выполнялась откачка газа из рабочей камеры до остаточного давления в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ - $6 \cdot 10^{-3}$ Па. Затем напускался рабочий газ (аргон) до давления 0,2 Па, и между тиглем и анодом прикладывалось напряжение, соответствующее задаваемой мощности. При этом загорался разряд, локализованный у поверхности мишени магнитным полем. Материал мишени за счет интенсивной ионной бомбардировки постепенно нагревался, возникала сублимация при достаточной мощности магнетрона. Момент отключения рабочего газа определялся в процессе наблюдения за эволюцией тока разряда, который возрастал по мере разогрева мишени. Оно производилось на этапе выхода тока в стабильное состояние. Мощность МРС задавалась в диапазоне от 1800 до 2500 Вт.

В экспериментах использовался сильноточный источник питания, который относится к категории модулированных мощных импульсных источников, характеризующихся высокой импульсной мощностью, стабильностью работы и устойчивостью к дугообразованию. Частота комбинированного импульса, состоящего из двух модулированных пакетов, составляла 100 Гц, ток в сильноточном пакете достигал 30..40 А, импульсная мощность – 25..30 кВт, мощность, усреднённая по периоду – от 2 до 4 кВт. Осциллограммы тока и напряжения в течение периода сильноточного импульса представлены на рис. 2.5.

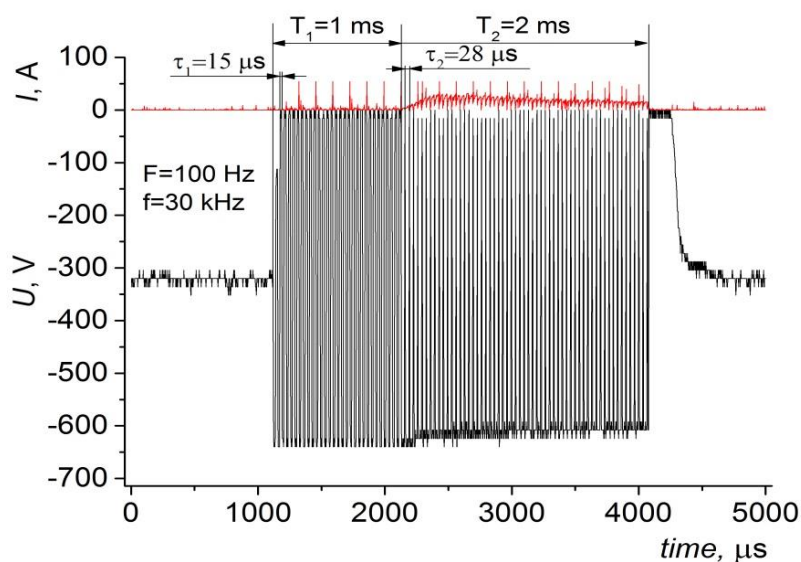


Рисунок 2.5 – Осциллограммы тока и напряжения сильноточного источника питания; импульсная мощность в пакете 2 – 25 кВт, мощность, усреднённая по периоду – 3кВт

Применение подобных источников питания магнетрона позволяет устранить проблему возникновения электрических пробоев и микродуг на поверхности мишени. Механизм устранения данной проблемы основан на исключении накапливания положительного электрического заряда вследствие того, что во время паузы распыления положительный заряд устраняется за счет притяжения электронов из плазмы. Процесс компенсации положительного заряда из плазмы составляет порядка 0,4-1 мкс.

В экспериментах с осаждением покрытий сначала производилась плазменная очистка поверхности подложек. Она состояла в распылении поверхности пучком ионов аргона с помощью ионного источника с замкнутым дрейфом электронов при следующих параметрах: давление в камере - 0,2 Па; напряжение разряда - 2500 В; ток разряда – 30...40 мА; время обработки - 20 минут.

Измерения тока смещения на подложке проводились для того, чтобы выяснить, возможно ли в режиме самораспыления, т.е. без присутствия атомов аргона в камере и при давлении ниже 0,1 Па, производить бомбардировку растущей плёнки высокоэнергетическими ионами и таким

образом управлять её структурой. Для подачи отрицательного потенциала смещения подложку использовался блок смещения серии APPL-SB. Измерения проводились как на этапе работы магнетрона с подачей рабочего газа, так и после его отключения.

2.2 Приборы и методы диагностики

2.2.1 Измерение толщины покрытий

Толщина покрытий определялась при помощи прибора Calotest CAT-S0000 (CSEM, Швейцария) (рис. 2.6). Благодаря нему можно измерять толщины плёнок в диапазоне от 0,1 до 50 мкм с точностью $\pm 3\%$.

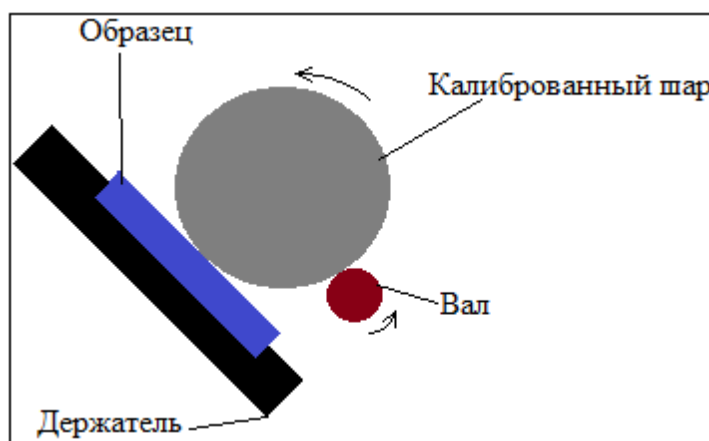


Рисунок 2.6 – Схема прибора для измерения толщины покрытий

Образец фиксируется в специальном держателе, после чего на него закрепляется калиброванный шар диаметром 1 дюйм. Вал находится в движении, заставляя шар двигаться в обратном направлении. При этом происходит регулировка скорости вращения вала (10-1000 об./мин) и длительность процесса. Нагрузка на шар и его положение относительно образца остаются постоянными. После того, как сформируется сферический шлиф на поверхности образца (рис. 2.7) с помощью оптического микроскопа происходит его анализ.

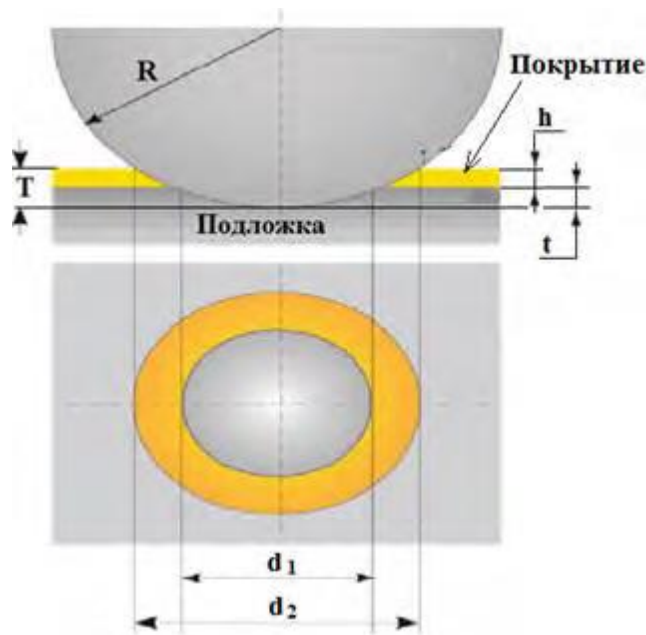


Рисунок 2.7 – Изображение сферического шлифа: R – радиус шара, T – глубина сферического кратера, t – глубина кратера в материале подложке, h – толщина покрытия

Толщина покрытия рассчитывается следующим образом:

$$h = T - t, \quad (2.1)$$

где T – глубина сферического кратера, t – глубина кратера в материале подложке, которые рассчитываются как:

$$T = R - \left(\frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - d_2^2}\right), \quad (2.2)$$

$$t = R - \left(\frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - d_1^2}\right), \quad (2.3)$$

Тогда уравнение (2.2) примет вид:

$$h = \frac{1}{2}\left(\sqrt{4R^2 - d_2^2} - \sqrt{4R^2 - d_1^2}\right), \quad (2.4)$$

Толщина покрытий измерялась так же с помощью сканирующего электронного микроскопа. Хромовые покрытия осаждались на подложки из кремния. Затем производился их разлом, и поперечный скол сканировался на микроскопе.

2.2.2 Исследование коррозионной стойкости покрытий

Для оценки коррозионной стойкости металлических покрытий используется метод поляризационной потенциодинамики. Он реализуется в 2 этапа. Изначально нужно вычислить потенциал свободной коррозии, т.е. коррозионный потенциал при отсутствии наложенного электрического тока к изучаемой металлической поверхности или от неё. Это происходит следующим образом. В электрохимическую ячейку демонтируют электрод сравнения и изучаемый образец. Электроды соединены между собой с помощью высокоомного вольтметра. Идет процесс электрохимической реакции. На поверхности электрода происходит анодная реакция, т.е. его окисление с выделением электронов. В электролите происходит катодная реакция с поглощением свободных электронов – реакция восстановления. При достижении равновесного состояния можно будет определить величину электрического потенциала свободной коррозии на образце относительно потенциала на контрольном электроде. Для того, чтобы изготовить электрод сравнения используют ограниченный набор материалов, потенциал свободной коррозии которых известен (водородный, каломельный и др.). В данной работе применялся хлорид-серебряный электрод.

На втором этапе измерения коррозионной стойкости применяют электрохимическую ячейку с тремя электродами (дополнительно используется окислительно-восстановительный электрод) и потенциостатом, с помощью которого возможно регулировать изменения значения потенциала с шагом $\sim 0,5$ мВ/с. Схема продемонстрирована на рис. 2.8. Окислительно-восстановительный электрод (противоэлектрод) изготавливается из инертного материала, он нужен для обмена электронами с изучаемым образцом.

