

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

Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика  
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Исследование условий осаждения покрытий на основе нитрида хрома при работе магнетрона с горячей мишенью</b>

УДК 621.385.64:621.793:621.357.74

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ91	Гладышева Анжела Николаевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г. А.	Доктор физико-математических наук		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Трубченко Т. Г.	Кандидат экономических наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООТД ШБИП	Антоневич О.А.	Кандидат биологических наук		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга, ИЯТШ	Сиделёв Д.В.	Кандидат технических наук		

Компетенции выпускников ООП «Пучковые и плазменные технологии» по направлению  
16.04.01 Техническая физика (2019 года приёма)

<b>Код компетенции</b>	<b>Наименование компетенции</b>
УК(У)-1	Способность осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способность организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способность применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способность анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способность определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы её совершенствования на основе самооценки
ОПК(У)-1	Способность к профессиональной эксплуатации современного научного и технологического оборудования и приборов, предназначенных для использования в области технической физики
ОПК(У)-2	Способность демонстрировать и использовать углублённые теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, в том числе из области технической физики
ОПК(У)-3	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
ОПК(У)-4	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности в области технической физики
ОПК(У)-5	Способность осуществлять научный поиск и разработку новых перспективных подходов и методов к решению профессиональных задач, готовность к профессиональному росту, к активному участию в научной деятельности, конференциях, выставках и презентациях
ПК(У)-1	Способность критически анализировать современные проблемы технической физики, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения экспериментальных и теоретических задач, интерпретировать,

<b>Код компетенции</b>	<b>Наименование компетенции</b>
	представлять и применять полученные результаты
ПК(У)-2	Способность самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для оптимизации параметров объектов и процессов с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств
ПК(У)-3	Готовность осваивать и применять современные физико-математические методы для решения профессиональных задач в области технической физики, составлять практические рекомендации по использованию полученных результатов
ПК(У)-4	Способность представлять результаты исследования в формах отчётов, рефератов, публикаций и презентаций
ПК(У)-5	Готовность принимать непосредственное участие в учебной и учебно-методической работе по направлению «Техническая физика», участвовать в разработке программ учебных дисциплин и курсов
ПК(У)-6	Способность проводить учебные занятия, лабораторные работы, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся
ПК(У)-7	Способность применять и разрабатывать новые образовательные технологии
ПК(У)-8	Способность разрабатывать и оптимизировать современные наукоёмкие технологии в областях технической физики, связанных с применением пучковых и плазменных технологий, с учетом экономических и экологических требований
ПК(У)-9	Способность разрабатывать, проводить наладку и испытания, эксплуатировать наукоемкое технологическое и аналитическое оборудование
ПК(У)-10	Готовность решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ

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

Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика  
 Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Сиделёв Д. В.  
 (Подпись)     (Дата)     (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ91	Гладышевой Анжеле Николаевне

Тема работы:

Исследование условий осаждения покрытий на основе нитрида хрома при работе магнетрона с горячей мишенью	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	05.02.2021 г. №36-83/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	10.06.2021 г.
--	---------------

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вакуумно-плазменная установка для осаждения покрытий на основе хрома и нитрида хрома с диагностическим оборудованием;</li> <li>2. Оборудование для определения толщины покрытий Calotest CAT-S0000;</li> <li>3. Сканирующий электронный микроскоп;</li> <li>4. Комплекс программ для расчета скоростей осаждения покрытий потоков частиц и энергий на подложку (Hot Target, HIPIMS, SRIM).</li> </ol>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Исследовать механизмы формирования потоков атомарных частиц хрома, эмитируемых с поверхности горячей хромовой мишени в зависимости от мощности магнетрона;</li> <li>2. Изучить кинетику поступления частиц на поверхность растущей пленки в атмосфере аргона и азота;</li> <li>3. Проанализировать потоки энергии и изменение температуры подложки в зависимости от мощности магнетрона при осаждении Cr и CrN покрытий;</li> <li>4. Получить зависимости скорости роста покрытий на основе нитрида хрома от мощности магнетрона, выявить роль сублимации на поверхности мишени в усилении скорости формирования покрытия, а также оценить фактор распыления растущей плёнки, находящейся под отрицательным потенциалом смещения.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Титульный лист;</li> <li>2. Introduction;</li> <li>3. Введение;</li> <li>4. Конструкция магнетрона с теплоизолированной мишенью</li> <li>5. Цель и задачи;</li> <li>6. Методы для выполнения задач;</li> <li>7. Оборудование для осаждения покрытий на основе Cr;</li> <li>8. Скорость осаждения хромовых покрытий в зависимости от мощности магнетрона;</li> <li>9. Расчет потоков энергии на подложку при формировании Cr и CrN покрытий в зависимости от мощности магнетрона;</li> <li>10. Измерение температуры на подложке;</li> <li>11. Оборудование для осаждения покрытий на основе CrN;</li> <li>12. Измерение гистерезиса в камере при изменении потока азота;</li> <li>13. Скорость осаждения покрытий на основе нитрида хрома в зависимости от мощности магнетрона;</li> <li>14. Схематическое представление взаимодействия подложки с атомами хрома и азота во времени;</li> <li>15. Расчет потоков частиц Cr и N на подложку за 1 проход мимо мишени;</li> <li>16. Расчет доли распыляемой толщины покрытия за счет подачи на подложку отрицательного потенциала;</li> <li>17. Положения, выносимые на защиту.</li> <li>18. Заключение.</li> </ol>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Раздел</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Консультант</b></p>
<p style="text-align: center;">«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</p>	<p style="text-align: center;">Доцент ОСГН ШБИП Трубоченко Т.Г., к.э.н.</p>
<p style="text-align: center;">«Социальная ответственность»</p>	<p style="text-align: center;">Доцент ООТД ШБИП Антоневиц О.А., к.б.н.</p>

