

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика
Кафедра Экспериментальной физики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЁНОК ХРОМА С ПОМОЩЬЮ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ (МРС) С ГОРЯЧЕЙ МИШЕНЬЮ УДК <u>538.975</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ41	Койшыбаева Ж.К.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер каф. ЭФ	Сиделёв Д. В			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	Черепанова Н. В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Экспериментальная физика	Кривобоков В.П.	д.ф.-м.н., профессор		

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Физико-технический
Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика
Кафедра Экспериментальная физика

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ЭФ
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
ОДМ41	Койшыбаевой Ж.К.

Тема работы:

Высокоскоростное осаждение плёнок хрома с помощью магнетронной распылительной системы (MPC) с горячей мишенью
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1. Установка магнетронного напыления 2. Прибор для измерения толщины пленок и покрытий (CALOTEST CAT-S-0000) 3. Нанотвердомер (NANO HARDNESS TESTER NHT-S-AX-000X) 4. Прибор для измерения адгезионной прочности покрытий (MICRO-SCRATCH TESTER MST-S-AX-0000)
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Методы осаждения металлических покрытий 2. Осаждение плёнок хрома с помощью импульсной MPC
Перечень графического материала	1. Высокоскоростное осаждение плёнок хрома с помощью магнетронной распылительной системы (MPC) с горячей мишенью 2. High-Rate Deposition of Cr Films by Magnetron Sputtering System with Hot Target 3. Актуальность 4. Цель и задачи 5. Экспериментальное оборудование 6. Методы исследования 7. Режимы осаждения Cr плёнок

	8. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) магнетронного разряда 9. Скорость осаждения плёнок хрома с помощью МРС 10. Оптико-эмиссионный анализ спектра плазмы 11. Твёрдость Cr покрытий 12. Адгезионная прочность Cr покрытий 13. Основные положения, выносимые на защиту 14. Заключение 15. Апробация результатов
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	к. э. н., доцент каф. менеджмента, Черепанова Н.В.
«Социальная ответственность»	к. ф.-м. н., ассистент каф. ПФ, Гоголева Т.С.
«Раздел на английском языке»	ст. преподаватель каф. ИЯ ФТИ, Ермакова Я.В.

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

1. Методы осаждения металлических покрытий
2. Экспериментальное оборудование
3. Осаждение плёнок хрома с помощью импульсной МРС
4. High-Rate Magnetron Sputtering with Hot Target

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
инженер каф. ЭФ	Сиделёв Д.В.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ41	Койшыбаева Ж.К.		

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

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	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 (ПК-2, 4). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий	Требования ФГОС (ПК-1). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
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 (ПК-5, 6, 9). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
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 (ПК-7, 8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учетом 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-10, 11,12). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
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-13, 14). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Р7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	Требования ФГОС (ПК-18, 19, 20). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р8	Заниматься организационно-управленческой деятельностью, владеть приемами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	Требования ФГОС (ПК-15, 16, 17). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р9	Осуществлять научно-инновационную деятельность, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять и коммерциализировать 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-21, 22, 23, 24). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Универсальные компетенции		
Р10	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять свое научное мировоззрение.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р11	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения	Требования ФГОС (ОК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р12	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 (ОК-4, 5, ПК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ41	Койшыбаевой Ж.К.

Институт	ФТИ	Кафедра	Экспериментальная физика
Уровень образования	Магистратура	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> <i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i> <i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке	<i>1. SWOT-анализ</i> <i>2. Бюджет научного исследования</i>
Перечень графического материала	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	Черепанова Н. В.	к. э. н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ41	Койшыбаева Ж.К.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ41	Койшыбаевой Ж.К.

Институт	ФТИ	Кафедра	Экспериментальная физика
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения</i>	-вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) -опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы)
2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	Шум, электробезопасность, пожарная безопасность, требование охраны труда при работе на ПЭВМ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i>	-действие фактора на организм человека; -приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); -предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</i>	-электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); -пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к. ф.-м. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ41	Койшыбаева Ж.К.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 114 с., 36 рис., 14 табл., 60 источников, 1 прил.

Ключевые слова: высокоскоростное осаждение покрытий, магнетронные распылительные системы (МРС), магнетронное распыление с высокой мощностью, хромовое покрытие, горячая мишень.

Объектом исследования является магнетронная распылительная система с частично теплоизолированной мишенью из хрома.

Цель работы – получить данные о влиянии фактора «горячей мишени» на процесс высокоскоростного осаждения плёнок хрома с помощью МРС.

В ходе выполнения научной работы проводились экспериментальные исследования по осаждению хромовых покрытий с помощью магнетронной распылительной системы с горячей мишенью. Проведена характеристика плазмы магнетронного разряда с помощью вольт-амперометрии и оптико-эмиссионного анализа и изучены структура и механические свойства плёнок хрома.

В результате исследования выявлены технологические возможности высокоскоростного осаждения плёнок хрома с помощью МРС с горячей мишенью. Получено, что при осаждении хромовых покрытий с горячей мишенью скорость осаждения увеличивается в 2 раза, потенциально при более высоких мощностях производительность процесса осаждения плёнок хрома может возрасти в 4 раза, при этом преобладающим аспектом будет скорость испарения. Кроме того, плёнки, полученные с помощью системы с горячим катодом, имеют более высокую адгезионную прочность по сравнению с образцами, полученными при помощи МРС с охлаждаемой мишенью.

Оглавление

Введение.....	10
1 Методы осаждения металлических покрытий	14
1.1 Термическое испарение металлов в вакууме	14
1.2 Катодное распыление	17
1.3 Дуговое испарение	19
1.4 Магнетронное распыление металлических мишеней	21
1.5 Производительность современных конструкций MPC.....	33
2 Экспериментальное оборудование.....	40
2.1 Установка магнетронного напыления	40
2.2 Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов	41
2.3 Импульсная магнетронная распылительная система.....	42
2.4 Прибор для измерения толщины пленок и покрытий Calotest CAT-S-0000.....	43
2.5 Нанотвердомер Nano hardness tester NHT-S-AX-000X	45
2.6 Прибор для измерения адгезионной прочности покрытий Micro-scratch tester MST-S-AX-0000.....	47
2.7 Рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-7000S.....	48
4 Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	50
4.1 SWOT-анализ.....	50
4.2 Бюджет научного исследования.....	54
Список публикаций.....	60

Введение

На сегодняшний день техника магнетронного осаждения тонкоплёночных покрытий играет весомую роль для задач по созданию новых материалов в области космоса, медицины, обрабатывающего инструмента и прочего. Магнетронные распылительные системы (МРС) зарекомендовали себя как эффективный инструмент для модификации поверхности материалов в условиях вакуума [1-3]. Они имеют целый ряд технических и технологических преимуществ перед ранее интенсивно используемыми системами термического и дугового испарения, катодного распыления и других методов получения тонкоплёночных покрытий. Существующие конфигурации МРС обладают целым набором параметров, таких как: плотность тока на мишень, рабочее давление в камере, параметры рабочего импульса (длительность, скважность), тип и величина магнитного поля и другое. Это позволяет исследователям использовать магнетронные распылительные системы как инструмент по созданию наноразмерных материалов с уникальными свойствами. В свою очередь, для промышленного применения в первую очередь актуальны задачи по энергоэффективности и производительности МРС.

Существует несколько методов повышения скорости осаждения магнетронных распылительных систем: мультикатодное распыление, распыление из жидкого катода, изменение конфигурации магнитного поля МРС и прочие подходы [3-6].

Вариация магнитной системы магнетронной распылительной системы позволило создать несбалансированные МРС, которые обеспечивают более высокую плотность тока не только на мишень, но и на подложку. Они стали ещё более эффективным инструментом по управлению кинетикой роста покрытий и их свойствами [5-7]. Однако кардинального увеличения скорости осаждения покрытий за счёт повышения плотности тока на мишень не произошло.

Развитие магнетронных распылительных систем с жидким или расплавленным катодом началось еще в 1990^{ых} годах. Сегодня наблюдаются значительные успехи в этом направлении. В ряде работ показано, что скорость осаждения металлических покрытий может быть увеличена в 10 и более раз за счёт включения испарительного механизма в процесс эрозии мишени [8-20]. Главными препятствиями перед промышленным внедрением жидкофазных МРС является их нестабильность работы для ряда металлов, необходимость использования температуростойких тиглей (например: из молибдена).

Мультикатодное распыление [7] для решения задачи по повышению производительности получило наибольшее распространение, однако такой подход требует существенно больших финансовых затрат при создании ионно-плазменной установки. Поэтому крайне важно получить технологию высокоскоростного магнетронного распыления.

Системы с горячим или нагретым катодом могут быть использованы для решения этой задачи [21-22]. Их преимущество заключается в возможности использования уже существующих конструкций МРС или их незначительной доработкой. Основным принцип технологии магнетронного распыления с горячим катодом - 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), при которых возникает процесс испарения мишени. В этом случае будет наблюдаться сублимация материала мишени катода, что приведет к повышению скорости осаждения плёнок за счёт комбинации двух механизмов эрозии катода: распыления и испарения.

При выборе материала катода следует учитывать давление насыщенных паров металлов, т.е. параметр, который свидетельствует о сублимации нагретого материала. Есть несколько металлов, которые могут интенсивно сублимировать при температуре, ниже чем температура плавления. Один из таких металлов – хром.

Плѐнки хрома активно очень активно используются для задач по повышению адгезионной прочности покрытий к подложке, улучшению коррозионной стойкости материалов, а также в декоративных целях [23-25]. В этой связи интерес к распылительной системе с нагретым хромовым катодом еще более актуален.

Цель данной работы - получить данные о влиянии фактора «горячей мишени» на процесс высокоскоростного осаждения плѐнок хрома с помощью МРС.

Задачи:

1.исследовать вольт - амперные характеристики (ВАХ) магнетронного разряда в случае использования полностью охлаждаемой и частично теплоизолированной мишеней;

2.определить влияние фактора «горячей мишени» МРС на скорость осаждения плѐнок хрома;

3.провести оптико-эмиссионный анализ плазмы магнетронного разряда для полностью охлаждаемой и частично теплоизолированной мишени;

4.изучить влияние фактора «горячей мишени» на структуру и механические свойства плѐнок хрома.

Объект исследования – магнетронная распылительная система с частично теплоизолированной мишенью из хрома.

Предмет исследования – производительность МРС с частично теплоизолированной мишенью из хрома.

Научная новизна работы заключается в использовании частично теплоизолированной мишени из хрома для повышения скорости осаждения покрытий за счёт комбинации механизмов эрозии катода: его распыления ускоренным ионами из плазмы магнетронного разряда и испарения из твёрдого состояния.

Практическая значимость работы:

1.Разработана конструкция МРС с частичной теплоизоляцией мишени.

2.Отработаны режимы высокоскоростного осаждения плёнок хрома с помощью МРС с горячим катодом.

Научные положения, выносимые на защиту:

1.Экспериментально показано, что при мощности магнетронного разряда 1,75-2 кВт процесс эрозии катода в системе с частичной теплоизоляцией происходит по двум механизмам: распыления и испарения.

2.Доказано, что фактор «горячей мишени» приводит к повышению адгезионных свойств покрытий из хрома.

Апробация результатов. Основные материалы работы были представлены и обсуждались на научных конференциях и семинарах, указанных ниже:

1.The Third International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, St. Petersburg, Russia, March 28-30 2016.

2.The 43rd International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films: Abstracts, San Diego, April 25-29, 2016.