При наполнении ячейки электролитом и подаче потенциала на изучаемый образец протекает электрохимическая реакция, где электроны с образца попадают на окислительно-восстановительный электрод. При

изменении значения потенциала фиксируется ток электронов, распределяющихся на электрод из платины. Здесь также нужно применять электрод сравнения, он используется для контроля значения потенциала. По итогам измерений строится зависимость «электрический потенциал – плотность тока коррозии», по виду которой выполняется исследование стойкости материала к коррозии. Плотность тока коррозии рассчитывается как отношение тока электронов к площади поверхности изучаемого образца.

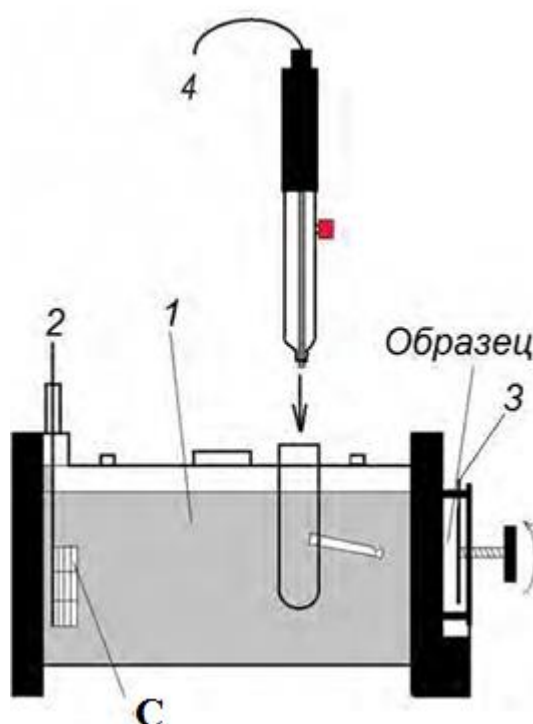


Рисунок 2.8 – Стенд для коррозионных испытаний: 1 – раствор электролита, 2 – окислительно-восстановительный электрод, 3 – прижимное устройство, 4 – электрод сравнения

В работе использовался коррозионный стенд, оснащенный тремя электродами и потенциостатом – гальваностатом Electrochemical Instruments P-45X (рис. 2.9). В качестве рабочего электрода выступал исследуемый образец, хлор-серебряный электрод как электрод сравнения, а в качестве противоэлектрода использовался специальный графитовый стержень. В качестве рабочего электролита был выбран раствор 3,5% NaCl.



Рисунок 2.9 – Потенциостат-гальваностат Electrochemical Instruments P-45X

2.3 Методики расчётов

Для выявления роли нагрева мишени и сублимации атомов с её поверхности в функционировании разряда и осаждении хромовых покрытий было выполнено численное моделирование. В основе численной модели – уравнение теплопроводности, учитывающее затраты тепла на фазовые превращения первого рода. Граничные условия задают поступление энергии в мишень из области горения плазмы, а также включают расход энергии на сублимацию, распыление и тепловое излучение.

2.3.1 Математическая модель тепловых и эрозионных процессов теплоизолированной горячей мишени

Процессы столкновительного распыления и сублимации приобретают разную природу и не проявляют видимого воздействия друг на друга. Поэтому можно предположить, что поток атомов с поверхности сильно разогретой мишени складывается из двух независимых компонентов: распылительного и сублимированного. В таком случае скорость перемещения межфазной границы V на поверхности мишени, разделяющей конденсированную и газообразную фазы, представляется как сумма $V = V_{sput} + V_{ev}$, где V_{sput} , V_{ev} – скорости перемещения межфазной границы за счет распыления и сублимации соответственно. В дальнейшем V_{sput} и V_{ev} будем называть скоростями распыления и сублимации, а V – скоростью эрозии поверхности мишени.

Была разработана математическая модель тепловых процессов и эмиссии атомов с поверхности теплоизолированной мишени, которая представляет собой уравнение баланса энергии в системе «мишень в тигле» в установившемся режиме работы МРС.

Поле температур и скорость испарения рассчитываются при решении краевой задачи, сформулированной на основе уравнения теплопроводности, записанного в цилиндрической системе координат с азимутальной

симметрией. Эта задача с учётом фазовых переходов первого рода имеет следующий вид:

$$\frac{\partial E(z,r,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(z,r) \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial z} \right) + \lambda(z,r) \frac{1}{r} \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(z,r) \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial r} \right), \quad (2.5)$$

Граничное условие на облучаемой поверхности:

$$\lambda(z,r) \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = -q(r,t) + \rho V_{ev}(r,t) \Delta H + Q_{rad}(r,t) + Q_S(r,t), \quad (2.6)$$

Начальные условия: $T(z,r) = T_0(z,r)$.

Ось O_z направлена перпендикулярно облучаемой поверхности, вдоль направления падения пучка ионов; ось O_r – вдоль поверхности.

$E(z,r,t)$, $T(z,r,t)$ – соответственно функции тепловой составляющей внутренней энергии и температуры в мишени; $\lambda(z,r)$ – коэффициент теплопроводности. В (2.6) $q(r,t)$ – плотность мощности плазмы, действующей на поверхность мишени, которая принимается равной плотности мощности W_{ion} тока ионов, образующихся в области газового разряда, с поправкой на энергию ионов, отражённых от поверхности. Изменение плотности мощности ионного тока во времени определяется осциллограммой мощности источника питания магнетрона. Распределение q вдоль поверхности мишени соответствует пространственному профилю горизонтальной составляющей магнитного поля вблизи неё.

В уравнении (2.6) $V_{ev}(r,t)$ – скорость сублимации поверхности мишени, ΔH – разность энтальпий паровой и конденсированной фаз вещества мишени, ρ – плотность вещества мишени. Сюда также добавлен сток тепла за счёт теплового излучения $Q_{rad}(r,t)$.

Скорость сублимации и испарения рассчитывается с помощью уравнения Герца-Кнудсена [32]. Заметим, что оба механизма очень близки по своей природе, поэтому в дальнейшем мы их не будем разделять.

$$V_{subl} = \frac{1}{n_0 \cdot (2 \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T)^{1/2}} \cdot (P_{sat}(T) - P^*) \quad (2.7)$$

где n_0 – ядерная плотность вещества мишени; где m – масса испаряющегося атома (молекулы); k – постоянная Больцмана; $p_{sat}(T)$ – давление насыщенного пара при температуре поверхности T ; P^* – гидростатическое давление над поверхностью испарения.

Скорость эмиссии атомов с поверхности мишени за счет распылительного механизма V_{sput} описывается в рамках модели столкновительного распыления Зигмунда [33].

$$V_{sput} = \frac{3 \cdot \alpha \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot W_{ion}}{\pi^2 \cdot (M_1 + M_2) \cdot n_0 \cdot U_s}, \quad (2.8)$$

где W_{ion} – плотность мощности ионного тока направленного на мишень; M_1 и M_2 – массы атомов налетающего и принимающего удар соответственно; α – параметр, зависящий от отношения масс M_2/M_1 ; U_s – поверхностная энергия связи атомов мишени.

На поверхности боковых стенок тигля механизмом теплообмена с окружающей средой является тепловое излучение.

Решение этой задачи позволяет рассчитать скорость удаления атомов, или скорость эрозии, с любого элемента на её поверхности и в любой момент времени при использовании постоянных и импульсно-периодических источников питания МРС.

2.3.2 Методика расчёта скорости осаждения покрытий и частиц и их концентрацию в пространстве между мишенью и подложкой

При расчёте скорости осаждения покрытия на подложку в режиме самораспыления необходимо учитывать возврат на мишень её атомов, которые подвергаются ионизации в области разряда и формируют ионный ток на мишень. Пусть F_{ion} – плотность потока ионов, которые попадают на поверхность элементарной площадки мишени с координатами (x_{targ}, y_{targ}) . $F_{ion}(x_{targ}, y_{targ}) = I_{ion}(x_{targ}, y_{targ}) / e$. Здесь I_{ion} – плотность ионного тока. В расчётах $I_{ion}(x_{targ}, y_{targ}) = W(x_{targ}, y_{targ}) / U$, где $W(x_{targ}, y_{targ})$ – плотность мощности ионного тока на поверхности элементарной площадки мишени с координатами (x_{targ}, y_{targ}) ,

U – напряжение, измеренное в экспериментах при соответствующей мощности Q источника питания МРС. Тогда скорость осаждения покрытия V_{dep} на поверхности подложки в области элементарной площадки с координатами (x, y) может быть рассчитана с использованием второго закона Ламберта-Кнудсена [34]. Формула для её расчёта имеет следующий вид[1]:

$$V_{dep}(x, y) = \frac{L^2}{\pi n_{nuc} S_{tag}} \iint \frac{(F_{sput}(x_{tag}, y_{tag}) + F_{ev}(x_{tag}, y_{tag}) - F_{ion}(x_{tag}, y_{tag})) dx_{tag} dy_{tag}}{(L^2 + (x - x_{tag})^2 + (y - y_{tag})^2)^2} \quad (2.9)$$

Здесь L – расстояние между параллельно расположенными мишенью и подложкой, n_{nuc} – ядерная плотность вещества мишени в конденсированном состоянии, S_{tag} – площадь поверхности мишени.

Если расчёт производится для режима работы магнетрона с аргонном в предположении, что возврат атомов хрома назад на мишень ничтожно мал, то $F_{ion}=0$.