«Раздел на английском языке»	Доцент отделения иностранных языков ШБИП Зеремская Ю. А., к. филол. н.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Анализ существующих методов осаждения покрытий на основе нитрида хрома и постановка задачи исследований;</li> <li>2. Описание экспериментального оборудования и расчётных методов;</li> <li>3. Результаты исследований и их анализ;</li> <li>4. Chromium nitride deposition methods.</li> </ol>	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	05.02.2021 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г. А.	Доктор физико-математических наук		05.02.21 г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ91	Гладышева А.Н.		05.02.21 г.

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОДМ91	Гладышевой Анжеле Николаевне

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа ядерных технологий</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>НОЦ им. Вейнберга</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Техническая физика

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

1. Стоимость ресурсов технического проекта (ТП): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ В реализации проекта задействованы два человека: руководитель, инженер
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент 30%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 30 %

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности ТП с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ конкурентных технических решений; SWOT-анализ
2. Планирование и формирование бюджета технического проекта	Планирование работ; Разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на проектирование
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта	Описание потенциального эффекта

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

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Календарный план-график проектирования проекта
4. Бюджет затрат ТП

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Грубченко Татьяна Григорьевна	Кандидат экономических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОДМ91	Гладышева Анжела Николаевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОДМ91	Гладышева Анжела Николаевна

<b>Школа</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>НОЦ им. Б.П. Вейнберга</b>
Уровень образования	Магистратура	16.04.01    Техническая физика
	<b>Направление/специальность</b>	

Тема ВКР:

<b>Исследование условий осаждения пленок на основе CrN при работе магнетрона с сублимирующей мишенью</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Объект исследования: Пленки на основе CrN  Методика: осаждение пленок CrN с использованием магнетрона с «горячей» мишенью.  Место проведения исследований: НОЦ Б.П. Вейнберга, лаборатория 101.  Рабочая зона: вакуумная установка для осаждения покрытий  Область применения: Защитные и декоративные покрытия (автомобилестроение, аэрокосмическая индустрия).</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</li> <li>– ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем.</li> </ul>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p><b>Вредные факторы:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– Электромагнитное излучение;</li> <li>– Повышенный уровень шума;</li> <li>– Повышенная температура поверхностей оборудования, изделий;</li> <li>– Отклонение показателей микроклимата;</li> </ul> <p><b>Опасные факторы:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;</li> </ul>
<p><b>3. Экологическая безопасность:</b></p>	<p>Атмосфера:</p>

	- Выброс отработанного газа
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: – возникновение пожара, под которым понимается вышедший из-под контроля процесс горения

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООТД ШБИП	Антоневич О.А.	Кандидат биологических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ91	Гладышева А.Н.		

## РЕФЕРАТ

**Выпускная квалификационная работа** содержит 149 с., 41 рис., 32 табл., 37 источников, 1 приложение на английском языке.

**Ключевые слова:** магнетронное распыление, горячая мишень, хромовые покрытия, нитрид хрома, высокоскоростное осаждение.

**Объектом исследования** являются осаждение покрытий на основе хрома и нитрида хрома при осаждении с помощью магнетронной распылительной системы (MPC) с «горячей мишенью».

**Цель работы** – выявить закономерности поступления частиц и энергии на подложку, а также увеличения скорости осаждения покрытий на основе нитрида хрома при работе магнетронной распылительной системы (MPC) с «горячей мишенью» в атмосфере аргона и азота.

В процессе исследования были изучены механизмы формирования потоков атомарных частиц хрома, эмитируемых с поверхности горячей хромовой мишени в зависимости от мощности магнетрона. Была изучена кинетика поступления частиц на поверхность растущей пленки при формировании покрытий на основе CrN, а также проведен анализ потоков энергии и изменения температуры подложки в зависимости от мощности магнетрона.