1 Методы осаждения металлических покрытий

1.1 Термическое испарение металлов в вакууме

Суть метода термического испарения заключается в нагреве исходного материала до температуры плавления $T_{пл}$, фазовом переходе материала в жидкую фазу и дальнейшее повышение его температуры до момента появления интенсивного испарения. В самом простом случае для нагрева материала принято использовать джоулев нагрев, для этого по материалу пропускает ток, который и приводит к разогреву проводника. Тигель (специальная форма для испаряемого материала) должен быть выполнен из материала, имеющего более высокую температуру плавления, чем исходный материал. В табл.1.1 показаны термодинамические параметры основных металлов, применяемых в промышленности для нанесения покрытий. Наибольшее распространение в качестве материала тигля получили молибден, оксидная и нитридная проводящая керамика, вольфрам.

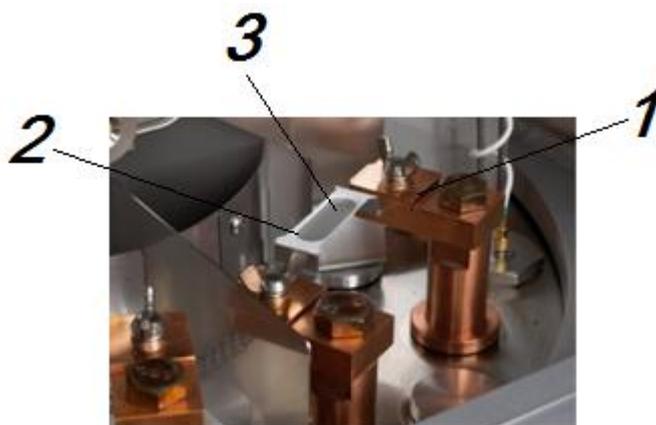


Рисунок 1.1 – Термический испаритель в вакуумной камере: 1 – токовый ввод; 2 – молибденовый тигель («лодочка»); 3 – объём для испаряемого материала.

Схема процесса термического испарения показана на рис. 1.2. Испарение вещества начинается при условии превышения средней колебательной температуры материала над энергией связи атомов материала между собой. В этом случае материал переходит в паровую фазу или сублимирует. На подложку, расположенную напротив термического

испарителя, попадает сублимационный материал. Расчёт скорости испарения может быть произведён по следующей формуле:

$$v_u = 6 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{M}{T_y}}, \quad (1)$$

где M – молекулярная масса (г/моль), T_y – температура условного испарения (температура, при которой давление насыщенного пара вещества составляет 1,3 Па). Такой механизм формирования потока частиц, направленных на подложку, предполагает крайне высокие скорости осаждения плёнок металлов, что учитывается при технологическом использовании. Здесь так же следует заметить инерцию процесса термического испарения, так и сложность в контроле скорости осаждения, что накладывает определённые условия использования этого метода для получения плёнок металлов. Кроме этого, испарительный механизм процесса осаждения плёнок предполагает получение высокого вакуума, т.к. увеличение давления P в рабочей камере при испарении приводит к снижению средней длины свободного пробега λ испарённых частиц:

$$\lambda = \frac{0,5}{P}. \quad (2)$$

Принято считать, что наиболее оптимальный диапазон давлений 10^{-5} - 10^{-3} Па. При более низком вакууме значительно снижается длина свободного пробега испарённых частиц, что приводит к потере направленности потока частиц от испарителя к подложке, соответствующему снижению скорости осаждения материала и загрязнению растущего покрытия газовыми атомами вещества атмосферы рабочей камеры. Возможность получения сверхчистых металлических покрытий при высоком вакууме – одно из основных преимуществ термического испарения металлов над другими методами.

При испарении металлов в вакууме энергия частиц, попадающих на подложку, составляет не более 0,1...1 эВ, зарядовое состояние – нейтральное. Невозможность влияния на структуру растущего покрытия в процессе испарения совместно с неравномерностью осаждения покрытий – основные недостатки данного метода осаждения. Ввиду низкой энергии

конденсирующихся частиц адгезия покрытий, полученных термическим испарением, невысокая.

Таблица 1

Температуры плавления металлов

Элемент	Атомная масса, а.е.м.	$T_{пл}, °C$	$T_y, °C$	Рекомендуемые материалы тигля
Ag	107,9	961	1047	Mo, C
Al	27	660	1150	C, BN
Au	197	1063	1465	Mo, C
Cr*	52	1800	1205	-
Cu	63,5	1083	1273	Mo, C, Al ₂ O ₃
Ge	72,6	959	1251	W, C, Al ₂ O ₃
Mg*	24,3	651	443	FeC
Mn	54,9	1244	980	Al ₂ O ₃
Mo**	95,9	2622	2533	-
Ni	58,7	1455	1510	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂
Pt	195	1774	2090	ZrO ₂
Si	28	1415	1342	BeO, ZrO ₂
Ta**	181	2996	3070	-
Ti*	47,9	1725	1546	-
W**	183,9	3382	3309	-

Примечание:
 * Испаряется из твердого состояния (сублимируется).
 ** Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой.

Испарение материала происходит преимущественно по направлению вперед (на центральную часть подложки), поэтому наибольшая неравномерность по толщине покрытий наблюдается в краевых положениях.

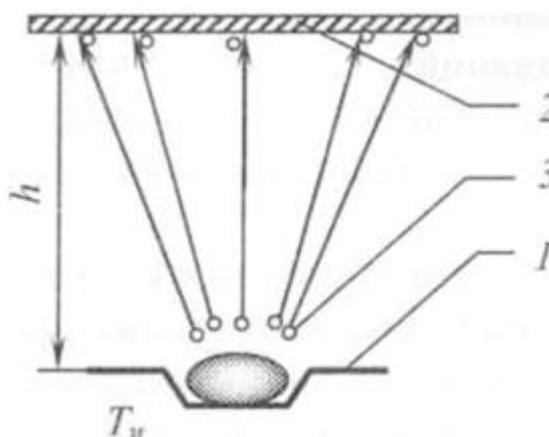


Рисунок 1.2 – Схема процесса термического испарения: 1 – тигель; 2 – подложка; 3 – испарённые атомы.

Одним из основных решений неравномерности по толщине покрытий является удаление подложки от испарителя, использование сферического держателя подложек (максимальная неравномерность наблюдается на планарных подложкодержателях), движение подложки в области осаждения покрытия и использование нескольких испарителей (системы испарителей). Последний подход – получил наибольшее распространение для осаждения покрытий на подложки больших площадей, в частности – на листовое стекло.

1.2 Катодное распыление

Основной механизм катодного распыления основан на выбивании ускоренными газовыми ионами атомов из твёрдого тела (мишени). Специально для этого в разряженной среде подаётся разность потенциалов между катодом (мишенью) и анодом (подложкой), при достижении требуемого вакуума в диапазоне $10 \dots 10^3$ Па происходит ионизация газового промежутка (заполненного аргоном или любым другим инертным газом) за счёт столкновений с ускоренными электрическим полем электронами [3,26]. Типичные для катодного распыления значения напряжения и тока соответствуют 3...5 кВ и 10...100 мА. Столь высокие значения напряжения и давления крайне необходимы при катодном распылении, иначе – ионизация междуэлектродного промежутка будет невелика. Системы с двумя и тремя электродами показаны на рис. 1.3. Расстояние между катодом и анодом в такого рода системах обычно не превышает 50 мм. При увеличении междуэлектродного расстояния ионизация газового промежутка также сильно снижается, что негативно отражается на скорости распыления катода.

Основные преимущества катодного распыления заключаются в:

-высокой однородности покрытий по толщине на подложках большой площади ввиду равномерного распределения плотности тока ионов на катод;

-катодного распыление стабильно, не имеет инерционного характера (как в случае термического испарения), легко автоматизируется и интегрируется в системы автоматизированного управления;

-энергия конденсирующихся на подложке атомов значительно больше, чем в случае термического испарения, это способствует повышению адгезии покрытий к подложке.

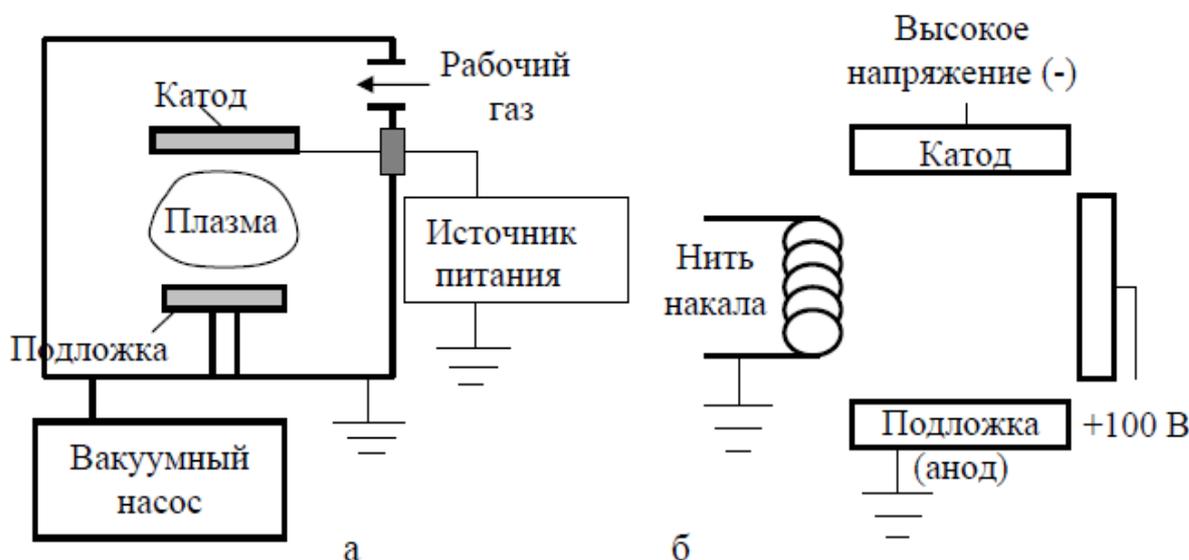


Рисунок 1.3 - Схема нанесения покрытий при диодном (а) и триодном (б) распылении.

К основным недостаткам данного метода осаждения тонких плёнок можно отнести следующее:

-ввиду низкой плотности ионного тока на мишень скорость распыления и соответственно осаждения крайне низкая (скорости порядка 0,1 нм/с), что несравнимо с производительностью процесса термического испарения;

-относительно низкий вакуум в процессе катодного распыления приводит к загрязнению растущего покрытия атомами атмосферы вакуумной камеры и увеличению средней длины свободного пробега распылённых частиц. Картина распыления катода значительно меняется;

-подложка является коллектором электронов, энергия которых может достигать 2...3 кэВ, ввиду этого возможен нагрев подложки и появление радиационных дефектов в структуре растущего покрытия.

Данный метод осаждения тонких плёнок наилучшим образом подходит для нанесения равномерных по толщине тонких покрытий (не более 100 нм).

Триодное распыление стало продолжением развития техники классического катодного распыления. В такой системе дополнительно вводится электрод, имеющий положительный потенциал (порядка 100 В). Эти конструктивные изменения приводят к получению большей плотности ионного тока на катод и повышению скорости осаждения покрытий на подложке.

1.3 Дуговое испарение

Метод дугового испарения основана на эрозии мишени под действием дугового разряда. При зажигании вакуумной дуги, происходит контракция на мишени катода с образованием катодного пятна, из которого выходит пар испаряемого материала, ионизирующийся в электрическом поле вблизи катода [27-29]. Катодная пятно - это светящая область, образованная из ионизированного материала катода, на поверхности катода, которая имеет высокую плотность проходящего через него тока ($j \sim 10^5$ А/см²). Так как эрозия протекает только на катоде (анод не эродируется), то реализуется катодная форма вакуумной дуги. Продукты эрозии разлетаются изотропно в пределах полусферы и содержат капельную, паровую и ионизированную фазы. Степень ионизации продукта эрозии изменяется в пределах от 15 до 80 %, а средняя энергия ускоренных ионов – десятки эВ. Так как для катодной формы дуги существует минимальный ток, выше которого она горит устойчиво, то для стационарного режима генерации необходимо использовать токи выше критического значения (обычно 10-120 А) [28-31].