2.3.3 Методика расчета концентрации атомов в пространстве между мишенью и подложкой

Концентрация атомов вещества мишени n_{sum} в пространстве между мишенью и подложкой складывается из концентрации сублимированных (n_{subl}) и распылённых (n_{sput}) частиц [31]:

$$n_{sum} = n_{subl} + n_{sput} = \frac{F_{subl}}{\bar{V}_{subl}} + \frac{F_{sput}}{\bar{V}_{sput}} \quad (2.10)$$

где F_{subl} и F_{sput} – плотности потоков сублимированных и распыленных атомов соответственно в заданной точке пространства перед мишенью, \bar{V}_{subl} и \bar{V}_{sput} – средние скорости атомов, сублимированных и распыленных с поверхности мишени. Здесь $\bar{V}_{sput} = \sqrt{U_s / M_2}$ – наиболее вероятная скорость в энергетическом спектре Томсона для распылённых атомов [35], $\bar{V}_{subl} = \sqrt{2k\bar{T} / M_2}$ – наиболее вероятная скорость в распределении Максвелла (k – постоянная Больцмана, \bar{T} – средняя температура на поверхности мишени). $F_{sput} = \frac{Y_{sput} \cdot I_{ion}}{e}$ (e – заряд электрона, I_{ion} – плотность ионного

тока на заданном элементе поверхности, Y_{spit} – коэффициент распыления)

$$[33], F_{subl}(T) = \frac{1}{n_0 \cdot (2 \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T)^{1/2}} \cdot (P_{sat}(T) - P^*).$$

Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Выполнение раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» несет в себе цель выполнить комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов проекта. Необходимо оценить полные денежные затраты на проект, а также дать хотя бы приближенную экономическую оценку результатов его внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- Оценка коммерческого потенциала разработки;
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет стоимости научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель работы – выявить закономерности функционирования разряда с сублимирующей хромовой мишенью, в том числе в режиме самораспыления, а также особенности структурных и функциональных свойств плёнок, осаждённых в этих условиях.

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

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Работа посвящена технологии получения плёночных покрытий хрома при использовании теплоизолированной мишени и сильноточного источника питания. Использование сильноточного источника питания позволяет

управлять большим количеством рабочих параметров процесса осаждения покрытий. Новизна разработки состоит в использовании теплоизолированной мишени при работе сильноточного источника питания для получения (4 мкм) хромовых покрытий.

Хромовые покрытия представляют собой наноразмерную тонкопленочную структуру, полученную с использованием магнетронной распылительной системы (МРС). Основным преимуществом метода теплоизоляции мишени для нанесения пленок является включение двух механизмов эрозии катода – распыление и сублимация. Еще одно преимущество заключается в возможности использования уже существующих конструкций МРС и видоизменением лишь геометрии мишени. Основной принцип технологии магнетронного распыления с горячим катодом есть снижение площади теплового контакта между катодом и корпусом магнетрона таким образом, чтобы при заданной мощности температура на мишени достигла критических температур (близких к температуре плавления). В этом случае будет наблюдаться сублимация материала мишени катода, что приведет к существенному повышению скорости осаждения плёнок. Данная методика нанесения пленок в первую очередь интересно для промышленного применения так, как энергоэффективность и производительность МРС всегда были актуальны для них.

Целевой рынок – любое производство, связанное с технологиями тонких плёнок.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений целесообразно проводить при помощи оценочной карты, для этого были определены 2 конкурента на рынке: технология высокоскоростного магнетронного распыления из жидкой фазы (B_1), технология среднечастотного магнетронного распыления (B_2).

Расчет показателя конкурентоспособности производился по следующей формуле:

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i, \quad (1)$$

где B_i – бал i -го показателя, V_i – вес показателя (в долях единицы).

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	$B_{\kappa 1}$	$B_{\kappa 2}$	K_{ϕ}	$K_{\kappa 1}$	$K_{\kappa 2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Производительность	0,25	4	5	2	1,0	1,25	0,5
2. Надёжность	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
3. Простота методики получения покрытий	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,5
4. Качество покрытий	0,2	5	3	4	1,0	0,6	0,8
5. Возможность автоматизации	0,1	5	3	5	0,5	0,3	0,5
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	4	3	5	0,16	0,12	0,2
3. Стоимость технологии	0,06	4	4	4	0,24	0,24	0,24
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
5. Послепродажное обслуживание	0,05	5	3	5	0,25	0,15	0,25
Итого	1	46	35	43	4,55	3,66	3,84

Согласно вышеприведенному расчету видно, что предлагаемая нами технология осаждения покрытий имеет более высокий показатель конкурентоспособности (4,55). Это обусловлено следующим рядом факторов: технология компактна и безопасна, проста в эксплуатации и надёжна, а так же имеет высокую производительность.

4.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой

комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Результаты исследования приведены в SWOT-анализ (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – SWOT-анализ.

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Высокая производительность технологии; С2. Высокое качество покрытий; С3. Простая методика получения покрытий;	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Недостаточная инструментальная база для проведения измерений; Сл2. Использование устаревшего оборудования для исследования; Сл3. Сложность управления некоторыми параметрами осаждения.
Возможности: В1. Использование инновационной структуры ТПУ; В2. Повышение стоимости конкурентных разработок	1.Получение технологии исследований	1. Приобретения необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ 2. Сокращение поставок или смена поставщика
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологию; У2. Введение дополнительных государственных требований к сертификации технологии.	1.Продвижение технологии с целью создания спроса 2.Сертификация и стандартизация технологии	1. Приобретение необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ 2. Продвижение технологии с целью создания спроса

4.3 Планирование научно-исследовательских работ

4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках исследования;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;

Работа выполнялась студентом (инженер) под руководством научного руководителя (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований и способа решения задач	Руководитель
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Составление плана экспериментов	Руководитель, инженер
	5	Подготовка мишеней для экспериментов	Инженер
	6	Проведение экспериментальных работ	Руководитель, Инженер
	7	Выполнение расчётов	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ и обработка полученных результатов	Инженер
	9	Обсуждение и оценка эффективности результатов	Руководитель, Инженер
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Инженер
	11	Подготовка к защите	Инженер

4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ожсi}$ определяется по формуле:

$$t_{ожсi} = \frac{3t_{мини} + 2t_{максi}}{5},$$

где $t_{мини}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.; $t_{максi}$ – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожсi}}{Ч_i},$$

Где $Ч_i$ – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 4.4.

4.3.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ и представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней переводились в календарные дни по формуле:

$$T_{ki,рук} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

$$T_{ki,инж} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где $k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Для каждого исполнителя расчеты производились индивидуально. Календарный коэффициент определялся по формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{кал}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел.} \cdot \text{дн.},$$

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{C_i} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ раб.дн.}.$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48.$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:








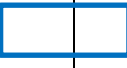





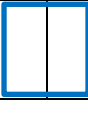
$$T_{ki,рук} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 2,8 \cdot 1,48 = 4,144 \approx 4 \text{ кал. дн.}$$

Все полученные значения в календарных днях округлялись до целого числа. Результаты представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4. Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость						Длит-сть в рабочих днях, T_{ri}		Длит-сть в календарных днях, T_{ki}	
	t_{min} , чел.-дн.		t_{max} , чел.-дн.		$t_{ож}$, чел.-дн.					
	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер
Составление и утверждение технического задания	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4	-
Выбор направления исследований и способа решения задач	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4	-
Подбор и изучение материалов по теме	-	21	-	28	-	23,8	-	23,8	-	35
Составление плана экспериментов	4	4	7	7	5,2	5,2	2,6	2,6	4	4
Подготовка мишеней для экспериментов	-	3	-	5	-	3,8	-	3,8	-	7
Проведение экспериментальных работ	14	24	20	34	16,4	28	8,2	14	12	21
Выполнение расчетов	-	7	-	10	-	8,2	-	8,2	-	12
Анализ и обработка полученных результатов	-	5	-	8	-	6,2	-	6,2	-	9
Обсуждение и оценка эффективности результатов	5	6	7	9	5,8	7,2	2,9	3,6	4	5
Составление пояснительной записки	-	3	-	6	-	4,2	-	4,2	-	6
Подготовка к защите	-	4	-	6	-	4,8	-	4,8	-	7

Таблица 4.5. Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ раб.	Вид работ	Исполнители	T_{ki} кал. Дн.	Продолжительность выполнения работ									
				февр		март		апр		май			
				1	2	1	2	1	2	1	2		
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4										
2	Выбор направления исследований и способа решения задач	Руководитель	4										
3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	35										
4	Составление плана экспериментов	Руководитель, инженер	4		 								
5.	Подготовка мишеней для экспериментов	Инженер	7										
6.	Проведение экспериментальных работ	Руководитель, Инженер	21			 							
7.	Выполнение расчетов	Инженер	12										
8.	Анализ и обработка полученных результатов	Инженер	9										
9.	Обсуждение и оценка эффективности результатов	Руководитель, Инженер	5						 				
10.	Составление пояснительной записки	Инженер	6										
11.	Подготовка к защите	Инженер	7										

 – руководитель;

– инженер.

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей.

4.4 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

4.4.1 Расчет материальных затрат НИ

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Также в стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены).

Таблица 4.6 – Сырье, материалы и комплектующие изделия.

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Хромовый катод		1	16000	16000
Баллон Аргон	Ar, 99,9%	1	6000	6000
Всего за материалы				22000
Транспортно-заготовительные расходы (3–5%)				1760
Итого по статье				23760

4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

При выполнении исследования дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное оборудование являлось собственностью отделения экспериментальной физики НИИ ТПУ. Необходимо рассчитать амортизационные отчисления для использованного оборудования.