В результате исследований были получены зависимости скорости роста покрытий из хрома и на основе нитрида хрома от мощности магнетрона, которые показали, что за счет возникновения сублимации на поверхности мишени скорость осаждения покрытий увеличивается в несколько раз.

**Область применения:** защитные и декоративные покрытия (автомобилестроение, аэрокосмическая индустрия).

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	15
Глава 1. Анализ существующих методов осаждения покрытий на основе нитрида хрома и постановка задачи исследований.....	18
1.1 Вакуумно-дуговое испарение.....	18
1.2 Ионное распыление .....	20
1.3 Магнетронное распыление в атмосфере аргона и азота .....	21
1.4 Особенности осаждения металлических плёнок при работе магнетрона с испарением или сублимацией вещества мишени.....	27
1.5. Постановка задачи исследований.....	29
Глава 2. Описание экспериментального оборудования и расчётных методов	32
2.1 Описание экспериментального и диагностического оборудования .....	32
2.1.1 Оснастка вакуумно-плазменной установки и конструкция магнетрона с теплоизолированной хромовой мишенью .....	32
2.1.2 Диагностическое оборудование.....	36
2.1.3 Порядок проведения экспериментов по измерению тока и напряжения в цепи МРС с горячей мишенью и измерению температуры подложки.....	39
2.2. Описание расчётных методик и использованных программных кодов	40
2.2.1. Модель эрозии мишени с сублимирующей хромовой мишенью и методика Ламберта-Кнудсена.....	40
2.2.2. Описание комплекса программ для расчёта скоростей эрозии и осаждения при работе магнетрона с теплоизолированной мишенью .....	42
2.2.3. Программы SIMTRA и SRIM.....	46
Глава 3. Результаты исследований и их анализ.....	48

3.1. Исследование состава потоков атомарных частиц хрома, эмитируемых с поверхности горячей хромовой мишени в зависимости от мощности магнетрона.....	48
3.1.1 Расчёт и анализ изменения температуры на поверхности мишени .	49
3.1.2 Расчёт скоростей распыления и сублимации; выявление вклада обеих компонент эрозионного потока в осаждении .....	51
3.1.3. Эксперименты по измерению скорости роста хромовых покрытий .....	59
3.2. Структура потоков энергии и частиц на поверхности подложки в процессе формирования CrN покрытия (в зависимости от мощности магнетрона). .....	63
3.2.1. Структура баланса энергии и частиц при осаждении хромового покрытия .....	63
3.2.2. Анализ кинетики поступления потоков частиц разного вида на подложку при формировании покрытия на основе нитрида хрома.....	69
3.3. Зависимость скорости роста покрытия на основе нитрида хрома от мощности магнетрона с горячей мишенью .....	76
3.3.1. Экспериментальные результаты о скорости роста покрытия на основе CrN в зависимости от мощности магнетрона и их анализ. ....	76
3.3.2. Анализ вклада распыления растущей плёнки в уменьшении скорости осаждения в условиях подачи отрицательного смещения на подложку .....	80
3.3.3 Оценка рассеяния распылённых частиц при их движении от мишени к подложке .....	83
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	90
4.1 Предпроектный анализ .....	90

4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования .....	90
4.1.2	Анализ конкурентных технических решений .....	91
4.2	SWOT анализ.....	92
4.3	Планирование научно-исследовательский работ .....	94
4.3.1	Структура работ в рамках научного исследования.....	94
4.3.2	Определение трудоемкости выполнения работы.....	95
4.3.3	Разработка графика проведения научно-технического исследования .....	96
4.4	Бюджет научно-технического исследования.....	100
4.4.1	Расчет материальных затрат.....	100
4.4.2	Расчёт амортизационных отчислений .....	101
4.4.3	Расчёт заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды	102
4.5	Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности исследования.....	105
4.5.1	Интегральный показатель финансовой эффективности .....	105
4.5.2	Интегральный показатель ресурсоэффективности .....	106
4.5.3	Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки.....	107
	Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность».....	109
	Глава 5. Социальная ответственность.....	111
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .	112
5.1.1.	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.....	112
5.1.2.	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	113

5.2 Производственная безопасность .....	114
5.3 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя (работающего).....	115
5.3.1. Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	116
5.3.2 Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении.....	119
5.3.3 Повышенный уровень электромагнитного излучения .....	121
5.3.4 Повышенный уровень шума .....	123
5.3.5 Повышенная температура поверхностей оборудования, изделий	123
5.3.6 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека .....	124
5.4 Экологическая безопасность .....	126
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	128
Выводы по разделу «Социальная ответственность».....	130
Заключение .....	131
Список использованных источников .....	132
Приложение А .....	136

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач при разработке технологий, основанных на модифицировании поверхностных свойств материалов и изделий, является повышение производительности осаждения покрытий из металлов, сплавов, диэлектриков и полупроводников высокого качества. Долгое время наиболее распространенным методом получения данных пленок являлся метод термического испарения в вакууме. При помощи данного метода можно было получить пленки толщиной до нескольких микронов. Также этот метод прост в реализации, он характеризуется высокими скоростями осаждения пленки на подложке, но он не может обеспечить достаточную воспроизводимость свойств пленок, в особенности сложного состава, не позволяет испарять тугоплавкие материалы, а также часто сопровождается появлением поверхностных дефектов на пленке из-за вылета крупных частиц при испарении с поверхности материала.