В процессе дугового испарения происходит беспорядочное перемещение катодного пятна. Попытки установить контроль над перемещениями катодного пятна привели к созданию метода управляемого дугового испарения. С этим методом можно наносить покрытия различного

состава. На скорость перемещения катодного пятна ($\sim 10^2$ м/с) влияют следующие факторы: материал катода, присутствие примесей, давление в камере и наличие внешнего магнитного поля. В процессе нанесения можно контролировать концентрацию ионов испаряемого материала. Для контроля концентрации ионов не требуется газовая атмосфера, что позволяет применять его в сверхвысоковакуумных установках. Можно наносить слои тугоплавких металлов с мелкозернистой структурой, но требуется определенная осторожность при осаждении легкоплавких металлов Al и Cu, для того чтобы предотвратить образование нежелательной микроструктуры покрытия. Также можно получить пленки TiO_2 и TiN с хорошей структурой и адгезией.

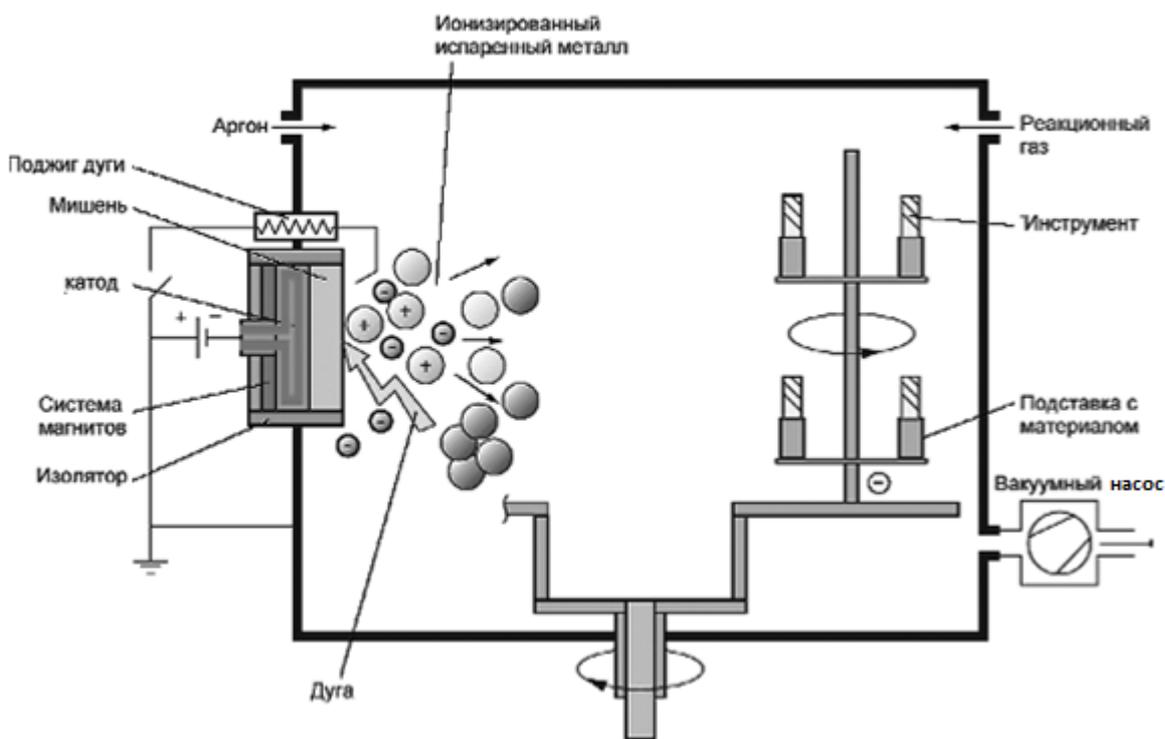


Рисунок 1.4 - Схема нанесения покрытий методом дугового испарения.

Было установлено, что при наложении магнитного поля можно фокусировать плазменный поток, увеличить скорость осаждения, ускорить ионы и изменить свойства пленок. Магнитное поле крайне сильно влияет на скорость и направление перемещения катодных пятен. В работе [30] авторы применили дуговой разряд для нанесения алмазаподобного покрытия, где максимальная скорость осаждения покрытий составила 4 мкм/мин.

Преимуществами нанесения плёнок вакуумным дуговым методом являются:

- возможность регулирования скорости нанесения покрытия путем изменения силы тока дуги,

- возможность управлять составом покрытия, используя одновременно несколько катодов или один многокомпонентный катод,

- высокая адгезия покрытий,

- возможность получения тонких пленок металлов, вводя в камеру реакционный газ.

Несмотря на превосходные механические свойства покрытий, получаемых вакуумно-дуговым методом, однородное нанесение их на подложки большой площади затруднено.

1.4 Магнетронное распыление металлических мишеней

Магнетронные распылительные системы (МРС) пришли на смену системам катодного распыления, которые интенсивно применялись при производстве тонкоплёночных покрытий в полупроводниковой промышленности, и начали использоваться с начала 70-х годов для нанесения тонких плёнок [1-2]. Внедрение технологий магнетронного распыления, привело к созданию серьёзной конкуренции другим промышленным технологиям формирования плёнок металлов, таким как: термовакuumное и электронно-лучевое испарение. В настоящее время МРС получили широко применение в области нанотехнологий. С помощью магнетронных распылительных систем наносят покрытия различных составов, имеющие толщину от единиц нм до десятков мкм.

Преимуществами МРС являются:

- нанесение покрытий сложного состава из сплавов металлов;

- получение покрытий с хорошей однородностью по толщине и структуре на подложках больших размеров;

-невысокие тепловые нагрузки на подложку.

К недостаткам МРС 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)

Кратко рассмотрим принцип формирования стационарного магнетронного разряда, генерируемого при помощи МРС, и процессы, происходящие в межэлектродном промежутке. На рис. 1.5. представлен дисковый магнетрон, состоящий из катода 1, магнитопровода 2, магнитной системы 3, анода 4, электростатического экрана 5. Штуцера 6 предназначены для подачи воды внутрь корпуса магнетрона для охлаждения катода 1. Отсутствие охлаждения мишени для такого рода конструкций МРС приведет к перегреву катодного узла и невозможности обеспечения работоспособности системы.

В начальный момент времени на катод (мишень) подается отрицательный потенциал относительно анода, что приводит к интенсивной ионизации атомов рабочей среды и формированию плазмы в области тлеющего разряда. Положительные ионы ускоряются в прикатодном слое в область мишени. По расчетам, проведенным в работе [32], доля ионов в области катодного слоя составляет ~ 90% от общего тока. Ускоренные ионы приобретают энергию порядка 0,5...0,7 кэВ, достаточную для распыления материала мишени. Распылённые частицы, имеющие энергию порядка 10...15 эВ, преодолевают межэлектродное пространство и конденсируются на подложке.

Магнитное поле МРС играет роль ловушки для электронов. Захваченные магнитным полем электроны совершают прецессии, что приводит к повышению частоты их столкновений с атомами рабочей среды. Таким образом, существенно повышается коэффициент ионизации плазмы и

плотность ионного тока на мишень по сравнению с обычными диодными системами. Характерные значения вектора магнитной индукции в прикатодной области составляют 10...100 мТл. Ионы, имеющие меньшие значения ларморовского радиуса, не подвержены действию магнитного поля.

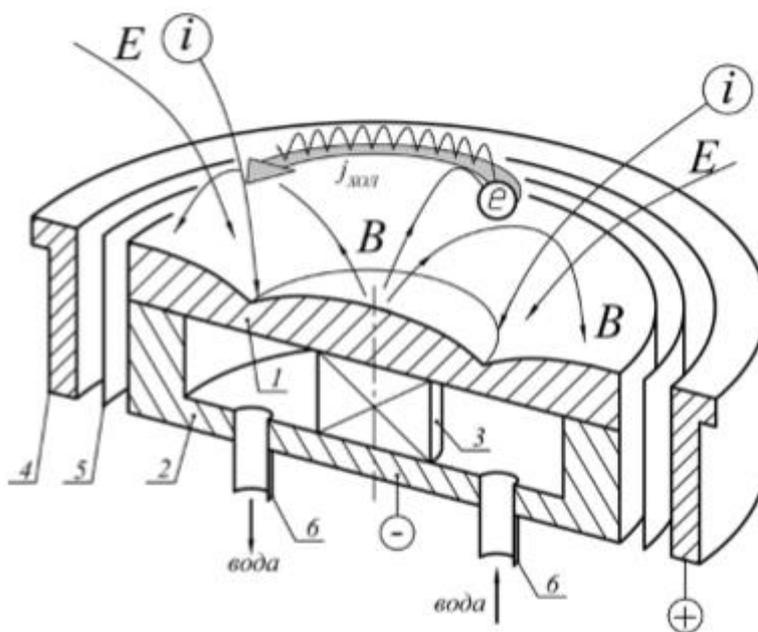


Рисунок 1.5 - Схема магнетронной распылительной системы и движение заряженных частиц в разрядном промежутке: 1 - катод-мишень; 2 - магнитопровод; 3 - магнит; 4 - анод; 5 - электростатический экран; 6 - штуцер подачи воды.

Производительность магнетронных распылительных систем – невелика (не более 2 мкм/мин).

В настоящее время создано большое число конструкций и прототипов МРС, которые классифицируют следующим образом:

- по геометрии (планарные, дисковые, цилиндрические, сложной геометрии и др.);
- по типу источника питания (на постоянном токе, на переменном токе, импульсно-периодические, пакетные);
- по типу магнетронного разряда (стационарные, сильноточные);
- по рабочему диапазону частот источника питания (низкочастотные, среднечастотные, высокочастотные);

-по принципу формирования магнитного поля (на постоянных магнитах, с помощью электромагнитов);

-по типу магнитного поля (сбалансированные, несбалансированные);

-по типу мишени (с твердотельной мишенью, с жидкофазной мишенью).

В зависимости от типа технологической задачи прибегают к использованию той или иной конфигурации МРС. Для осаждения металлических плёнок в большинстве своем используют планарные МРС на постоянном токе. Процесс напыления реализуется исключительно в среде инертного газа при давлениях порядка $10^{-2} \dots 10^{-1}$ Па. Для повышения производительности напылительной системы и минимизации загрязнения металлических покрытий химическими включениями используются рабочие режимы, обеспечивающие максимальную мощность разряда при минимальных рабочих давлениях. При низких мощностях разряда происходит встраивание атомов и ионов рабочей среды (преимущественно атомов Ag) в структуру покрытия, тем самым ухудшаются функциональные характеристики плёнок. Характерные значения скоростей осаждения плёнок металлов при использовании МРС постоянного тока – не более 2 мкм/мин.

Импульсно-периодические МРС начали широко применяться для задач по реактивному осаждению плёнок химических соединений (оксиды, нитриды, сульфиды металлов и пр.) [33-36]. Работа магнетронов постоянного тока в реактивной среде сопряжена с целым рядом технологических трудностей: гистерезис, длительность выхода магнетрона в рабочий режим, снижение производительности, электрические пробой на поверхности катода. Использование импульсной системы питания МРС позволяет дополнительно обеспечить подачу положительного потенциала на катод с частотой 10...350 кГц. За счет этого происходит компенсация нежелательного положительного заряда на поверхности мишени электронами из плазмы. Такой подход позволяет исключить большинство проблем реактивных процессов. Кроме того, импульсные системы крайне интересны и для осаждения плёнок

металлов. Варьируя параметрами рабочего импульса, можно достичь изменений не только в производительности магнетронной распылительной системы, но и в свойствах получаемых покрытий за счёт изменения характеристик потока осаждаемых частиц на подложку. В этой связи, импульсные системы более привлекательны и для осаждения плёнок металлов.