Таблица 4.7 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Источник питания Applied Eletronics APEL-M-5HIPIMS-1k	1	7	265	265
2	Сканирующий электронный микроскоп Quanta 200 3D	1	10	5000	5000
Итого:					5265 тыс. руб.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m,$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Таким образом, для источника питания Applied Eletronics APEL-M-5HIPIMS-1k амортизация будет составлять:

$$A = \frac{265000}{7 \cdot 12 \cdot 30} * 2 = 315,47 \text{ руб.}$$

Сканирующий электронный микроскоп:

$$A = \frac{5000000}{10 \cdot 12 \cdot 30} * 1 = 1388,8 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизированных отчислений:

$$A = 315,47 + 1388,8 = 1704,36 \text{ руб.}$$

4.5 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (табл. 4.4).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года; при отпуске в 24 раб. дней $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	104	104
- выходные дни	14	14
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	24	24
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	223

Месячный должностной оклад работника:

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

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$); k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5; k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томской области).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$Z_{м}$, руб.	$Z_{дн}$, руб.	$T_{р.}$ раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	24960	0,3	0,3	1,3	51917	2608	33	86064
Инженер	12664	0,3	0,3	1,3	26341	1323	91	120393
Итого $Z_{осн}$								206457

4.5.1 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

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

Таким образом, сумма основной заработной платы участников проекта и дополнительной будет составлять статью затрат расходов на зарплату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб., $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

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

Таблица 4.10 – Зарплата исполнителей НТИ

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная зарплата, руб.	86064,0	120393,0
Дополнительная зарплата, руб.	12909,6	15358,9
Суммарная зарплата, руб.	98973,6	135751,9
Итого по статье, руб	234725,5	

4.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды (таблица 4.11) определяется по формуле:

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

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

Таблица 4.11– Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Суммарная зарплата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды
Руководитель	98973,6	29692,1
Инженер	135751,9	40725,6
Итого:		70417,7

4.7 Накладные расходы

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

$$Z_{накл} = \text{сумма статей} \cdot k_{нр}$$

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

$$Z_{накл} = (23760 + 1706 + 206457 + 434726 + 70418) \cdot 0,16 = 117930,7 \text{ руб.}$$

4.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы по теме: «Особенности осаждения хромовых покрытий при работе магнетронной распылительной системы с сублимирующей мишенью», является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Рассчитанный бюджет затрат НИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИ	23760
2. Амортизация оборудования	1704
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	206457
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	234726
5. Отчисления во внебюджетные фонды	70418
6. Накладные расходы	117931
Бюджет затрат НИ	654996

4.9 Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности исследования

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.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги магнетронного распыления с «горячей» мишенью ($\Phi_{p1}=654996$), электролитический метод осаждения плёнок ($\Phi_{p2}=420000$) и дуговые источники плазмы ($\Phi_{p3}=540000$).

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

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

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

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{фин.р}^{исп.1} = \frac{\Phi_{р1}}{\Phi_{max}} = \frac{654996}{654996} = 1;$$

$$I_{фин.р}^{исп.2} = \frac{\Phi_{р2}}{\Phi_{max}} = \frac{420000}{654996} = 0,71;$$

$$I_{фин.р}^{исп.3} = \frac{\Phi_{р3}}{\Phi_{max}} = \frac{540000}{654996} = 0,82.$$

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

Оценка ресурсоэффективности проекта определялась посредством расчета интегрального критерия по формуле:

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

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности; a_i – весовой коэффициент проекта; b_i – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.
путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 4.13.

Таблица 4.13 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Магнетронное распыление с «горячей» мишенью	Электролитический метод	Дуговой источник
Чистота покрытий	0,25	5	3	4
Скорость осаждения покрытий	0,15	5	4	3
Адгезионная прочность	0,15	3	4	3
Коррозионная стойкость покрытий	0,2	4	3	5
Безопасность использования	0,13	4	2	4
Надежность	0,12	4	4	4
Итого:	1	4,25	3,29	3,9

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p-исп1} = 0,25*5 + 0,15*5 + 0,15*3 + 0,20*4 + 0,13*4 + 0,12*4 = 4,25;$$

$$I_{p-исп2} = 0,25*3 + 0,15*4 + 0,15*4 + 0,20*3 + 0,13*2 + 0,12*4 = 3,29;$$

$$I_{p-исп3} = 0,25*4 + 0,15*3 + 0,15*3 + 0,20*5 + 0,13*4 + 0,12*4 = 3,9.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп 1} = \frac{I_{рисп 1}}{I_{фин.р}} = 4,25.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (табл. 4.14). Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{ср}$):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп 1}}{I_{исп 2}} = \frac{3,29}{4,25} = 0,77.$$

Таблица 4.14 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,71	0,82
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,25	3,29	3,9
3	Интегральный показатель эффективности	4,25	4,63	4,76
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,92	0,89

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации напыления плёнок хрома, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;

2. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 654996 руб;

3. По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:

- Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 1, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;
- Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,25, по сравнению с 3,29 и 3,9;
- Значение сравнительной эффективности ИР составляет 1, по сравнению с 0,92 и 0,89, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

Глава 5 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда.

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

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

Настоящая магистерская диссертация посвящена осаждению хромовых покрытий при помощи магнетронной распылительной системы. Исследование предполагает работу с высоким напряжением и различными газами. Объектом исследования являются хромовые покрытия, а предметом исследования служат различные параметры осаждения дынных покрытий.

Научно-технической базой для проведения исследований стала Лаборатория 23 научно-образовательного центра Б. П. Вейнберга.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

К специальным правовым нормам трудового законодательства относятся режим рабочего времени и защита персональных данных. Так как вредные условия труда не наблюдались, то различные виды компенсаций не учитывались.

Рабочее время – время, в течение которого работник в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка и условиями трудового договора должен исполнять трудовые обязанности, а также иные периоды времени, которые в соответствии с трудовым кодексом и другими федеральными законами относятся к рабочему времени. В соответствии с Трудовым кодексом РФ нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

В целях обеспечения прав и свобод человека и гражданина работодатель и его представители при обработке персональных данных обязаны соблюдать определенные требования в соответствии с Конституцией и законами РФ. Обработка персональных данных может осуществляться исключительно в целях обеспечения соблюдения законов и иных нормативных правовых актов, получении образования и продвижении по службе, обеспечения личной безопасности, контроля количества и качества выполняемой работы и обеспечения сохранности имущества.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

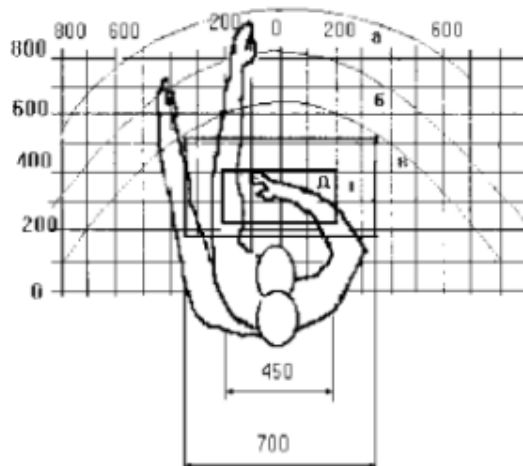


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной — не менее 500 мм, глубиной на уровне колен — не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног — не менее 650 мм.

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

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

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края.

5.2 Производственная безопасность

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003–2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовле ние	Эксплуата ция	
1. Повышенный уровень шума	-	+	-	ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация» [36].
2. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений[37];
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СанПин 23-05-95 Естественное и искусственное освещение [38];
4. Превышение нормативов по электромагнитному излучению		+	+	Электрические поля промышленной частоты. ГОСТ 12.1.002-84. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. [39].
5. Пожарная и взрывная опасность		+		Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".

5.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов

5.3.1 Производственный шум

Осаждение хромовых плёнок осуществлялось на вакуумной установке, одними из основных частей которой являются форвакуумный и турбомолекулярный насосы, создающие производственный шум. Воздействие шума в первую очередь влияет на органы слуха, нервную и сердечно-сосудистую системы [40]. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума при сосредоточенной умственной работе составляет 75 дБА. Зоны с уровнем звука или эквивалентным уровнем звука выше 80 дБА обозначены знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026 [37]. Рекомендуется использовать следующие средства коллективной защиты: акустические экраны, выгородки, объемные поглотители звука, виброизолирующие опоры; средства индивидуальной защиты: специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противошумные каски.

В качестве материалов для шумозащитных экранов применяют минеральную вату, композитные материалы, пластмассы, поликарбонаты, древесина, металлы, кирпичную кладку, бетон.

5.3.2 Микроклимат

При работе установки включены охлаждающие системы и одновременно с этим процессом происходит, нагрев вакуумной камеры, что приводит к изменению микроклимата в помещении. Параметрами, характеризующими микроклимат, являются [41]:

1. температура воздуха;
2. относительная влажность воздуха;
3. скорость движения воздуха.

Выполняемые работы относятся к II категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121–150 ккал/ч

(140–174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Температура наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не превышает 45 °С.

Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21-23	60-40	0,1
Теплый	22-24	60-40	0,1

Для создания оптимальных метеорологических условий применяется кондиционер, который поддерживает оптимальные параметры микроклимата автоматически, независимо от меняющихся условий. В холодное время года для поддержания в помещении оптимальной температуры воздуха применяется отопление.

5.3.3 Расчет искусственной освещенности

Рациональное освещение обеспечивает высокую производительность трудового процесса и качество работ, исключает возникновение дефектов зрения (спазм аккомодации, ложные близорукость и дальнозоркость), травматизм, составляющий (из-за ненормативной освещенности) 30-50% всех несчастных случаев на производстве.

Используются три вида освещения: естественное (от солнца), искусственное (от искусственных источников), совмещенное. При недостатке естественного света нарушаются обмен веществ и резистентность организма,

поэтому используются газоразрядные источники, близкие по спектру к естественному свету.

Источники искусственного освещения: лампы накаливания, газоразрядные низкого (люминесцентные) и высокого (ДРЛ) давления. Существуют системы общего освещения (светильники распределяются равномерно по площади освещения), локализованные (для освещения оборудования и рабочих мест), местные (освещение рабочей поверхности), комбинированные.

В лаборатории применяется общая система освещения люминесцентными лампами ЛД.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda=1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,3$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса,

h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3700 - 300 = 3400$$

Высота рабочей поверхности над полом: $h_{pp} = 800$.