В связи с вышеупомянутыми недостатками методы осаждения, основанные на распылении специальных мишеней, оказались очень привлекательными. Здесь стоит отметить катодное распыление, при котором тонкие пленки можно получить путем бомбардировки ионами осаждаемого материала. Данный метод обладает рядом достоинств, такими как высокая адгезия пленок, возможность осаждать соединения, которые невозможно получить методом термического испарения в вакууме, однородность покрытий по толщине и т.д. Но он характеризуется низкой скоростью осаждения, а также высоким нагревом подложки в связи с бомбардировкой ее высокоэнергетическими вторичными электронами. Эти ограничения удалось частично преодолеть при появлении магнетронных распылительных систем (MPC). За счет «ловушки» для электронов магнитным полем, плотность ионного тока у поверхности мишени увеличивается (на два порядка по сравнению с обычными диодными системами), поэтому скорость распыления мишени увеличивается почти в 50-100 раз [1].

Примерно с 1980 года интенсивно исследуется реактивное магнетронное распыление тонких пленок, поскольку распыление металлических мишеней в присутствии реактивного газа позволяет легко образовывать сложные пленки, такие как нитриды, оксиды, карбиды или их комбинации [2]. Также данный метод позволяет получить достаточно плотные покрытия с высокой твердостью и хорошей адгезией.

Покрытия из нитридов металлов, такие как нитрид циркония (ZrN), нитрид титана (TiN), нитрид гафния (HfN) и нитрид хрома (CrN) широко востребованы в промышленности, потому что эти вещества обладают высокой температурой плавления, стойкостью к коррозии в различных агрессивных средах, повышенной твердостью и т.д. В настоящей работе рассмотрено получение покрытий на основе нитрида хрома, которые часто наносятся в качестве защитных слоёв на изделия из-за их прочности, износостойкости и коррозионной стойкости.

Традиционный способ получения этих покрытий – реактивное магнетронное осаждение, в котором основным механизмом формирования потока осаждаемых частиц является распыление на поверхности мишени в присутствии азота. Из-за этого производительность осаждения покрытия оказывается довольно низкой (меньше 1 нм/с [3]), что часто является неприемлемым для реализации технологий в промышленном производстве.

В последнее время установлено, что если организовать магнетронное распыление хромовой мишени, разогретой до температуры, при которой появляется заметная сублимация, то скорости осаждения хромовых покрытий могут вырасти в 10 и более раз [4]. Поэтому возникло предположение, что если соединить магнетронное распыление сублимирующей хромовой мишени с напуском азота в рабочую камеру, то можно добиться существенного возрастания производительности осаждения покрытий на основе нитрида хрома. Для разработки надёжной технологии, реализующей вышеописанную идею, требуется детальное исследование всех

процессов в системе «мишень - подложка» при работе МРС с теплоизолированной хромовой мишенью.

В связи с этим целью настоящего исследования является выявление закономерностей поступления частиц и энергии на подложку, а также увеличения скорости осаждения покрытий на основе нитрида хрома при работе магнетронной распылительной системы с горячей мишенью в атмосфере аргона и азота. Основные задачи представляемой работы состояли в том, чтобы:

1) исследовать механизмы формирования потоков атомарных частиц хрома, эмитируемых с поверхности горячей хромовой мишени в зависимости от мощности магнетрона;

2) изучить кинетику поступления частиц на поверхность растущей пленки в атмосфере аргона и азота;

3) проанализировать потоки энергии и изменение температуры подложки в зависимости от мощности магнетрона при осаждении Cr и CrN покрытий;

4) получить зависимости скорости роста покрытий на основе нитрида хрома от мощности магнетрона, выявить роль сублимации на поверхности мишени в усилении скорости формирования покрытия, а также оценить фактор распыления растущей плёнки, находящейся под отрицательным потенциалом смещения.