Следующим шагом развития импульсно-периодических МРС стало использование дуальных систем, которые представляют собой два параллельно соединенных одиночных магнетрона (рис. 1.6), в зарубежной литературе принято обозначение «Twin-Mag» [7]. Основная схема работы устройств такого типа построена на попеременном выполнении каждым магнетроном функций катода и анода.

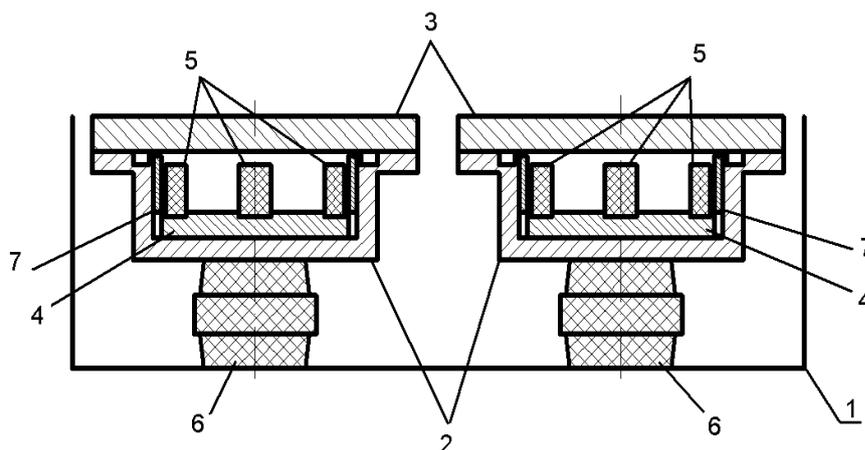


Рисунок 1.6 - Схема дуальной МРС: 1 – общий корпус; 2 – планарные магнетроны; 3 – мишень; 4 – магнитопровод; 5 – магниты; 6 – изоляторы; 7 – шунт.

Потребность в создании и разработке дуальных МРС возникла для задач высокоскоростного осаждению пленок оксидов и нитридов металлов высокого качества (TiO_2 , TiN , Al_2O_3 , AlN). Дуальная система позволяет существенно упростить процесс отработки режима работы (уменьшение времени выхода в стабильный режим), повысить стабильность системы в течение всего технологического цикла и увеличить производительность.

По типу формирования импульсного питания различают:

- источники питания (ИП) постоянного тока;
- источники питания переменного тока.

В ИП постоянного тока происходит преобразование постоянного тока в импульсный посредством включения электрических ключей (20...350 кГц). Формирование импульсного питания из синусоидального напряжения реализуется путем использования преобразователя промышленной частоты (50 Гц) в среднечастотное.

Для дуальных систем важным параметром их работы является длительность паузы между рабочими (отрицательными) импульсами. При изменении значения потенциала на катоде происходит «рассеивание» плазмы, обусловленное процессом диффузии зарядов на стенки камеры, арматуру и т.д. (поддержания разряда в период реверса - не происходит). В работе [33] показано, что для достижения эффективной работы импульсных МРС в реактивной среде, длительность положительного импульса (t^+) должна составлять не менее 0,4...1 мкс. При невозможности обеспечения таких значений t^+ происходит неизбежное накопление разряда и последующее падение производительности системы. В зависимости от типа магнитного поля $t_{\text{рассеивания}}$ варьируется в области 10...40 мкс. Поэтому необходимо использовать источники питания с длительностью положительной паузы не более, чем время рассеивания значительной доли плазмы.

Характерные значения скоростей осаждения пленок металлов и их соединений, свойственных импульсно-периодическим системам и дуальным МРС в зависимости от осаждаемого материала – не более 2 мкм/мин и 0,5 мкм/мин, соответственно.

На настоящий момент проведено значительное число теоретических и экспериментальных изысканий по нахождению эффективных режимов работы, оптимальных геометрических конструкций магнетронов и их источников питания для задач по улучшению функциональных характеристик покрытий и производительности напылительных систем. Первый тип задач успешно решается путем вариации рабочих параметров напылительной системы или включением дополнительных технологических этапов модификации материала (термический отжиг, выдержка в реактивной среде,

имплантация и пр.). Решение задач второго типа проходит с меньшими успехами, хотя уже разработано большое число практических подходов. Основные пути повышения производительности импульсных магнетронных систем основаны на мультикатодном распылении, использовании систем с жидким катодом, изменение конфигурации магнитного поля МРС и прочие подходы.

В последнее время большую популярность для задач по осаждению тонкопленочных материалов получило магнетронное распыление импульсами большой мощности, так называемые системы HiPIMS [37]. Сильноточные МРС характеризуются средними амплитудами напряжения и тока порядка 1...2 кВ и 100 А, соответственно. Формирование плазменных разрядов столь больших токов обусловлено характерными параметрами импульсного питания: частота 50...1000 Гц, скважность 10...100, длительность импульса 10...1000 мкс. Для исключения перехода разряда в дугу применяют «пакетное» питание. Длительность каждого отдельного импульса в пакете ограничивается характерной длительностью контракции сильноточной формы разряда и переходом в дугообразную форму. Высокая плотность тока на мишень в течение одного рабочего импульса позволяет качественно повысить параметры получаемых покрытий. В работе [38] системы HiPIMS использовались для осаждения более твёрдых плёнок углерода, чем в случае использования стационарного магнетронного разряда. Такой результат был получен благодаря целому ряду важных аспектов сильноточного магнетронного распыления, а именно: большая доля ионизованных состояний в потоке распыленных частиц (~70-90%) и высокая плотность плазмы (~ 10^{13} см⁻³). Распылённые атомы и ионы углерода в момент реверса ускорялись в противоположном катоду направлении (вытягивались из плазмы) и интенсивно бомбардировали растущую пленку. В результате чего микроструктура покрытий становилась мелкозернистой, отжигались дефекты в пленке. Разница в значениях микротвердости покрытий следующая: 17 ГПа – в случае использования HiPIMS, 7,3 ГПа – для МРС на постоянном токе.

Следует отметить, что увеличение скорости осаждения при использовании сильноточных магнетронов при одинаковых условиях эксперимента (распределение и вектор напряженности магнитного поля, давление, остаточный вакуум и пр.) наблюдалось только для реактивных процессов, т.к. становится возможным использование режимов осаждения при не полностью окисленной мишени. В системах, где осаждение производится исключительно в среде инертного газа, скорость осаждения покрытий может незначительно снижаться.

В общем случае, скорость осаждения покрытий при помощи вышеописанных модификаций МРС в зависимости от типа материала катода, газовой среды (давление, тип газа) и источника питания (скважность, электрические параметры) не превышает значений 2 мкм/мин, что недостаточно для постоянно повышающихся требований, предъявляемым к такого рода устройствам. Использование стационарных процессов, а именно процесса распыления материала катода, не позволяет обеспечить более высокие параметры по осаждению покрытий (~ 5...10 мкм/мин и 2...5 мкм/мин для стационарных и реактивных процессов, соответственно). В связи с этим актуальной задачей в области техники напылительных систем становится разработка новых типов магнетронов более высокой производительности (высокоскоростных МРС). Под высокоскоростными системами в данном случае понимаются МРС, характеризующиеся скоростями осаждения порядка 1...10 мкм/мин.

В настоящее время усиленно ведутся разработки высокоскоростных систем осаждения тонкопленочных материалов с заранее заданными свойствами на основе источников генерации плазмы. Стационарные системы, использующие распыление в качестве основного процесса перевода материала твердотельной мишени в атомарное состояние для последующей конденсации их на подложке, не позволяют обеспечить высокоскоростные режимы осаждения материалов высокого качества. Попытки повысить качество покрытий, осаждаемых с помощью дугового испарения и др., путем

исключения капельной фракции и кластеров атомов из потока осаждаемых частиц на подложку пока также безуспешны. Практически безальтернативный выход из сложившегося положения – использование дополнительных физических процессов для перевода материала мишени в парообразное состояние. Для детерминации данного понятия будет использоваться термин «эрозия» мишени [39]. Таким образом, теперь под повышением производительности системы для осаждения покрытий будем подразумевать увеличение эрозии материала мишени и конденсации его на подложке.

С практической точки зрения единственным дополнительным физическим механизмом, позволяющим повысить скорость эрозии мишени, является испарение. Характерные скорости осаждения материалов при испарительном процессе значительно выше, чем в случае распыления. Одни из первых исследований в области повышения скорости осаждения тонкопленочных материалов за счет испарения были проведены еще в 1978 году. Повышение интенсивности эрозионных процессов, приводящих к увеличению плотности потока материала мишени к подложке, достигалось путем использования магнетрона с теплоизолированным катодом. В таком случае, энергия ионов плазмы, бомбардирующих мишень, не отводится от катодного узла за счет охлаждения, а остается в системе. Приток энергии обуславливает фазовое превращение материала твердотельного катода. Дополнительно к стационарному процессу распыления прибавляется испарительная компонента. В результате чего достигаются очень высокие скорости осаждения, например для меди $\text{Cu} \sim 5,6$ мкм/мин.

Аналогичный эффект эрозии материала наблюдается в случае воздействия мощных импульсных пучков заряженных частиц на вещество, описанных в работах Блейхер Г.А., Кривобокова В.П. и др. [9-13].

Достаточно высокие показатели производительности и качества получаемых покрытий с помощью стационарных магнетронных систем привели к стагнации развития направления плазменной техники, базирующейся на испарении. С 2004 года работы в этой области получили

новый импульс к развитию в виду необходимости создания технологических установок с увеличенной производительностью для модифицирования материалов, используемых в космической отрасли, энергетике и др.

В работах научного коллектива под руководством Кривобокова В.П. [14-20] рассмотрены физические механизмы эрозии жидкофазной мишени МРС при осаждении пленок металлов в режимах с рабочим газом и без (процесс самораспыления). Схема МРС с теплоизолированным катодом представлена на рис. 1.7. Большое внимание было уделено вопросу соотношения испарительной и распылительной компонент коэффициента эрозии материала мишени. Согласно экспериментальным данным определено, что при увеличении плотности мощности разряда наблюдается нелинейный рост скорости испарения материала мишени. В случае осаждения пленок Cu, Pb и Al испарительный компонент становится заметным на фоне распыления, когда температура мишени превышает точку плавления в 1,3..1,5 раза.

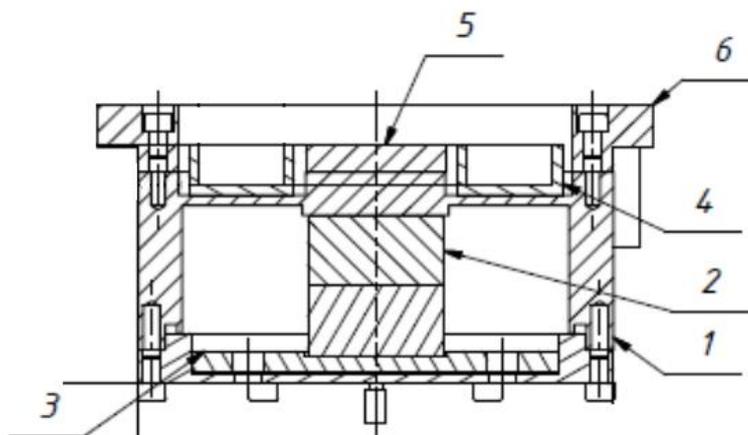


Рисунок 1.7 - Теплоизолированный катодный узел МРС: 1 – корпус, 2 – центральный магнит, 3 - магнитопровод, 4 – тигель, 5 – полюсный наконечник, 6 – тепловой экран.

Результаты численного моделирования процесса эрозии жидкофазной мишени МРС хорошо коррелируют с экспериментальными данными [18,20]. Максимальные значения скорости осаждения пленок Cu, достигнутые в ходе проведения исследований, составляют ~ 12 мкм/мин при токе разряда 8А. Авторами отмечен высокий потенциал использования систем с теплоизолированным катодом для технологического применения. Получено, что использование тигля с малым значением степени черноты (ϵ_T) позволяет

значительно понизить мощность МРС для достижения оптимального рабочего режима. Данный аспект в будущем может сыграть значительную роль при создании промышленных установок на базе МРС такого типа.