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{pp} = 3400 - 800 = 2600 = 2,6 \text{ м}$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,6 = 2,86 \text{ м}$$

Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{4,3}{2,86} = 1,5 \approx 2$$

Число светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{5,7}{2,86} = 1,99 \approx 2$$

Общее число светильников:

$$N = Na \cdot Nb = 2 \cdot 2 = 4$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,86}{3} = 0,953\text{м}$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

Однако необходимо провести дополнительные расчеты:

$$4300 = L_2 + \frac{2}{3}L_3 + 2 \cdot 1150$$

$$L_2 = \frac{(4300 - 2300) \cdot 3}{5} = 1200$$

$$l = \frac{L_2}{3} = \frac{1200}{3} = 400$$

Аналогичные расчеты проводим для длины комнаты:

$$5700 = L_1 + \frac{2}{3}L_1 + 2 \cdot 60$$

$$L = \frac{(5700 - 120) \cdot 3}{5} = 3348$$

$$l = \frac{L_1}{3} = \frac{3348}{3} = 1116$$

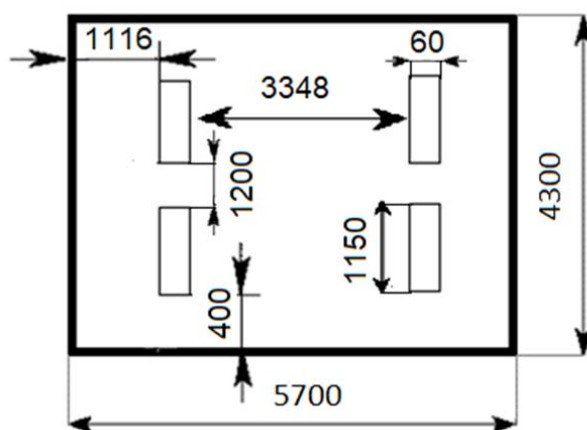


Рисунок 5.1 – Схема размещения светильников в помещении Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{5,7 \cdot 4,3}{2,6 \cdot (5,7 + 4,3)} = 0,94$$

Для коэффициентов отражения берутся приблизительные значения: = 50% и потолка = 30%. Значения коэффициента использования светового потока светильников с люминесцентными лампами примем равным 53 %.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 5,7 \cdot 4,3 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 0,53} = 2861,42 \text{ лм}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% \leq 20\%;$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{2900 - 2861,42}{2900} \cdot 100\% = 1,3\%.$$

Нормы освещенности определяются основными признаками зрительной работы: размер различаемого объекта (буквы, штрих рисунка и т.д.), коэффициент отражения фона, контраст между объектом и фоном. На этой основе разработаны требования к естественному и искусственному, совмещенному освещению жилых и общественных зданий [42]. Согласно им в лаборатории наноструктурных биоконпозитов норматив естественного освещения при боковом освещении – 1,3 %, он выполняется. Норматив

общего искусственного освещения (по СНиП 23-05-95 [38]): 400 лк.
Измерения на рабочем месте дали результат: 470 лк.

5.3.4 Электробезопасность

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 Гц (6–16мА). Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий [43].

Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты. Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Согласно [43] помещения разделяются на три класса опасности.

1. Помещение без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18—20°, с влажностью 40—50%, $U < 1000$ В).

2. Помещение с повышенной опасностью (где имеется один из следующих признаков: повышенная температура, влажность 70—80%, токопроводящие полы, металлическая пыль, наличие заземления, большого к-ва оборудования, $U < 1000$ В,).

3. Помещения особо опасные, в которых имеется наличие двух признаков из второй группы или имеются в помещении едкие или ядовитые взрывоопасные вещества, $U > 1000$ В.

Используемое помещение относится к классу с повышенной опасностью, так как в данном помещении возможно одновременное прикосновения человека к имеющей соединение с землей

металлоконструкцией здания с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, с другой стороны. Граничные значения напряжений, при повышении которых требуется выполнение защиты от косвенного прикосновения для помещений с повышенной опасностью составляет >25 В переменного тока и >60 В постоянного тока [44].

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

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

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

1. изоляция токоведущих частей;
2. малое напряжение в электрических цепях;
3. защитное заземление, зануление, защитное отключение;
4. применение разделяющих трансформаторов;
5. использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;
6. защитные средства и предохранительные приспособления.

Индивидуальные защитные средства 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 85 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 [45].

Безопасным для организма человека можно считать переменный ток силой не выше 0,05 А ток силой более 0,05 - 0,1 А опасен и может вызвать смертельный исход.

Безопасным напряжением для человека считается напряжение 42 В в нормальных условиях и 12 В в условиях повышенной опасностью (сырость, высокая температура, металлические полы и др.).

Величина измерения сопротивления заземления - Ом и оно должно быть минимально низким по значению. Идеальным случаем считается, если величина будет нулевая, это означает при пропускании "вредных" электротоков какое-либо сопротивление отсутствует, что гарантирует полное поглощение их землей. Так как достигнуть идеала практически невозможно, то вся электроника и электрооборудование создаются на основе некоторых нормированных величин сопротивления заземления равно 60, 30, 15, 10, 8, 4, 2, 1 и 0,5 Ом. Исходя из ПУЭ 1.7.101, требуется не более чем 2, 4 и 8 Ом сопротивление заземления для источника тока (генератора или трансформатора).

5.3.5 Электромагнитное излучение

Источником электромагнитных полей промышленной частоты являются ведущие части действующих электроустановок, в том числе ПК. Длительное воздействие электромагнитного поля на организм человека может вызвать нарушение функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем. Это выражается в повышенной утомляемости, снижении качества выполнения рабочих операций, сильных болей в области сердца, изменение кровяного давления и пульса.

В соответствии с ГОСТ 12.1.002-84 [46] нормы допустимых уровней напряженности электрических полей зависят от времени пребывания человека в контролируемой зоне. Время допустимого пребывания в рабочей зоне в часах составляет: $T = 50/E - 2$, где E – напряженность электрического поля. Работа в условиях облучения электрическим полем с напряженностью 20 – 25 кВ/м продолжается не более 10 минут. При напряженности не выше 5 кВ/м присутствие людей в рабочей зоне разрешается в течение 8 часов.

В соответствии с [46] установлена предельно допустимая напряженность электрического поля $E_{пд}$ в диапазоне 0,06–300 МГц и предельно допустимая энергетическая нагрузка за рабочий день (\mathcal{E} , $(В/м)^2 \cdot ч$). В таблице 5.3 приведены предельно допустимые напряженность электрического поля и энергетическая нагрузка за рабочий день в диапазон частот 0,06–300 МГц

Таблица 5.3 – Предельно допустимая напряженность электрического поля и предельно допустимая энергетическая нагрузка

Частота, МГц	$E_{пд}$, В/м	\mathcal{E} , $(В/м)^2 \cdot ч$
0,06 – 3,0	500	20000
3,0 – 30	300	7000
30 – 300	80	800

Предельно допустимая напряженность магнитного поля в диапазоне частот 0,06 – 3 МГц в соответствии [47] должна составлять $H_{пд} = 50$ А/м, предельно допустимая энергетическая нагрузка за рабочий день 200 А/м².

К основным методам защиты от электромагнитных излучений относятся:

- а) рациональное размещение излучающих и облучаемых объектов, исключающее или ослабляющее воздействие излучения на персонал;
- б) ограничение места и времени нахождения работающих в электромагнитном поле;
- в) защита расстоянием, т. е. удаление рабочего места от источника электромагнитных излучений. Например, экран монитора ПК должен

находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 60÷70 см, но не ближе 50 см;

- г) уменьшение мощности источника излучений;
- д) использование поглощающих или отражающих экранов;
- е) применение средств индивидуальной защиты.

5.3.6 Пожарная безопасность

Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности делятся на: А – повышенная взрывопожароопасность; Б – взрывопожароопасность; В1-В4 – пожароопасность; Г – умеренная пожароопасность; Д – пониженная пожароопасность [48].

Используемое помещение относится к категории Б по пожарной и взрывопожарной опасности, так в данном помещении расположены горючие легковоспламеняемые материалы, также баллоны с газами. К категории Б относятся помещения, в которых находятся (обращаются) горючие пыли или волокна, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки более 28 градусов Цельсия, горючие жидкости в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 килопаскалей [48].

В лаборатории расположены огнетушители порошковые ОП-4(з)-АВСЕ-02 (предназначен для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000 вольт) [49].

Причинами возникновения пожара могут быть:

1. Нарушение правил эксплуатации электрического оборудования;
2. Курение в неустановленных местах;
3. Перегрузка электрических сетей;
4. Нарушение правил пожарной безопасности;
5. Неправильное хранение возгорающихся веществ.

При работе на установке используются баллоны с аргоном. Эксплуатация баллонов связана с рядом опасных факторов. Наполненный сжатым газом баллон обладает большой энергией, и если в нем образуется отверстие, то газ истекает из него с критической скоростью.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны. В целях безопасности, выполнены общие правила эксплуатации баллонов:

1. Баллоны установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, а также защищены от падения на них сверху каких-либо предметов.

2. Баллоны с газом, устанавливаемые в помещении находятся от радиаторов отопления и других отопительных приборов на расстоянии не менее 1 метра и от печей и других источников тепла с открытым огнем не менее 5 метров. При невозможности выдержать необходимое расстояние, необходимо применять защитные экраны, предохраняющие баллоны от местного разогрева, располагая баллон не ближе 0.1 м от экрана. Установленные баллоны также необходимо предохранять от действия солнечных лучей [50].

3. Выпуск газов из баллона производится через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет.

5.4 Экологическая безопасность

В настоящее время одним из важных вопросов в любой сфере деятельности является вопрос экологичности. Экологичность отхода представляет собой способность отхода не оказывать отрицательного воздействия на окружающую среду за пределами допустимых значений.

В настоящий момент ведутся активные работы по переработке отходов, их утилизации или обеспечения повторного использования. Переработка является процессом деятельности, направленным на изменение

физического, химического состояния отхода для дальнейшего обращения с отходами.

В данной работе отходами являются продукты реакций, полученные вследствие взаимодействий вакуумно-плазменной установки с хромовыми покрытиями.

К газообразным отходам, загрязняющие атмосферу помещения, относятся естественные выделения – углекислый газ, пары воды, летучие органические соединения ЛОС (альдегиды, кетоны), пары спирта и бензина, с помощью которых происходит отмывка образцов. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения.

К жидким отходам относятся отходы, образующиеся в процессе отмывки образцов в органических и неорганических растворителях (спирт, бензин, ацетон), в процессе влажной уборки помещения лаборатории, при пользовании водопроводом. Данные отходы сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

К сфере защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Реальным вкладом здесь может стать экономия электрической и тепловой энергии на территории предприятия. Несмотря на кажущуюся малость вклада в энергосбережение и в защиту атмосферного воздуха от загрязнения массовое движение в этом направлении, в том числе, в быту, принесет значимый эффект.

5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – это состояние, при котором в результате возникновения источника чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью,

наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде.

ЧС делятся на два типа:

- ЧС природного характера;
- ЧС техногенного характера.