## **Глава 1. Анализ существующих методов осаждения покрытий на основе нитрида хрома и постановка задачи исследований**

Разработка и развитие технологий по получению защитных, упрочняющих и коррозионностойких покрытий на основе соединений металлов различных элементов (Cr, Ti и т.д.) с азотом, углеродом и т.д. представляет огромный интерес. В настоящее время происходит развитие и усовершенствование уже существующих методов получения таких соединений с целью улучшения свойств получаемых покрытий. Но проблемой в данном случае является не только получение хороших качеств пленок, но и улучшение производительности самого процесса. В настоящей главе рассмотрен и проанализирован ряд традиционных способов получения пленок на основе CrN: вакуумно-дуговое испарение, ионное распыление, магнетронное распыление в атмосфере аргона и азота. Данные методы относятся к группе PVD-технологий (physical vapor deposition), которые представляют собой обработку поверхности твёрдого тела в вакуумной среде путём осаждения на неё атомарных и молекулярных частиц. На основе выполненного анализа сформулирована постановка задачи для настоящей магистерской диссертации.

### **1.1 Вакуумно-дуговое испарение**

Вакуумно-дуговое испарение – широко используемый в промышленных масштабах процесс нанесения высококачественных тонкопленочных покрытий. Этот процесс основан на физике низковольтной, сильноточной катодной дуги, которая производит плотную, сильно ионизированную плазму. В данном методе используется электрическая дуга, которая испаряет материал с поверхности мишени.

Ток дуги концентрируется на небольшой площади поверхности катода, в так называемых “катодных пятнах”, что в свою очередь создает чрезвычайно высокую плотность тока ( $\sim 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>).

Эта высокая плотность тока связана с чрезвычайно высокой плотностью мощности ( $\sim 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>), которая приводит к локализованному фазовому превращению твердой мишени (катодного материала) в почти полностью ионизированную плазму. Плазма быстро расширяется в вакууме по направлению к подложке.

Получение покрытий на основе нитрида хрома с применением технологии вакуумно-дугового испарения реализуется в двух диапазонах давления азота ниже 1 Па и 2,0–10,0 Па. Авторы статьи [3] предполагают, что в первом случае диссоциация молекулярного азота при дальнейшем хемосорбировании происходит на поверхности подложки, во втором — в объеме плазмы.

Одним их основных **недостатков** электродугового нанесения покрытий является наличие капель в газовой фазе. По мнению авторов учебного пособия [5] наиболее вероятной причиной образования капель является присутствие в объеме катода растворенного газа, вследствие чего при кипении образуются газовые пузыри, интенсивно выходящие на поверхность и приводящие к разбрызгиванию расплавленных макрочастиц катода. При осаждении на подложку капли нарушают однородность пленки, ухудшают ее свойства. Для устранения капель в газовой фазе применяют сепарацию газового потока в электрическом или магнитном полях, используют дегазированные катоды, оптимизируют режимы испарения.

**Достоинствами** электродугового испарения являются возможность регулирования в широких пределах скорости нанесения пленок, возможность нанесения сложных по химическому составу покрытий (оксидов и др.), хорошая адгезия и сплошность получаемых пленок.

**Применение:** Электродуговое осаждение широко применяется для нанесения на поверхность режущих инструментов износостойких и защитных покрытий, значительно продлевающих срок его службы. При помощи данной технологии может быть синтезирован широкий спектр

сверхтвёрдых и нанокompозитных покрытий, включая TiN, TiAlN, CrN, ZrN, AlCrTiN и TiAlSiN [5].

## 1.2 Ионное распыление

Данный метод основан на явлении разрушения катода при бомбардировке его ионизированными атомами разряженного газа. Атомы, вылетающие с поверхности катода при его распылении, распространяются в окружающем пространстве и конденсируются на подложке. При подаче постоянного напряжения между катодом и анодом (~1...5 кВ), находящимися в газе при небольшом давлении (~10 Па), возникает тлеющий разряд. Образующиеся при этом ионы бомбардируют катод и вызывают распыление атомов мишени (или даже более крупных частиц – кластеров).

Методы получения пленок ионным распылением материала мишени обладают рядом **преимуществ** перед другими методами.

1). Поскольку распыление является низкотемпературным процессом, то в качестве исходной мишени можно использовать тугоплавкие материалы и синтезировать соединения, которые практически невозможно получить термическим испарением.

2). Наносимые пленки имеют высокую адгезию к подложке.

3). Постоянство химического состава распыляемого материала обеспечивает однородность пленки по толщине.

4). Большие, чем при термическом испарении, площади поверхности получаемых пленок, поскольку материал напыляется на подложку не из точечного источника.

5). Высокий коэффициент использования распыляемого материала [6].

**Недостатком** данного метода является низкая скорость получения покрытий.

### 1.3 Магнетронное распыление в атмосфере аргона и азота

Магнетронное распыление — это технология вакуумного нанесения покрытия, позволяющая осаждать многие виды материалов, включая металлы и керамику, на поверхность подложки, используя специально сформированное магнитное поле, приложенное к мишени. Положительно заряженные ионы из плазмы ускоряются и направляются в сторону мишени, выбивая или распыляя с ее поверхности атомы, которые затем осаждаются на подложке.