Исследования магнетронного разряда с расплавленным медным катодом также были проведены научной группой Ходаченко Г.В. [40], в результате чего определено, что скорость эрозии медной жидкофазной мишени в магнетронном разряде может достигать ~ 12 мкм/мин на расстоянии 26 см при плотности мощности на мишень 330 Вт/см². Авторы работы отмечают, что столь высокая производительность МРС с теплоизолированным катодом возможна благодаря режиму самораспыления.

Однако магнетронные системы с теплоизолированным катодом имеют ряд недостатков, в числе которых:

- проблема смачиваемости материалов тигля и катода и их температуростойкости. По этой причине в качестве тиглей можно использовать только ограниченный набор материалов: молибден, вольфрам и углерод (исключительно в качестве модельного материала);

- наличие кластеров и капель в эрозионном потоке. По первым оценкам, количество капельной фракции в эрозионном потоке значительно меньше, чем в потоке испаренного материала дуговых испарителей. Для исключения капельной составляющей в структуре покрытий, по-видимому, необходимо использовать системы, обеспечивающие кратковременные процессы фазовых превращений материала катода;

- нет возможности реализации процессов осаждения пленок химических соединений (напр. Al₂O₃, TiO₂ и пр.) в виду того, что в среде реактивного газа расплавленный металл практически моментально переходит в температуростойкое химическое соединение, прекращая процесс генерации плазмы.

Для исключения перегрева подложек в процессе осаждения необходимо обеспечить интенсивное охлаждение ввиду большого теплового потока излучения от нагретого катодного узла.

Авторам работ [41-42], используя систему с неполной теплоизоляцией катода, удалось достичь высокоскоростного осаждения пленок TiO_2 и TiN (~1 мкм/мин). Одна из основных причин вышеописанного эффекта заключается в наличии испарительной компоненты эрозии материала мишени. При этом после разогрева катода и подачи реактивного газа в рабочую камеру разряд поддерживался в стационарном состоянии, чего не происходило в случае использования жидкофазных МРС. Это обусловлено тем, что образование химического соединения происходит только в приповерхностных слоях материала катода и с меньшей интенсивностью. В то же самое время, увеличивалась глубина внедрения атомов реактивного газа внутрь катода за счет роста коэффициента диффузии при повышении температуры катода. В таком случае, они наблюдали высокую степень стабилизации реактивного процесса, в особенности для осаждения пленок TiN . Для обеспечения такого процесса была разработана специальная форма катода, позволяющая снизить теплоотвод от мишени. Открытой проблемой остается большой тепловой поток в виде излучения от разогретой до высоких температур мишени.

Серия теоретических расчетов и экспериментов по исследованию сильноточного магнетронного разряда для осаждения функциональных покрытий проведена в МИФИ [43]. Разработана технология, позволяющая производить осаждение высококачественных пленок $\delta\text{-TiN}$ на титановую фольгу без дополнительного воздействия (отрицательное смещение, разогрев подложки и пр.). Что стало возможно благодаря тому, что степень ионизации эрозионного материала достигает 90%. В основу их разработки положена сильноточная форма магнетронного разряда (СИМР), но значительно отличающаяся от используемой повсеместно системы HiPIMS. Суть этих отличий заключается в существенной разнице вкладываемой энергии в импульс. В СИМР энергия в одном импульсе может быть доведена до 3 кДж, в то время как в HiPIMS – не более 100 Дж. Использование столь высокомоментных импульсов возможно благодаря увеличению их длительности до 50 мс, применение импульсов такой длительности в стандартных

сильноточных магнетронах приводит к генерации дугового разряда. Для формирования СИМР авторы работы используют предварительную ионизацию разрядного промежутка, позволяющую эффективно стабилизировать процесс и исключить дугообразование. Согласно первым оценкам, максимальные значения скоростей осаждения пленок металлов могут достигать нескольких мкм/мин. Отсутствие капельной фракции в получаемых пленках объясняется расплавлением только приповерхностного слоя (порядка 50 мкм) материала катода за время одного импульса.

Авторы данной работы отмечают большой потенциал магнетронных напылительных систем, где эрозия материала мишени происходит в большей степени за счет испарения. По их оценкам при условии работы систем СИМР в режиме самораспыления осаждение функциональных покрытий может производиться при давлениях ниже 10^{-2} Па. В таком случае, будет реализован не только высокоскоростной режим, но и существенно возрастет качество наносимых покрытий. Установки такого рода позволят коренным образом изменить технику и технологии материаловедения современной промышленности. Таким образом, разработка опытных установок высокоскоростного осаждения функциональных покрытий является одной из актуальных задач в области современных технологий материаловедения. Следует отметить, что установки такого рода обязательно должны подразумевать использование плазмы для эрозии материала мишени, т.к. в противном случае – это возврат к системам термического испарения материалов, где существенно ниже значения качественных характеристик получаемых материалов.

1.5 Производительность современных конструкций МРС

Скорость распыления пропорциональна плотности мощности тока ионов, экстрагируемых из области генерации плазмы и ускоряемых в прикатодном промежутке до энергий в несколько сотен электронвольт.

Поэтому производительность магнетронных распылительных систем напрямую зависит от плотности ионного тока на мишень. В современных источниках питания стабильность скорости напыления обеспечивается за счёт режима стабилизации выходной мощности. В связи с этим необходимым фактор – повышение мощности, выделяемой в катоде.

МРС на постоянном токе характеризуются наибольшими скоростями осаждения ввиду того, что усреднённая мощность постоянна и достигает наибольших значений. Эпюры тока и напряжения показана на рис. 1.8.

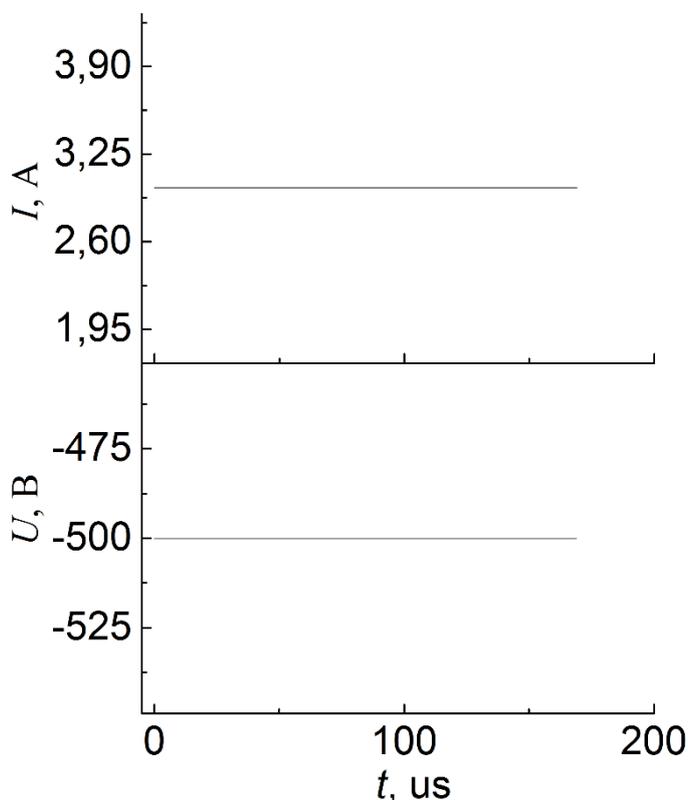


Рисунок 1.8 – Эпюры тока и напряжения разряда МРС на постоянном токе.

Если рассматривать импульсные системы (рис. 1.9), то тут огромную роль играет скважность источника питания. Варьируя этим параметром можно существенно изменять поток осаждаемых частиц (его плотность, энергию и др.) за счёт вариации импульсной мощности.

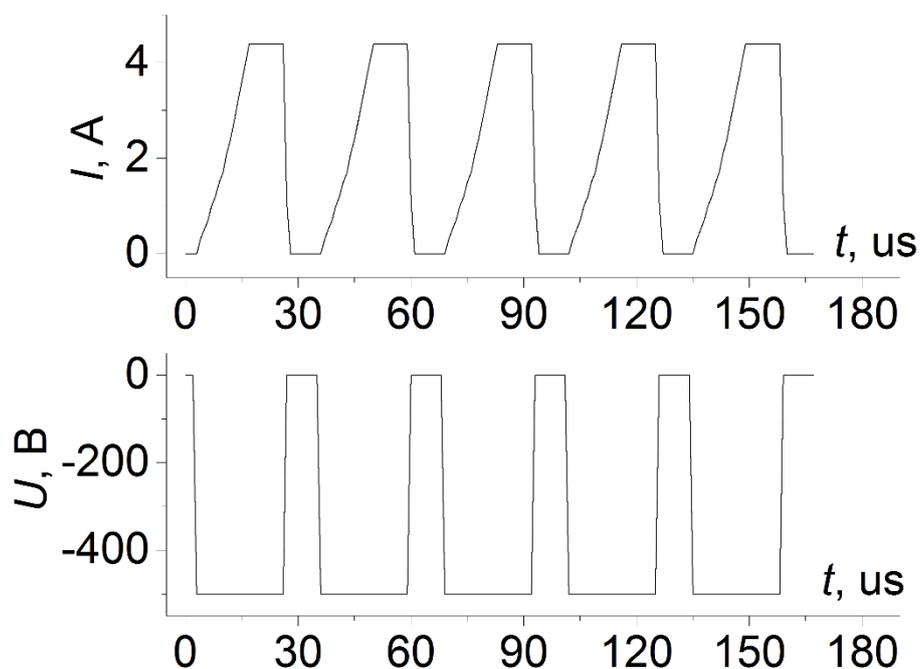


Рисунок 1.9 – Эпюра тока и напряжения разряда импульсной МРС на постоянном токе.

Здесь необходимо привести основополагающие термины для импульсной системы:

1.Скважность источника питания – отношение периода импульса к длительности рабочего импульса.

2.Рабочий импульс – часть импульса, когда на катод подаётся отрицательное напряжение.

3.Частоты следования импульсов – величина, обратная периода следования импульсов.

4.Импульсная мощность – мощность в импульсе (в определенный момент времени).

5.Усреднённая мощность по периоду – средняя мощность в периоде.

6.Импульсный ток – пиковый ток в импульсе.

Импульс тока магнетронного разряда можно поделить на три составляющие:

-стадия генерации плазмы, соответствует области увеличения тока разряда. Свидетельствует о нарастании плотности ионизованных состояний в междиодном промежутке;

-стационарный разряд, соответствует выходу тока в импульсе в насыщении и его стабилизации;

-стадия распада плазмы, возникает при окончании подачи напряжения на катод. В этом случае плазма начинает рассеиваться, уходя на катод, стенки вакуумной камеры и другие элементы.

Варьируя параметрами рабочего импульса можно получить различные комбинации длительностей каждой из этих трёх стадий. Что, в свою очередь приводит, к существенным изменениям вложенной энергии в импульс. Ярким примером этого, являются системы с высокой скважностью, где соотношение средней и пиковой мощностей может различаться в несколько раз. Эти системы интересны именно тем, что они способны обеспечивать крайне высокие мощности на катоде, что выгодно для задачи по повышению скорости осаждения покрытий. В этом случае будет уместно упомянуть сильноточные магнетронные распылительные системы ещё раз и остановится на них более подробно (рис. 1.10).