Виды ЧС природного характера: землетрясения; наводнения (половодье, паводок, затор, зажор, ветровой нагон, прорывы плотин); извержения вулканов; цунами; ураганы, бури, смерчи, сильный ветер; обвалы; оползни; снежные лавины; сели; пожары; грозы;

Чрезвычайные ситуации техногенного характера: транспортные аварии (катастрофы); пожары, взрывы, угроза взрывов; аварии с выбросом (угрозой выброса) химически опасных веществ; аварии с выбросом (угрозой выброса) радиоактивных веществ; аварии с выбросом (угрозой выброса) биологически опасных веществ; внезапное обрушение зданий, сооружений; аварии на электроэнергетических системах; аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения; аварии на очистных сооружениях; гидродинамические аварии.

Возможные ЧС, которые могут возникнуть при осаждении хромовых покрытий методом магнетронной распылительной системы: землетрясение, пожар, отключение света, удар током, террористические действия, диверсия. Основными, наиболее вероятными ЧС, являются возникновение пожара и электропоражение.

Причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м³.

В качестве организационно-технических мероприятий выполняют инструктаж работающих по пожарной безопасности, разработку схемы действия администрации и работающих в случае пожара и организацию эвакуации людей.

Порядок действия в результате возникновения пожара и меры по ликвидации последствий: при обнаружении загорания рабочему немедленно необходимо сообщить по телефону 01 в пожарную охрану, сообщить руководителю, приступить к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре необходимо обеспечить скорую медицинскую помощь.

Выводы по разделу «Социальная ответственность»

В данной главе рассмотрены 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.

Заключение

В результате проведенных исследований при работе МРС с сублимирующей Cr мишенью было выявлено:

- минимальная мощность, при которой магнетрон стабильно работает в режиме самораспыления, составляет 2250 Вт, что соответствует интенсивной сублимации атомов с поверхности мишени;
- при подаче отрицательного смещения на подложку ток смещения примерно одинаковый как в режиме самораспыления, так и при подаче рабочего газа, что указывает на возможность гибкого управления ионной бомбардировкой поверхности растущего покрытия при реализации режима полного самораспыления;
- покрытие, полученное при минимальной мощности магнетрона в режиме самораспыления, продемонстрировало более высокую стойкость к коррозии по сравнению с покрытием, полученным при работе магнетрона с рабочим газом;
- скорости осаждения хромовых покрытий при использовании сублимации мишени возросли примерно на порядок по сравнению с обычным распылением.

Список литературы:

1. G.A. Bleykher, A.V. Yuryeva, A.S. Shabunin, V.P. Krivobokov, D.V. Sidelev, The role of thermal processes and target evaporation in formation of self-sputtering mode for copper magnetron sputtering, *Vacuum*. – 2018. – v.152. – p. 156-165.
2. G. A. Bleykher, A. V. Yuryeva, A. S. Shabunin, D. V. Sidelev, V. A. Grudinin, Yu N. Yuryev, The properties of Cu films deposited by high rate magnetron sputtering from a liquid target, *Vacuum* 169 (2019), 1089104.
3. Никитин М.М. Технология и оборудование вакуумного напыления. – М.: Металлургия, 1992. 112с.
4. Schiller S., Goedicke K., Reschke J. etol. Pulsed magnetron sputter tehnology// *Surf. Coat. Technol.* 1993. Vol.61. P.331-337.
5. Sproul W.D. High-rate reactive DC magnetron sputtering technology// *Vacuum*. 1998. Vol. 51. No.4. P.641-646.
6. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостной разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. –М.:Изд-воМоск. физ.-техн. ин-та: Наука. 1995. –320с.
7. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. –72 с.
8. Wasa K., Hayakawa Sh. Some features of magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. –1978. –V.52. –P.31-43.
9. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 11 с.
10. Кесаев И.Г., Пашкова В.В. электромагнитная фиксация катодного пятна // *Журн. техн. физики*. –1959. -Т.29, №3. -С.287-298.
11. G.A. Bleykher, A.O. Borduleva, V.P. Krivobokov, D.V. Sidelev, Evaporation factor in productivity increase of hot target magnetron sputtering systems, *Vacuum* 132 (2016) 62-69.

12. A.V. Tumarkin, M. Zibrov, G.V. Khodachenko, D. Tumarkina, High-rate deposition of silicon films in a magnetron discharge with liquid target, *J. Phys. Conf.* 768 (2016), 012015, pp. 1-4.

13. Закутаев А.И. Осаждение тонких плёнок из абляционной плазмы, генерируемой на мишени при воздействии мощного ионного пучка: дис. ... канд. физ.- мат. наук. – Томск, 1998.–162 с.;

14. Ремнев Г.Е. Осаждение тонких металлических плёнок при воздействии мощных ионных пучков на металлы / Ремнев Г.Е., Закутаев А.Н., Иванов Ю.Ф., Матвиенко М.В., Потёмкин А.В. // *Письма в ЖТФ.* – 1996. –Т.22.–№8. – С. 68-72;

15. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пашенко О.В. Теплоперенос в твёрдом теле под действием мощных пучков заряженных частиц. – Новосибирск: Наука, 1999. – 176 с.;

16. Осаждение из газовой фазы / Под ред. К. Пауэлла. М.: Атомиздат, 1970 – 450 с.;

17. Yuryeva, A.V. Effect of material of the crucible on operation of magnetron sputtering system with liquid-phase target / A.V. Yuryeva, A.S. Shabunin, D.V. Korzhenko, O.S. Korneva, M.V. Nikolaev // *Vacuum.* – 2017. – v. 141. – p. 135–138.

18. Vlcek, J. Pulsed magnetron sputtering of metallic films using a hot target / J. Vlcek, B. Zustin, J. Rezek, K. Burcalova, J. Tesar // *52nd Annual Technical Conference Proceedings of the Society of Vacuum Coaters.* – 2009. – p. 219–223.

19. Chao, Y. Nanocrystalline titanium films deposited via thermal-emission-enhanced magnetron sputtering / Y. Chao, J. Bailing, L. Zheng, F. Lin, H. Juan // *Thin Solid Films.* – 2015. – v. 597. – p. 117–124.

20. Tesar, J. On surface temperatures during high power pulsed magnetron sputtering using a hot target / J. Tesar, J. Martan, J. Rezek // *Surface & Coatings Technology.* – 2011. – v. 206. – p. 1155–1159.

21. Boo. J.–H., Jung.M.J.,Park.H.K, Nam.K.H.,Han.J.G. High-rate deposition of copper thin films using newly designed high-power magnetron sputtering source // Surface & Coatings Technology. –2004. –Vol.188-189. – P.721-727.
22. A.I. Kuzmichev, Magnetron Sputtering Systems, Book 1, Introduction into Physics and Technique of Magnetron Sputtering, Avers, Kiev, 2008.
23. D. Depla, Magnetrons, Reactive Gases and Sputtering, Ghent University,Belgium, 2015.
24. V. Stambouli, O. Burat, D. Bouchier, F. Meyer, J. Gilles, G. Gautherin, Argon incorporation effects on the conductivity of metal layers, Thin Solid Films 193-194 (1990) 181-188.
25. W.M. Posadowski, Self-sustained magnetron co-sputtering of Cu and Ni, Thin Solid Films 459 (2004) 258-261.
26. J. Musil, Low-pressure magnetron sputtering, Vacuum 50 (1998) 363-372.
27. D.J. Christie, Target material pathways model for high power pulsed magnetron sputtering, J. Vac. Sci. Technol. A 23 (2005) 330-335.
28. G.A. Bleykher, A.O. Borduleva, A.V. Yuryeva, V.P. Krivobokov, J. Lan_cok, J. Bulí_r,J. Drahokoupil, L. Klim_sa, J. Kope_cek, L. Fekete, R._Ctvrtilik, J. Toma_stik, Features of copper coatings growth at high-rate deposition using magnetron sputtering systems with a liquid metal target, Surf. Coating. Technol. 324 (2017)
29. Sputtering cathode / M.A. Bernick // United States Patent № 5,736,019, 1998.
30. Sputtering apparatus / Kokai // Japanese Patent № 62–211,375, 1987.
31. Magnetron with parallel race track and modified end portions thereof/ W. De Bosscher, H. Lievens // United States Patent № 6,375,814, 2002.
32. 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. – т. 2. – № 24. – с. 84–87.

33. Billard, A. Influence of the target temperature on a reactive sputtering process / A. Billard, D. Mercks, F. Perry, C. Frantz // Surface and Coatings Technology. – 1999. – v. 116-119. – p. 721–726.

34. R. Glang, Vacuum evaporation, in: L.I. Maissel, R. Glang (Eds.), Handbook of Thin Film Technology, V. 1, McGraw-Hill Book Company, 1970.

35. W.O. Hofer, Angular, energy and mass distribution of sputtered particles, in: R. Behrisch, K. Wittmaack (Eds.), Sputtering by Particle Bombardment III: Characteristics of Sputtered Particles, Technical Applications, Topics in Applied Physics, 64, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1991, pp. 15–90.

36. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

37. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Минздрав России. – Москва. – 1997.

38. СанПин 23-05-95 Естественное и искусственное освещение.

39. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы.

40. ГОСТ 12.1.002-84 ССБТ. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.

41. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Минздрав России. – Москва. – 1996.

42. ГОСТ 12.1.002-84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Издательство стандартов. – Москва. – 1984.

43. ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Издательство стандартов. – Москва. – 1984.

44. ПУЭ-7 Правила устройства электроустановок 2009 г.

45. ГОСТ 12.1.045-84. Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Издательство стандартов. – Москва.- 1984. 106.

46. ГОСТ 12.1.002-84 ССБТ. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.

47. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы.

48. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".

49. ПБ 03-576-03 «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением».

50. ГОСТ 12.2.085-2002 «Сосуды, работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности».