Для магнетронного распыления используется замкнутое магнитное поле для захвата электронов, повышая эффективность процесса ионизации и создавая плазму при более низких давлениях, уменьшая потери энергии в распыленном атоме в результате газовых столкновений [7]. Магнетронное распыление является доминирующей технологией для выращивания тонких пленок, потому что можно получить большое количество тонких пленок с относительно высокой чистотой и низкой стоимостью [8]. Для реализации данной технологии применяют специальные устройства - магнетронные распылительные системы (MPC).

Принцип действия MPC показан на рисунке 1.1. Основными элементами устройства являются катод-мишень, анод и магнитная система.

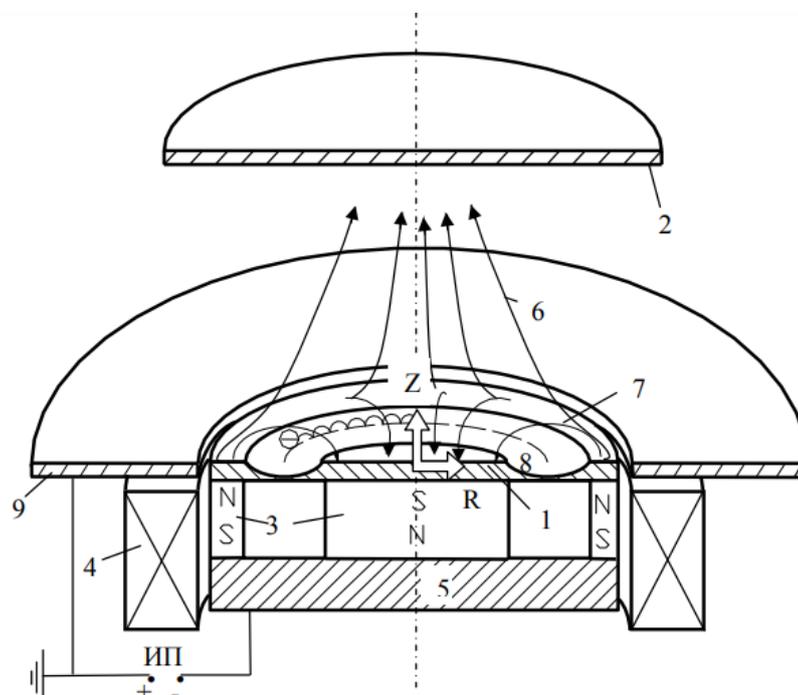


Рисунок 1.1 – Схема магнетронной распылительной системы:  
 1 – распыляемый катод, 2 – подложка, 3 – постоянные магниты, 4 – электромагнит, 5 – магнитопровод, 6 – несбалансированные линии магнитного поля, 7 – сбалансированные линии магнитного поля, 8 – зона распыления катода, 9 – анод (крепежный фланец), ИП – источник питания магнетрона [9]

Между мишенью и анодом подаётся постоянное или импульсное напряжения. При этом возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Перпендикулярно электрическому полю, параллельно катоду, накладывается магнитное поле. Взаимодействие между магнитным полем и электрическим полем приводит к тому, что электроны закручиваются в спираль вблизи поверхности мишени, тем самым увеличивая вероятность того, что электроны столкнутся с атомами аргона для генерации ионов. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у

поверхности мишени. Генерируемые ионы сталкиваются с поверхностью мишени под действием электрического поля для ее распыления.

При реактивном магнетронном осаждении тонкие пленки соединений осаждаются на подложках распылением от металлических (неметаллических) мишеней в присутствии химически активного газа, обычно смешанного с инертным рабочим газом (неизменно Ar) [10]. Эти газы вступают в реакцию с материалом мишени, образуя химическое соединение [11]. Поэтому такие газы называется реактивными.

Ниже кратко перечислены наиболее распространенные соединения, получаемые методом магнетронного реактивного распыления:

1. Оксиды (кислород) — $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .
2. Нитриды (азот, аммиак)— $\text{TaN}$ ,  $\text{TiN}$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{CNX}$ .
3. Карбиды (метан, ацетилен, пропан)— $\text{TiC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{SiC}$ .
4. Сульфиды ( $\text{H}_2\text{S}$ )— $\text{CdS}$ ,  $\text{CuS}$ ,  $\text{ZnS}$ .
5. Оксикарбиды и оксинитриды Ti, Ta, Al, and Si [10].

Контролируя расход реактивного газа, можно контролировать стехиометрию растущей пленки [12].

В данной работе используется метод реактивного магнетронного распыление в атмосфере азота, таким образом в дальнейшем будем рассматривать только образование нитридов.

Распыление мишени может происходить в трех режимах: металлическом (распыление атомов металла с поверхности мишени), переходном и нитридном. При нитридном режиме происходит образование нитрида непосредственно на мишени (отравление мишени). Таким образом, распыление происходит с поверхности химических соединений.