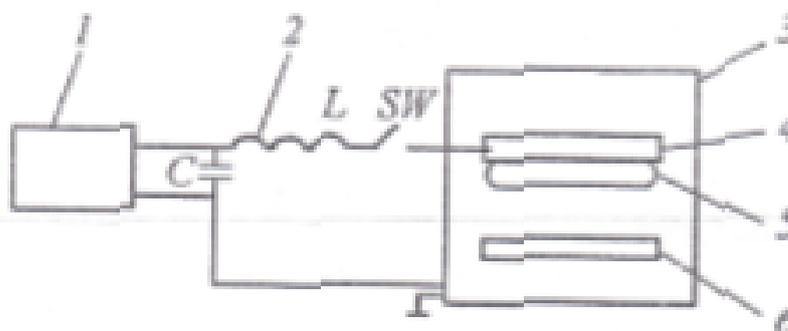


Рисунок 1.10 – Схема магнетронной распылительной системы с импульсами высокой мощности [44].

Магнетронное распыление импульсами высокой мощности (в зарубежной литературе - HiPIMS) – это новая PVD-технология для предварительной обработки подложки и нанесения покрытий. Как отражено в названии, HiPIMS является технологией магнетронного распыления с важным отличием – мощность, выделяемая на катоде, составляет 1-3 kW/cm², что в 100 раз больше, чем в традиционном магнетронном распылении. Мощность используется в коротких импульсах и малом коэффициенте заполнения. Такие

ограничения обусловлены необходимостью снизить тепловую нагрузку на катод, иначе – он просто расплавится.

Если говорить о соотношении скоростей осаждения сильноточной МРС к МРС на постоянном токе или среднечастотной импульсной (рис. 1.11), то следует заметить, что скорости осаждения в сильноточной форме существенно ниже.

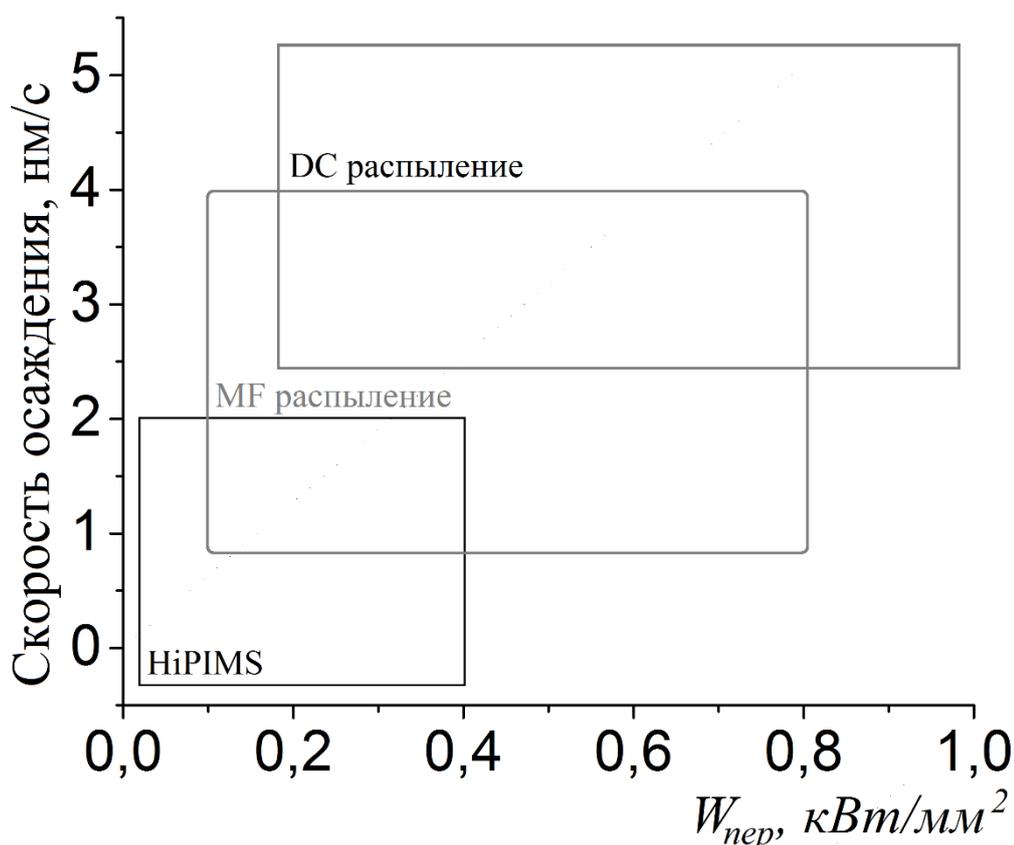


Рисунок 1.11 – Производительность современных типов МРС ($W_{пер}$ – усредненная мощность по периоду).

Такая зависимость следует из особенности формирования сильноточной формы магнетронного разряда. Основные причины снижения скорости осаждения HiPIMS следующие:

- низкая мощность по периоду импульса из-за высокой скважности источников питания;
- потери потока распыленных частиц в режиме самораспыления;
- меньший коэффициент распыления материала мишени ионами вещества мишени;
- повышение плотности покрытий;

- распыление растущего покрытий ионами плазмы;
- снижение величины магнитного поля МРС.

Низкая мощность по периоду импульса обусловлена высокой скважностью источника питания. Выбор высокого диапазона скважности источника питания обусловлен необходимостью ограничения тепловой нагрузки, приходящей на катод.

В сильноточном режиме при достаточной длительности импульса (обычно более 50 мкс) возникает режим самораспыления катода, когда процесс его распыления реализуется не только с помощью ионов рабочего газа, но и ионами материала мишени [37]. В этой связи, снижается доля потока вещества материала мишени, достигшего подложки, т.к. атомы материала мишени имеют вероятность быть ионизованными и ускориться в область мишени. Этот эффект более выражен в случае, когда образуется интенсивный поток материала мишени за счёт его локального испарения ввиду большой импульсной энергии.

С вероятностью ионизации потока распыленного материала мишени связан и другой фактор – меньший коэффициент распыления. Этот показатель может привести к незначительному снижению скорости осаждения покрытий, т.к. в общем виде при распылении материала мишени ионами этого же материала коэффициент распыления снижается на 5-15%, а учитывая количество таких ионов, то изменение скорости осаждения может достигать не более 5%.

В ряде экспериментальных работ было замечено, что при использовании сильноточной формы магнетронного разряда плотность осаждаемых покрытий увеличивается от 5 до 30%, что также влияет на скорость осаждения покрытий.

Сильноточная форма магнетронного разряда характеризуется крайне высокими значениями плотности ионного тока в разряде, если для классического магнетронного распыления эти значения обычно не превышают 10^{11} см⁻³, то для HiPIMS – 10^{13} см⁻³ и выше. Это различие способствует более

высокой ионизации междиодного промежутка не только около катода, но и в области подложки, особенно используя несбалансированные конструкции МРС. В этой связи актуальным становится травление растущей плёнки ионами из плазмы.

Кроме того, было показано, что формирование сильноточной формы разряда приводит к изменению распределения силовых линий магнитного поля МРС, которое влияет на изменение профиля распыления катода магнетрона. Возникают области повышения и снижения скорости осаждения покрытий.

Таким образом, сильноточные МРС могут быть использованы для повышения качества и функциональных характеристик осаждаемых покрытий. Повышение скорости осаждения покрытий остаётся пока нерешённой задачей.

2 Экспериментальное оборудование

2.1 Установка магнетронного напыления

Установка магнетронного напыления собрана на базе турбомолекулярного насоса Shimadzu (рис. 2.1).

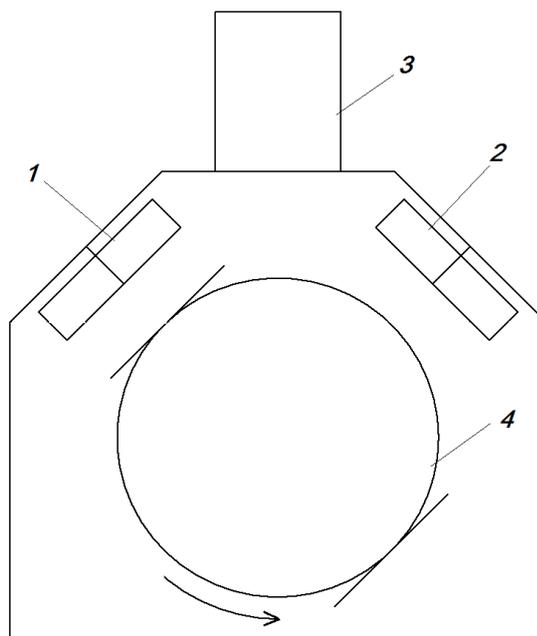


Рисунок 2.1 - Схема установки магнетронного напыления: 1 – ионный источник; 2 – магнетронный источник; 3 – турбомолекулярный насос; 4 – подложкодержатель.

Вакуумная система служит для создания необходимого разрежения в рабочей камере для осуществления процесса ионной очистки подложек и напыления пленок. Остаточное давление в рабочей камере 3×10^{-3} Па. В вакуумной камере расположены магнетронный источник, вращающийся подложкодержатель для 2 образцов и ионный источник с замкнутым дрейфом электронов.

Управление работой установки осуществляется в полуавтоматическом режиме. Установка оборудована системой движения подложкодержателя для обеспечения перемещения подложек внутри вакуумной камеры. Общий вид установки представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Общий вид экспериментальной установки.

2.2 Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов

Ионный источник APeL-IS-7CELL (рис. 2.3) применяется для очистки подложки перед нанесением пленки и ионного ассистирования в процессе осаждения тонкоплёночных покрытий.

Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов (рис. 2.3) используется для очистки поверхности подложки непосредственно перед осаждением тонкоплёночных структур.

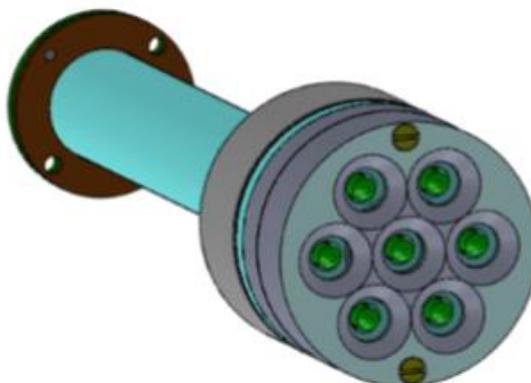


Рисунок 2.3 - Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов APeL-IS-7CELL.

Главная особенность такого рода устройств заключается в близости рабочих давлений с областью работы магнетронных источников плазмы и наличии электронной ловушки для формирования разряда плазмы. Образование электронной ловушки, так же как и в МРС, происходит за счет наличия скрещенных электрического и магнитного полей.

Рабочий газ подается непосредственно внутрь корпуса ионного источника через газовый трубопровод 4. При подаче положительного потенциала на анод, возникает разряд между электродами, катод имеет отрицательный потенциал. Ионы газа ускоряются в межэлектродном промежутке, образуя ионный поток на подложку. Характерные энергии ускоренных ионов находятся в диапазоне 0,3-3 кэВ, а плотность ионного тока на подложку может достигать 0,5 мкА/см².

В качестве источника питания ионного тока использовался источник постоянного тока со следующими рабочими характеристиками:

- максимальное ускоряющее напряжение - 3 кВ;
- максимальный ток - 1 А;
- максимальная мощность - 3 кВт.

Ионный источник APeL-IS-7CELL является многоячейковым источником (семь ячеек). Плазма генерируется возле каждого анода, образуя на выходе каждой апертуры семь ионных пучком, которые при удалении от ионного источника создают сплошной пучок. Это одно из основных преимуществ многоячейковых ионных источников.

2.3 Импульсная магнетронная распылительная система

В работе была использована несбалансированная дисковая МРС с катодом диаметром 100 мм (рис. 2.4). Источник питания МРС - униполярный источник напряжения с малым внутренним сопротивлением и индуктивностью, в котором скорость роста тока определяется процессами генерации носителей в зоне разряда, поэтому форма импульса напряжения –

прямоугольная, тока – треугольник. Рабочие параметры источника питания следующие:

- максимальное выходное напряжение - 1000 В;
- максимальные выходной ток - 5 А;
- максимальная выходная мощность - 5 кВт.