Приложение А
(справочное)

Magnetron Sputtering System

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Афанасьев Виталий Александрович		

Руководитель ВКР _____:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б. П. Вейнберга	Блейхер Галина Алексеевна	д.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков школы ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Утятин Янина Викторовна			

Contents

1	Magnetron Sputtering System.....	121
2	Classification of Magnetron Sputtering System	123
3	Magnetron Sputtering with Hot Target.....	125
4	Self Sputtering System.....	126
5	Thermal and Erosion Processes in the Target.....	128
	References	131

1 Magnetron Sputtering System

Magnetron sputtering systems are widely used for thin film deposition in a medicine, semiconductor devices, space materials, machinery and tools

Magnetron sputtering coating is a vacuum coating process that falls under the category of physical vapor deposition (PVD) and is mainly used for depositing metals, alloys, and compound textiles, and other material with a thickness up to 5 μ . In textile coatings, it is used to coat textile fabrics with metals to provide antimicrobial, antistatic, and electroconductive properties. Fig. 1 shows the basic mechanism of magnetron sputtering coating process. A target or a metal precursor, that desired to be deposited, is bombarded with energetic ions of inert gases (e.g., argon or helium). The forceful collision of these energetic ions with the target ejects target metal atoms into space. These metal atoms are then deposited on the substrate material forming a metallic film. The target is cooled by water so that little radiation heat is generated. A wide range of metals including silver, copper, brass, titanium, silicone, silicone nitride, and carbon nitride can be used. Magnetron sputtering systems (MSS) are commonly used to obtain thin films. Thanks to these systems it is possible to obtain a coating of almost any composition. However, even MSS have their drawbacks, such as a relatively low deposition rate.

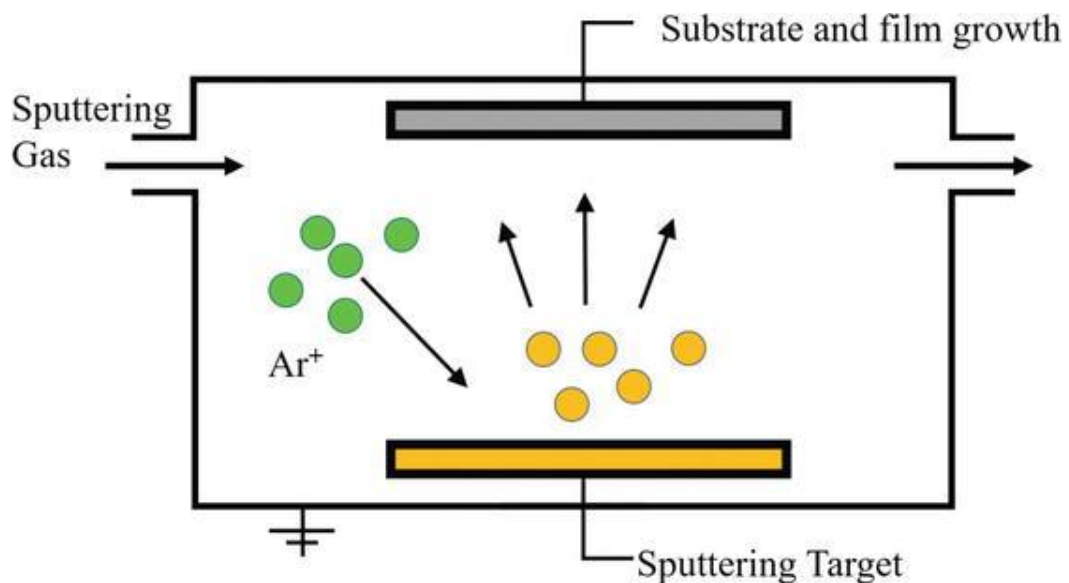


Figure 1 – Schematic diagram of mechanism of magnetron sputter coating machine

A presence of a working gas (e.g. inert gas like argon) is required at standard sputtering process since positive ions of this gas sputter negatively biased target. The working gas atoms may affect deposition process in several ways, they:

- can be entrapped in the deposited layer (contamination);
- distort spatial distribution of sputtered material flux through collisions;
- decrease the sputtered species energy (thermalization).

The target power density in the range of 1–50 W/cm² is common to the standard sputtering processes. Once the target power density becomes greater than 50–300 W/cm² (depending on e.g. magnetron source design, target material, target area) both the sputtered material flux and the sputtered material ionization level are much higher than in conventional magnetron sputtering processes [1]. As a result of that the sputtered material ions become an effective component of the target surface erosion (self-sputtering phenomenon) and can become enough to support sputtering without any inert gas (magnetron Self-Sustained Sputtering, SSS).

The SSS mode of magnetron operation: (1) can eliminate the films inert gas contamination problem, (2) gives a unique condition of sputtered particles transport to the substrate – lack of collisions with working gas atoms. The reduced number of sputtered material collisions means lower spatial distribution distortion

(directional deposition and lower energy losses (influence on films adhesion and microstructure)).

2 Classification of Magnetron Sputtering System

The classification of MSS circuits can be carried out according to the type of supply voltage and discharge current, the shape of the target cathode, the type of magnetic system, and the phase state of the cathode.

Three most commonly used types of magnetrons differing in cathode shape can be distinguished:

- flat MSS with a disk cathode or an extended cathode (planar MSS) (Fig. 2a);
- cylindrical MSS (Fig. 2 b);
- MSS with a conical target (Fig. 2 c).

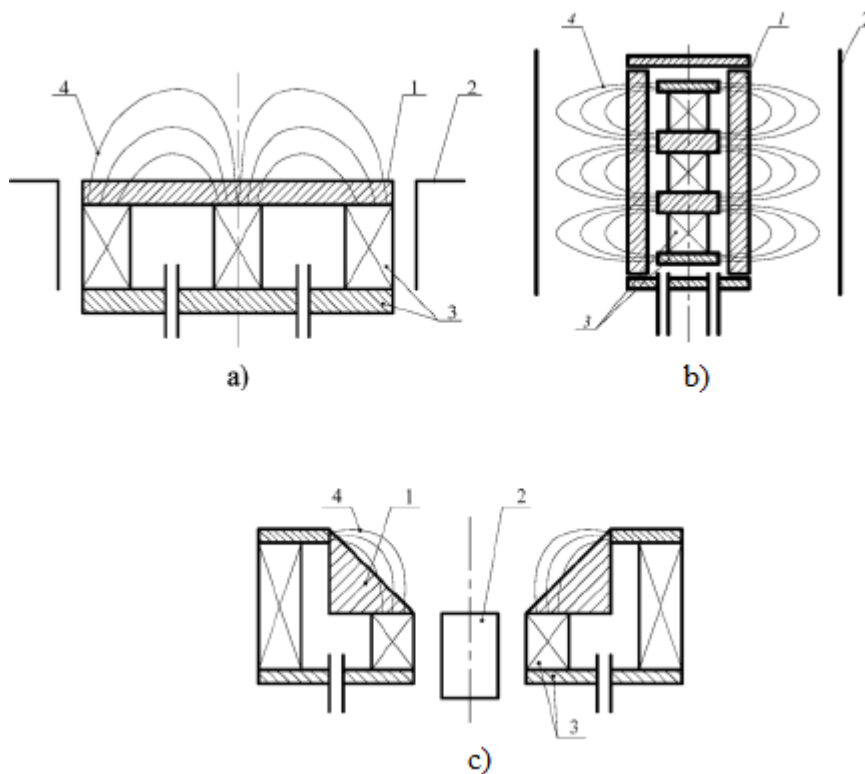


Figure 2 – The main structural schemes of MSS: a) flat (planar) MSS, b) cylindrical MSS, c) MSS with a conical target. 1 - target cathode; 2 - anode; 3 - magnetic system; 4 - magnetic field lines

The most common are MSS with a flat target. The cathode disk magnetron can be used in small installations for applying reinforcing coatings, conductive paths in microchips, reflective and interference coatings on small optical parts (Fig.3).



Figure 3 – Flat target magnetron sputtering system

Flat MPCs with an extended cathode are used in installations for coating large-sized sheet materials (up to 3200x6400 mm) or roll materials. In a flat cathode MSS, the material utilization ratio is relatively low 20-30%.

Cylindrical MSS are used when it is necessary to ensure maximum loading of the chamber with the processed products. This ensures the maximum surface area to be treated, a high coating spraying rate and good uniformity in thickness [1].

The combination of MSS with a flat disk cathode and MSS with a conical cathode allows one to obtain a high uniformity of the coating thickness on a disk substrate with a diameter equal to the outer diameter of the conical cathode [2]. Such devices are used for applying magnetic coatings to information storage disks.

3 Magnetron Sputtering with Hot Target

In the magnetron sputtering, deposition rates are limited by the ion current on the cathode due to the existence only a sputtering mechanism of the target erosion. Thus, the addition of the target evaporation as the second mechanism of the cathode erosion doesn't have alternatives to the increase of the deposition rates. It can be realized in hot target magnetrons. At the same time, the hot target sputtering system is an intensive investigated for the film deposition of titanium and its compounds [3]. There are three potential mechanisms of enhanced deposition rates: a particle-induced erosion, a sputtering yield increase and the target evaporation (or sublimation) [3]. The input of he each mechanism isn't fully understood and future investigations are required. Besides, technological possibilities of highrate deposition systems and film properties deposited by such techniques are also important.

The main disadvantages of hot target magnetron sputtering are an irregularity of target geometry and a phase transition in target material, a target poisoning at high pressures and a substrate heating. Moreover, the low deposition temperature is required for majority technologies of the material modification. Additional substrate cooling systems are needed.

When working with targets made of materials with a high sublimation rate, the cathode assembly does not need a crucible. This in some cases is more convenient from a technological point of view. Here, the heat-conducting drain also needs to be limited, but perhaps not to the same extent as when working with a liquid target.

For target heating, the magnetron sputtering system with indirect cooling is used (Fig. 4).