Как показали авторы [13], при увеличении плотности мощности тока на мишени количество реактивного газа, необходимое для образования стехиометрических соединений, также увеличивается, и образование таких соединений может быть перемещено из нитридного режима (точка С) в переходный режим (точка ОР) распыления, как показано на рисунке 1.2. В

переходном режиме распыления нитриды могут осаждаться с более высокой скоростью осаждения. Это уже было экспериментально продемонстрировано, например, в работах [14,15].

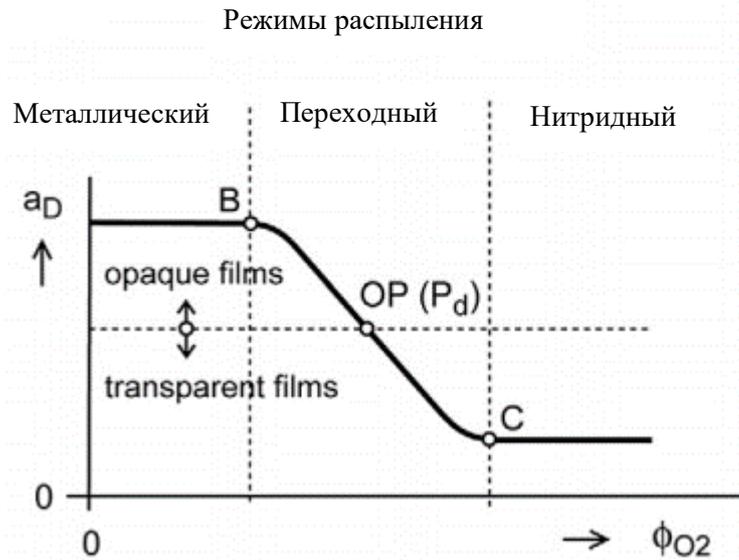


Рисунок 1.2 – Схематическое представление режимов при реактивном магнетронном распылении нитридных пленок [13]

В общем случае при реактивном распылении образование химических связей может наблюдаться на трех стадиях процесса (рисунок 1.3).

*Первая стадия.* Поскольку в реактивных процессах применяется смесь инертного и активного газов, то на мишень поступает смешанный поток ионов и атомов. Химически активные ионы, возбужденные атомы в процессе бомбардировки мишени не только участвуют в ее распылении, но и реагируют с атомами мишени, образуя на поверхности соединения. При этом возможно распыление атомов, как чистого материала мишени, так и его соединения.

*Вторая стадия.* Распыленные из мишени атомы транспортируются к подложке. При этом не исключен процесс их взаимодействия с частицами плазмы и атомами рабочего газа, в том числе и с образованием химических связей.

*Третья стадия.* Конденсированные на поверхности подложки атомы за счет своей значительной энергии обладают высокой миграционной способностью и активно взаимодействуют между собой и с поверхностными атомами, в том числе и с атомами реактивного газа, адсорбированными из газовой фазы с образованием химической связи.

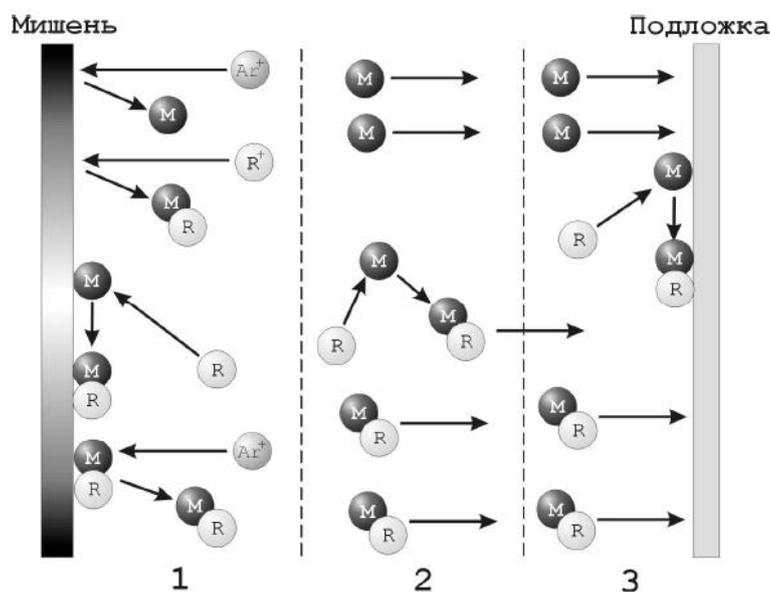


Рисунок 1.3 – Стадии процесса реактивного распыления: 1 – первая стадия, 2 – вторая стадия, 3 – третья стадия (M – атом материала мишени, R и  $R^+$  - соответственно атом и ион реактивного газа,  $Ar^+$  - ион атома аргона [16])

Химическая реакция на поверхности мишени и анодов магнетрона с образованием химического соединения создает проблемы устойчивости реактивного распыления. Этим проблем в основном две: первая – снижение скорости распыления мишени и вторая -появление электрических пробоев на поверхности мишени и анода, если образующееся химическое соединение представляет собой диэлектрик [11].