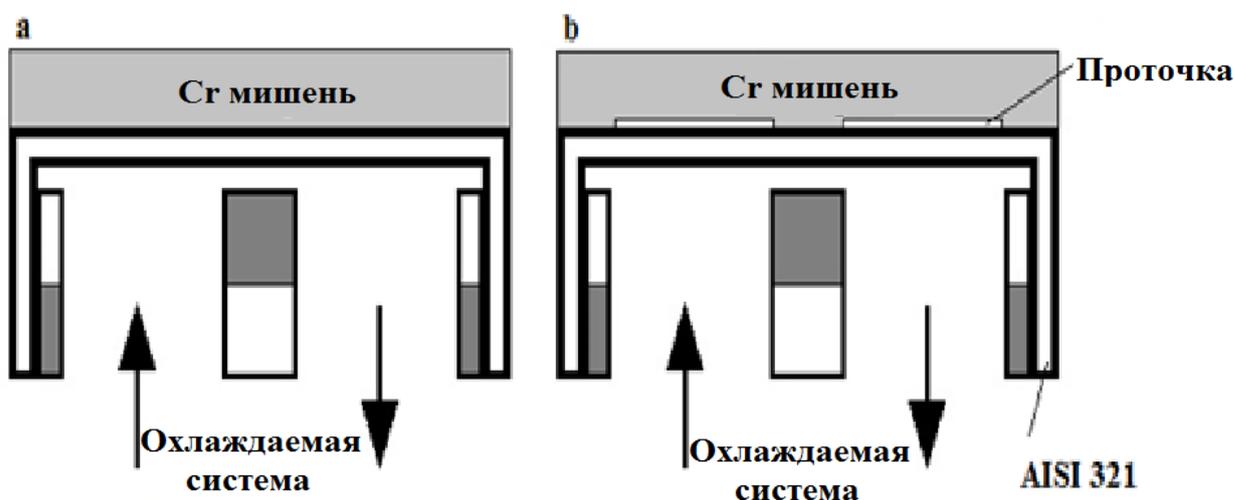


Рисунок 2.4 – Конфигурации MPC: а – с охлаждаемой мишенью; б – с горячей мишенью.

MPC имеет водяное охлаждение. В качестве мишеней использовался хром (99,5%). Расстояние от плоскости катода до подложки - 80 мм. Осаждение пленок производилось при помощи двух различных конфигураций MPC с охлаждаемой и горячей мишенями.

2.4 Прибор для измерения толщины пленок и покрытий Calotest CAT-S-0000

При помощи данного прибора можно измерить толщины металлических, диэлектрических, полимерных и многослойных пленок в диапазоне 0,1-50 мкм. Исследуются образцы с плоской, цилиндрической и сферической поверхностью. Измерение толщины пленки проводится с помощью вращающегося шара. Шар вращается с помощью прикреплённому к нему валику с электроприводом, который удерживается регулируемым рычагом. Рычаг обеспечивает множество вариантов размещения шара относительно образца. При помощи выбранной нагрузки вращающийся шар с

известным диаметром прижимается к поверхности образца. Контактная нагрузка и положение шара относительно образца остаются постоянными. Для быстрого образования на поверхности образца сферического отпечатка добавляется абразивная паста к контактному участку.

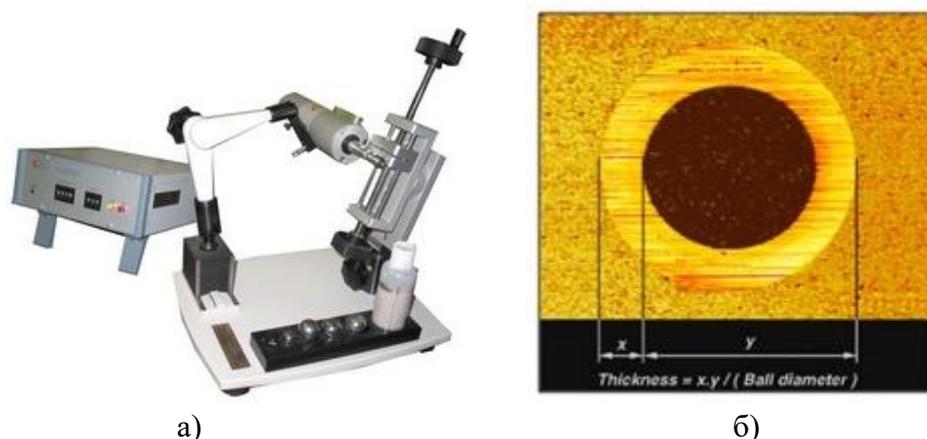


Рисунок 2.5 - (а) прибор для измерения толщины пленок и покрытий; (б) изображение сферического отпечатка.

Расчет толщины плёнки методом сферического шлифа реализуется простыми формулами. Если «S» толщина покрытий, то его можно рассчитать формулой ниже:

$$S = T - t, \quad (3)$$

где T - общая глубина сферического катера, t - глубина катера в материале, которые выражаются формулой ниже:

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

$$t = R - \left(\frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - d^2}\right) \quad (5)$$

Тогда уравнение (2.1) примет вид:

$$S = \frac{1}{2}(\sqrt{4R^2 - d^2} - \sqrt{4R^2 - D^2}) \quad (6)$$

Если $d \ll R$, то

$$S = \frac{x \times y}{2R}. \quad (7)$$

Схема для расчета толщины покрытий по модели шар – плоскость показан на рисунке 2.6.

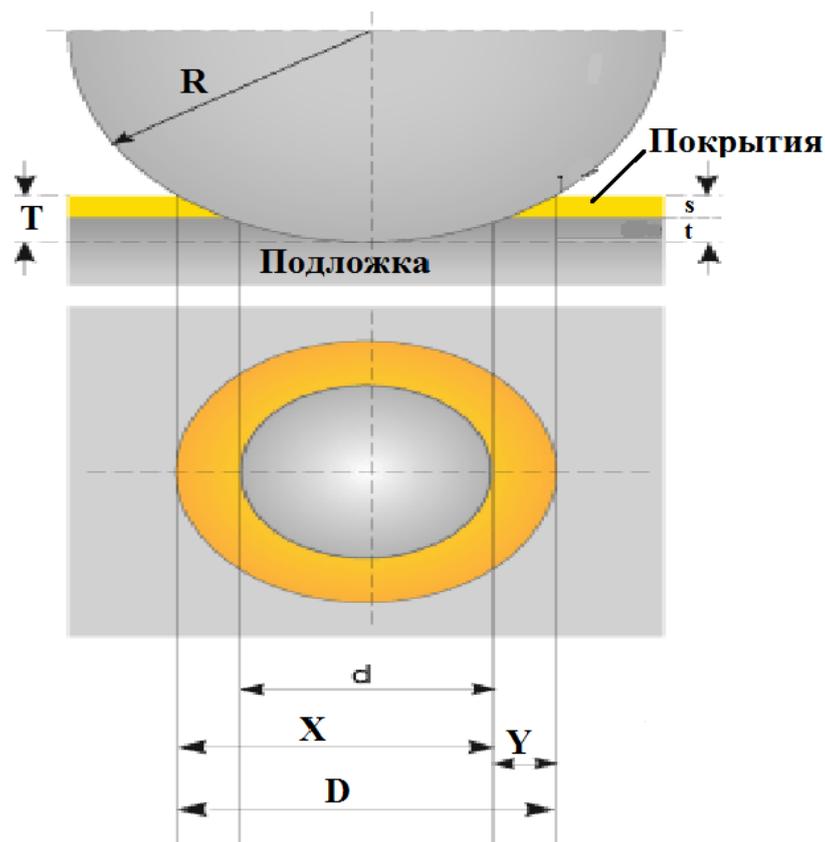


Рисунок 2.6 – Схема расчета толщины покрытий по модели шар – плоскость.

Изображение отпечатка анализируется программным обеспечением прибора. Анализ данных проводится за несколько минут.

2.5 Нанотвердомер Nano hardness tester NHT-S-AX-000X

Твёрдость материала – это способность материала оказывать сопротивление механическому проникновению другого твердого материала. Чтобы определить твердость материала применяется твердый, выдавливаемый материал (индентор), который может иметь форму шарика, алмазной пирамиды, конуса или иглы. Форма твердого материала (индентора) определяется способом измерения твердости материала, которая характеризуется числом твердости по Бринелю (НВ), Роквеллу (HRC) или Виккерсу (HV). В зависимости от размера полученных отпечатков на поверхности материала определяют твердость материала.

Данное устройство предназначено для измерения твёрдости покрытий путём вдавливания пирамидки Виккерса в покрытие. По способу Виккерса в

испытываемый материал вдавливается четырёхгранная пирамида с углом в вершине 136° . Нужно отметить, что по этому способу можно уменьшить или увеличить нагрузку на материал, в зависимости от целей измерения потому что соотношение между диагональными пирамиды остаются постоянными.

После выдавливание пирамиды на поверхности образца остается отпечаток, по которому определяют длину диагонали. На рис. 2.7 изображен полученная отпечатка при выдавливании алмазной пирамиды.

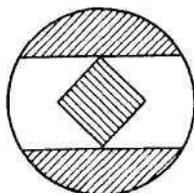


Рисунок 2.7 - Схема измерения отпечатка (измерение по Виккерсу).

Если поверхность покрытий шероховатая, то его нужно отшлифовать бумагой с мелким зерном или отполировать. Чтобы измерить твердость материала по Виккерсу, толщина материала должна составлять не менее 1,5 диагонали отпечатка.

Твердость по Виккерсу HV определяется по формуле:

$$HV = \frac{2P \times \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1.854 \frac{P}{d^2} \text{ [кг} \times \text{с/мм}^2\text{]} \quad (8)$$

где P - нагрузка на пирамиду, кгс; α - угол между противоположными гранями пирамиды (136°); d - среднее арифметическое длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм, т.е. усилие, приходящееся на единицу поверхности отпечатка.

Измерение пирамидой по сравнению с другими измерениями (шарик, конус) считаются более точными для материалов с твердостью выше $HV 450$. Так как у алмазной пирамиды диагональ отпечатка в семь раз больше, чем у других и имеет большой угол в вершине (136°). Такой метод измерения особенно нужен при измерении твердости тонких и твердых сплавов материала.

При испытании твердых и хрупких слоев около углов отпечатка иногда образуются трещины (сколы), по виду которых можно судить о хрупкости

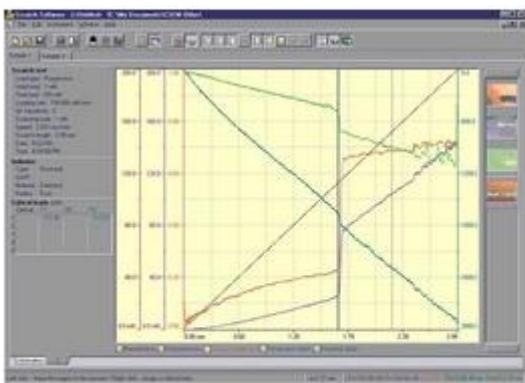
измеряемого слоя. Нанотвёрдость материала измеряется с поверхности вглубь образца, при котором нагрузка изменяется во времени. Проводится анализ отношения между глубиной проникновения и площади отпечатка индентора. Исследуются кривые нагружения и разгружения, по которым и определяются механические параметры покрытия.



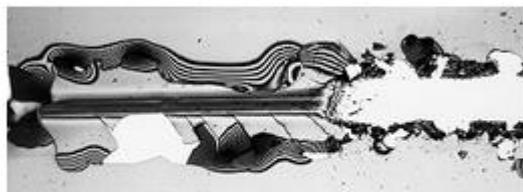
Рисунок 2.8 - Нанотвердомер Nano hardness tester NHT-S-AX-000X.