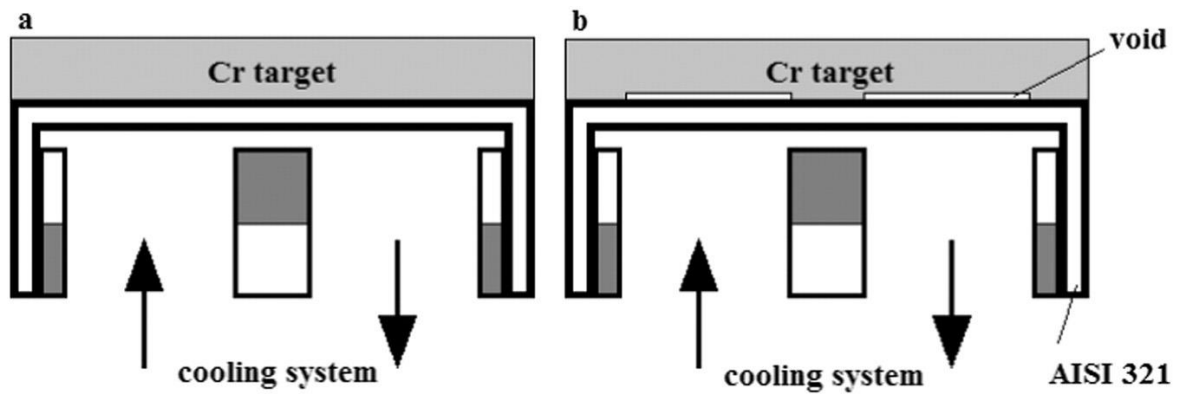


Figure 4 – The scheme of cathode devices with cooled (a) and hot (b) Cr targets

4 Self Sputtering System

It is known that magnetron sputtering systems (MSS) with evaporating targets can be an effective tool for high-rate coatings deposition. Due to the fact that a flow of evaporated particles appears additionally to a flow of sputtered atoms on the target surface, the deposition rate of coatings can be increased by one or two orders [4]. Besides, similar MSSs are able to operate using target material vapors without atoms of sputtering gas. In this case, the target is sputtered by bombarding its surface with ions of the elements from which the target consists of. This mode of the MSSs operation is known in scientific literature as ‘self-sputtering’.

The attractiveness of the self-sputtering mode to create a flux of particles that form coating is stipulated by the fact that in this case there is no need to supply a sputtering gas to the vacuum chamber, which maintains the magnetron discharge in standard modes of MSSs. The limiting concentration of sputtering gas atoms and pressure in the vacuum chamber depends on the geometry, shape and size of targets, configuration of the magnetic field, and power source parameters.

Researchers have established that the below these concentrations and pressure, the magnetron will not operate. Modern MSSs usually function at a chamber pressure of 0,2 - 1 Pa, and voltage of 300-500 V [4] The quite high concentration of sputtering gas atoms in the vacuum chamber, corresponding to this pressure, leads to a problem associated with the penetration of unwanted atoms

into the structure of coatings during their formation. For a number of technologies of optical and electrically conductive coatings deposition, for example, this problem proves to be crucial since the functional properties of coatings formed under such conditions may not have the required characteristics. Moreover, the higher the pressure in the chamber, the lower the deposition rate is. The average energy of the deposited particles is also reduced since they are scattered on sputtering gas atoms because their free path is less than the distance between the target and the substrate being a treated surface. Because of this, the structure of coatings becomes less dense.

The problem to create stable self-sputtering during MSS operation and reduce the operating pressure during coatings deposition has existed for quite a long time. At first, it was tried to be solved with the help of a significant increase in magnetrons power at a direct current in order to provide a higher sputtering rate of target atoms and their concentration near its surface that would be sufficient to maintain a discharge. However, there was a problem related to the discharge instability because of the random arc formation. When powerful pulsed magnetron sputtering systems (HIPIMSS) appeared, it became clear that these devices were characterized by the appearance of self-sputtering because of high pulse power. Moreover, the impulse nature of the power supply to the MSS electrical circuit protects the discharge from the appearance of an arc. Experiments have shown that the density of ionized states in the plasma increases [5]. This contributes to the self-sputtering development. However, due to the fact that the plasma can recombine between the current pulses, a self-sputtering mode at the HIPIMSS operation proved to be very unstable. Therefore, the idea of assisting the magnetron discharge with ion fluxes created by arc evaporators has come. But there is a difficulty in synchronizing the pulses of MSS power supplies and the arc evaporator, as well as the presence of a droplet fraction and a limited number of materials used (the method can be used only for materials with a high self-sputtering yield).

To ensure the purity of magnetron coatings, the methods for maintaining the discharge at a generally reduced pressure, which is much lower than 0.1 Pa, are also contemplated. For this purpose, it is proposed to use an external continuous flux of charged particles, which will produce additional ionization of a discharge gap. As an assisting device, sources of charged particles and a high-frequency electric field are considered [4].

In this connection, the idea of using MSS with evaporating targets for coatings deposition at a general pressure reduced in a vacuum chamber and without a supply of plasma-forming sputtering gas seems very promising. The point is that in this case there is not only a high intensity of atoms emission on the target surface but also a high flux density of deposited particles, which can positively affect the structure and functional properties of coatings formed [3].

5 Thermal and Erosion Processes in the Target

Since thermal processes play a decisive role in enhancing the erosion flow of atoms on the surface of the MSS target, in order to understand the regularities of the rate of erosion, depending on the power parameters of the magnetron, it is necessary to consider in more detail the problem of thermal processes in the cathode node.

Mathematical model of thermal processes and erosion with full or partial thermal insulation of the MSS target

The mechanisms of collision sputtering and evaporation (or sublimation) are of a different nature and do not exert a noticeable influence on each other. Therefore, it can be assumed that the flow of atoms from the surface of a strongly heated target is composed of two independent components: the sputtering and the evaporation. In such a case, the rate of movement of the interphase V on the surface of the target separating the condensed and gaseous phase is represented as the sum $V = V_{sput} + V_{ev}$, where V_{sput} , V_{ev} – the rate of movement of the interphase boundary due to sputtering and evaporation, respectively. In the following, V_{sput} and V_{ev} will be called the sputtering and evaporation rates, and V – the erosion rate

of the target surface. Experimental studies show that some time after switching on the DC power source in the cathode node of the magnetron sputtering system, a stationary temperature state is established. Therefore, a mathematical model of thermal processes and emission of atoms from the surface of a heat-insulated target was developed, which is the equation of the energy balance in the "target in the crucible" system in the steady-state operating mode of the magnetron sputtering system. It is described in detail in [6].

However, with its help it is impossible to obtain data on the evolution of emission processes during transitional periods of work, to take into account the details of the spatiotemporal non-uniform heating and removal of atoms from the target surface, to reveal the patterns of emission in the frequency-pulse mode of operation of the magnetron sputtering system. Therefore, a non-stationary model of thermal processes was developed [6]. The temperature field and evaporation rate are calculated in solving the boundary value problem formulated on the basis of the heat conduction equation. This equation is written in the cylindrical coordinate system with azimuthal symmetry. Taking into account the first-order phase transition it can be represented as follows:

$$\frac{\partial E(z,r,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(z,r) \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial z} \right) + \lambda(z,r) \frac{1}{r} \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(z,r) \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial r} \right)$$

The boundary condition on the treated surface:

$$\lambda(z,r) \frac{\partial T(z,r,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = -q(r,t) + \rho V_{ev}(r,t) \Delta H + Q_{rad}(r,t) + Q_S(r,t)$$

Initial conditions: $T(z,r) = T_0(z,r)$

Oz is perpendicular to the treated surface, along the ion flux direction; Or is directed along the surface.

$E(z,r,t)$, $T(z,r,t)$ are the functions of the thermal component of internal energy and temperature in a target, respectively; $\lambda(z,r)$ is the heat conductivity coefficient of the target material. In (2) $q(r,t)$ is the power density of plasma acting on the target surface, which is assumed to be equal to the ion current power density

W_{ion} generated in the gas discharge region, corrected for the energy of the ions reflected from the surface. The change in the power density of the ion current in time is determined by the oscillogram of the power of the magnetron supply. The distribution q along the target surface corresponds to the spatial profile of the horizontal component of the magnetic field near it.

In equation (2) $V_{ev}(r,t)$ is the evaporation rate of target surface, ΔH is the enthalpy difference between the vapor and condensed phases of the target material, ρ – target density. It also added the flux of heat radiation $Q_{rad}(r,t)$.

Sublimation and evaporation rate is calculated using the Hertz-Knudsen equation [6]. We note that both mechanisms are very similar in nature, so in the future we will not separate them.

The rate of emission of atoms from the surface of the target due to the sputtering mechanism V_{sput} is described in the framework of the Zygmund collision sputtering model [7].

Energy spent on sputtering is taken into account in (2) through Q_s – power density taken away by sputtered particles. This value can be estimated as $S p sput 0$ $Q_s = E_p V_{sput} n_0$, where E_p – is the most probable energy in the sputtered particles spectrum, which is almost equal to $0,5 \cdot U_s$ according to Thompson formula for the sputtered atoms spectrum [6]; U_s – is target surface binding energy, and, n_0 is the target material nuclear density.

The lateral surfaces of the target give heat to the environment due to heat radiation.

References

1. G. Brauer, B. Szyszka, M. Vergohl, R. Bandorf, Magnetron sputtering Milestones of 30 years, *Vacuum* 84 (2010) 1354-1359.
2. G. De Winter, S. Mahieu, I. De Roeck, R. De Gryse, J. Denul: Applied Superconductivity Conference 4-9/9/2002 Boston (United States) “Unbalanced magnetron sputter deposition of biaxially aligned YSZ and ITO films”.
3. D. Mercs, F. Ferry, A. Billard, Hot target sputtering: a new way for high-rate deposition of stoichiometric ceramic films, *Surf. Coat. Technol.* 201 (2006) 2276–2281.
4. Pat. 4842703 (USA), Int. Cl. C23C 14/34. Magnetron cathode and method for sputter coating/ Walter H. Class, James F. Smith. –Issue date 27.06.1989.
5. G.A. Bleykher, V.P. Krivobokov, A.V. Yuryeva, Magnetron deposition of coatings with evaporation of the target, *Tech. Phys.* 60 (2015) 1790-1795.
6. Bleykher G.A. et al. Evaporation factor in productivity increase of hot target magnetron sputtering systems // *Vacuum*. – 2016. – Vol. 132. –P. 62-69.
7. Bleykher G.A. Eroziya poverhnosti tverdogo tela pod deystviem mosh'nyh puchkov zarjzhennyh chastic: avtoreferat diss. ... d. fiz. - mat. nauk. Tomsk, 2011. – 40 c.