2.6 Прибор для измерения адгезионной прочности покрытий Micro-scratch tester MST-S-AX-0000

Прибор предназначен для определения адгезионной прочности тонких плёнок к подложке. Измерения проводятся путём нанесения царапины на образец при помощи алмазного индентора. Прохождение индентора по поверхности образца проводится при изменяемой нагрузке. После визуально при помощи оптического микроскопа просматривается место контакта индентора с покрытием, определяется степень разрушения и нагрузка, при которой эти разрушения произошли. В зависимости от типа покрытия и подложки могут быть следующие разрушения: трещины, отслаивание, сколы и др.



а



б

Рисунок 2.9 - (а) Обработка данных на компьютере. (б) Снимок разрушения покрытий при критической нагрузке.

2.7 Рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-7000S

Дифрактометр рентгеновский Shimadzu XRD-7000S (рис. 2.10) предназначен для вычисления значений параметров кристаллической решетки и оценки фазового состава покрытий с использованием баз кристаллографических.



Рисунок 2.10 - Рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-7000S.

Дифрактометр состоит из основного блока и блока обработки данных. В состав основного блока входит генератор рентгеновского излучения, гониометр с контролирующим его процессором и блок детектирования отраженного пучка рентгеновских лучей. Работа генератора рентгеновского

излучения и гониометра контролируется блоком обработки данных. Блок обработки данных соединяется с главным блоком посредством кабеля (LAN).

Принципиальная схема дифрактометра показана на рис. 2.11. Главные компоненты дифрактометра (рентгеновская трубка и детектор) размещаются на подвижном устройстве, называемом гониометром. Это система точной установки и отслеживания угла излучения по отношению к поверхности образца. Одно плечо гониометра задает угол облучения образца рентгеновской трубкой, другое определяет угол брэгговского отражения излучения от образца (детектируемый сигнал). Детектор непрерывно во время движения (при изменении угла) регистрирует интенсивность рентгеновского излучения. Остальные части оптической схемы дифрактометра придают излучению такие свойства, чтобы оптимизировать его для решения тех или иных задач дифрактометрических исследований.

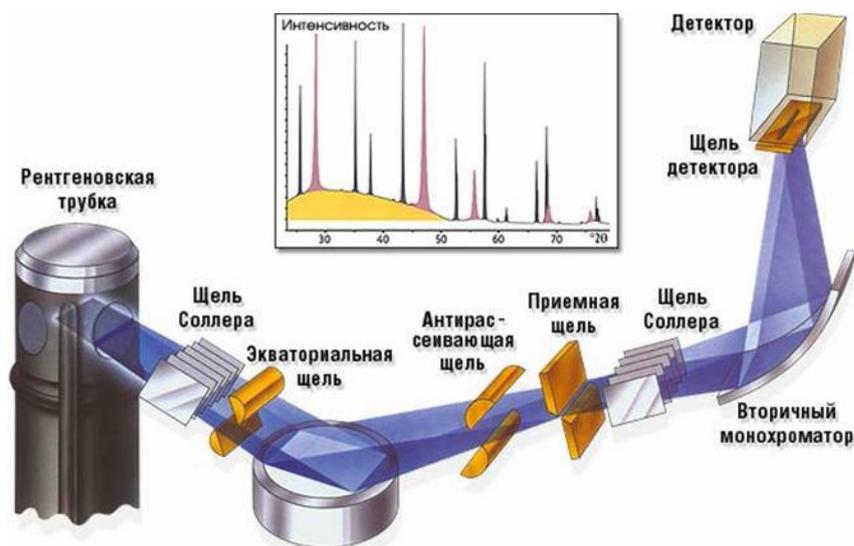


Рисунок 2.11 – Схема рентгеновского дифрактометра.

4 Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Хромовые покрытия представляют собой наноразмерную тонкопленочную структуру, полученную с использованием магнетронной распылительной системы (МРС) с горячей мишенью. Основное преимущество такого метода нанесения пленок является включение двух механизмов эрозии катода – распыление и испарение. Еще одно преимущество заключается в возможности использования уже существующих конструкций МРС и видоизменением лишь геометрии мишени. Основным принципом 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 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.

4.1 SWOT-анализ

SWOT-анализ – (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в табличной форме (таблица 5).

Результаты первого этапа SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Технология более энергоэффективна при ее реализации</p> <p>С2. Не требует создание новых установок, т.е. менее затратная</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Слабые стороны научноисследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Нестабильность параметров источника может принести к трудностям при проведении эксперимента</p> <p>Сл2. Использование для катода только сублимирующий материала</p> <p>Сл4. Возможность появления трещин на поверхности мишени</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Развитая конкуренция технологий производства</p> <p>У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства</p>		

У3. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемые при проведении научного исследования		
---	--	--

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. В рамках данного этапа строится интерактивная матрица проекта (таблица 6). Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечаем либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 6

Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	0	-	+	+
	B2	+	0	+	-	-
	B3	-	+	+	+	-

Возможности проекта		Сл.1	Сл.2	Сл.3
	B1	-	-	-
	B2	-	+	+
	B3	-	0	+

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	0	+	+	-	0
	У2	-	0	0	0	-
	У3	-	-	0	0	-

Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл.1	Сл.2	Сл.3	Сл.4
	У1	-	-	0	0
	У2	-	-	0	-
	У3	-	-	-	0

В рамках третьего этапа составлена итоговая матрица SWOT-анализа (таблица 7).

Таблица 7

Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Технология более энергоэффективна при ее реализации</p> <p>С2. Не требует создание новых установок, т.е. менее затратная</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Слабые стороны научноисследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Нестабильность параметров источника может принести к трудностям при проведении эксперимента</p> <p>Сл2. Использование для катода только сублимирующий материала</p> <p>Сл3. Возможность появления трещин на поверхности мишени</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>	<p>При использовании инновационной инфраструктуры ТПУ упрощается проведения процессов модифицирования хромовых пленок, с помощью магнетронной распылительной системы. При реализации данной технологии может повыситься стоимость</p>	<p>Появление спроса на новый продукт может быть увеличен за счет ее технологических возможностей.</p> <p>Для проведения научного исследования используются различные комплектующие и материалы, что возможно при использовании инновационной инфраструктуры ТПУ.</p>

	конкурентных разработок, т.е. технология более энергоэффективна и менее затратная.	
Угрозы: У1. Развитая конкуренция технологической промышленности У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства У3. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемые при проведении научного исследования	На сегодняшний день существует широкий спектр различных методов модифицирования нового материала, поэтому введении в производство могут возникнуть проблемы с спросом на рынке данной технологии.	Отсутствие спроса на новые технологии, могут ограничить поступление финансовых средств.

4.2 Бюджет научного исследования

Расчет сметы затрат необходим для определения себестоимости НИР. В плановую себестоимость НИР включаются все затраты, связанные с ее выполнением, независимо от источника их финансирования. Смета затрат является основным документом, на относительно которого производят планирование и учет затрат на выполнение НИР.

Для формирования бюджета научного исследования необходимо затраты представить по статьям расходов.

Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

Расчет стоимости материальных затрат производился по действующим прейскурантам (Таблица 8). В стоимость материальных затрат включены транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 8

Сырье и материалы

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Хромовый катод	X99	1	30 000	30 000
Баллоны	Ar	1	6 500	6 500
Стекло	ГОСТ 9284-75	15	100	1 500
Всего за материалы				38 000
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				1 900
Итого по статье				39 900

Специальное оборудование для научных работ

В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения экспериментальных работ. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам и по договорным ценам (Таблица 9).

Таблица 9

Расчет затрат по статье «Специальное оборудование для научных работ»

№	Наименование оборудования	Кол-во	Цена за ед. оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость, тыс. руб.
1	Ионный источник APEL-IS-7CELL	1	100 000	100 000
	Всего за оборудование			100 000
	Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)			5 000
Итого по статье				105 000

Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы. Баланс рабочего времени и расчет основной заработной платы представлены в Таблице 10 и 11, соответственно.

Таблица 10

Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней	119	119
Действительный годовой фонд рабочего времени	247	247

Месячный должностной оклад работника (Z_m) равен:

$$Z_m = (Z_b + Z_b \cdot (k_{np} + k_d)) \cdot k_p, \quad (8)$$

который в свою очередь складывается из базового оклада (Z_b , руб.) и различных коэффициентов: k_{np} – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда); k_d – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия); k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска). В ТПУ система премирования и начисления доплат и надбавок работает при выполнении договорного плана. По результатам нашего исследования премирования предусмотрено не было.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \times M}{F_{дн}} \quad (9)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 рабочих дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 рабочих дней $M = 10,4$ месяца,

6-дневная неделя; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно- технического персонала, рабочих дней (таблица 6).

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) на предприятии рассчитывается по следующей формуле:

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

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника, руб; $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, рабочие дни; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, рассчитываемая по формуле 6.3, руб.

Таблица 11

Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_b , руб.	$K_{пр}$	K_d	K_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	25 923,1	-	-	1,3	33 700	1 528,1	97	148 255,7
Дипломник	3 769,23	-	-	1,3	4 900	222,19	97	21 552,43

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы (Таблица 12). Таким образом, сумма основной заработной платы участников проекта и дополнительной будет составлять статью затрат расходов на зарплату:

$$C_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (11)$$

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

$$Z_{доп} = k_{доп} * Z_{осн} \quad (12)$$

где $k_{доп}$ - коэффициент дополнительной зарплаты.

Таблица 12

Заработная плата исполнителей НТИ

Исполнители	Руководитель	Дипломник
Основная зарплата, руб.	148 255,7	21 552,43

Дополнительная зарплата, руб.	22 238,36	3 232,87
Зарплата исполнителя, руб.	170 494,06	24 785,3
Итого по статье <i>Сзп</i> , руб.	195 279,36	

Отчисления на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды (27,1% от статьи заработной платы) составили 52 920,71 рублей.

Накладные расходы

В эту статью включены затраты на управление и хозяйственное обслуживание и расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. Это порядка 85% от заработной платы. Суммарно накладные расходы составляют 165 987,46 рублей.

Работа со сторонними организациями, научные и производственные командировки не производились.

Бюджет научного исследования составил 559 087,53 руб. (Таблица 13).

Таблица 13

Бюджет научного исследования

Статья расходов	Сумма, руб.
Сырье, материалы	39 900
Зарплата	195 279,36
Отчисления на социальные нужды	52 920,71
Накладные расходы	165 987,46
Специальное оборудование	105 000
Итого	559 087,53

Таким образом, статья расходов на сырье материалы составила 39 900 руб. На приобретение специального оборудования, его монтаж и установку, предназначенного для технологического исследования, затрачено 105 000 рублей. Общий бюджет заработной платы всех участников проекта 195 279,36 руб. Отчисления на социальные нужды – 52 920,71 руб. Накладные расходы, включающие в себя амортизацию оборудования, текущий ремонт и др.,

затрачено 165 987,46 руб. Общий бюджет, включая все вышеперечисленные статьи расходов, составил 559 087,53 руб.

Список публикаций

По теме магистерской работы опубликовано 3 работы, в том числе 2 статьи в рецензируемых изданиях.

1. Sidelev D.V., Yuryeva A.V., Krivobokov V.P., Shabunin A.S., Syrtanov M.S., Koishybayeva Z. Aluminum Films Deposition by Magnetron Sputtering Systems: Influence of Target State and Pulsing Unit // The Book of Abstracts of 3rd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, St. Petersburg, Russia, March 28-30 2016, p. 545-546.
2. Sidelev D.V., Yuryeva A.V., Krivobokov V.P., Shabunin A.S., Syrtanov M.S., Koishybayeva Z. Aluminum Films Deposition by Magnetron Sputtering Systems: Influence of Target State and Pulsing Unit // Journal of Physics: Conference Series, в печати.
3. Sidelev D.V., Bleykher G.A., Krivobokov V.P., Koishybayeva Z. High-rate magnetron sputtering with hot target // Surface & Coatings Technology, в печати.