Основными областями применения реактивного осаждения являются твердые покрытия, износостойкие покрытия, энергетические покрытия и прозрачные проводящие пленки. Твердые материалы, такие как TiN, используются в качестве износостойких покрытий, например, инструменты и штампы, а также декоративные покрытия, такие как корпуса часов, где

характерный золотой цвет и твердость создают идеальное сочетание свойств. Они часто реактивно распыляются из титановых мишеней в атмосфере  $N_2+Ar$ . Подложки часто смещаются для повышения реакционной способности на поверхности и получения правильного цвета пленки [12].

**Преимуществами МРС** являются:

1) невысокие тепловые нагрузки на подложку, что важно при нанесении покрытий на полимерные подложки;

2) возможность нанесения покрытий сложного состава из сплавов (например, при термовакuumном испарении происходит сепарация компонентов сплава);

3) возможность нанесения покрытий в среде реактивного газа (оксиды, нитриды, карбиды);

4) возможность нанесения покрытия с хорошей воспроизводимостью по толщине и составу на подложки больших размеров (эта особенность МРС определяет их главное преимущество перед остальными системами при нанесении покрытий на рулонные и листовые материалы);

5) а также возможность использовать МРС в технологических линиях с непрерывным нанесением покрытий благодаря большому запасу материала в распыляемом катоде (время напыления 5-20 дней) [17];

**К недостаткам** традиционных методов реактивного магнетронного осаждения следует отнести:

1) относительно высокую энергоемкость процесса (500 эВ на один распыленный атом против 50 эВ при вакуумно-дуговом испарении);

2) нестабильность реактивных процессов при нанесении оксидов, нитридов и карбидов металлов и, как следствие, необходимость применения сложных систем контроля и управления разрядом [17]. Данная нестабильность связана с вышеупомянутым отравлением мишени;

3) довольно низкие скорости осаждения покрытий (ниже 1 нм/с).

## 1.4 Особенности осаждения металлических плёнок при работе магнетрона с испарением или сублимацией вещества мишени

Если устранить или предельно минимизировать теплопроводный сток из вещества мишени в охлаждаемый корпус магнетрона, то при увеличении мощности источника питания МРС температура мишени может очень сильно возрасти. Хром характеризуется высокой скоростью сублимации при температурах порядка 1600 К и выше. Поэтому если хромовая мишень магнетрона разогреется до этого уровня, то появляется ещё один механизм эрозии дополнительно к распылению – сублимация. Данный эффект свойственен не только для хрома, но также и для Ti, Mg, Zn. Таких высоких температур на поверхности мишени можно достичь с помощью специальной конструкции МРС, которая описана в главе 2.

Авторами статьи [4] были проведен эксперимент по осаждению покрытий на основе Cr. Осаждение покрытий проводилось в атмосфере Ar при давлении 0,2 Па. Мишень Cr (99,95%) в форме диска с радиусом  $R = 4,5$  см и толщиной  $h = 0,8$  см была закреплена на корпусе магнетрона. Эксперименты проводились с полностью охлажденной (“холодной”) и частично охлажденной (“горячей”) мишенью. Схема использованной авторами теплоизоляции горячей мишени показана на рисунке 1.4(d).

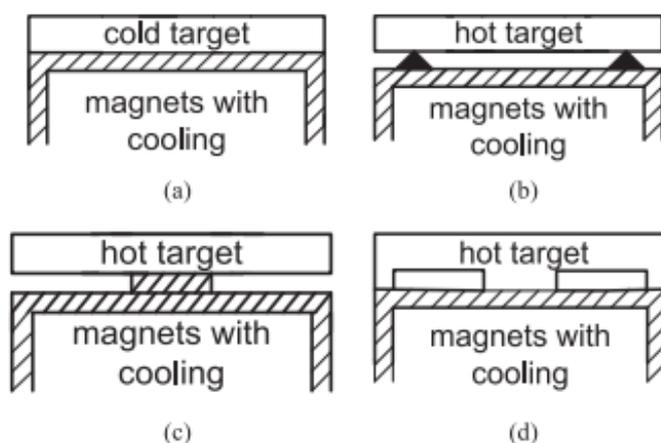


Рисунок 1.4 – Схемы теплопроводного контакта мишени с охлаждаемым корпусом магнетрона: (а) полное охлаждение, (б) полная теплоизоляция, (в) и (г) частичная теплопроводная изоляция.

Нелинейное увеличение скорости осаждения за счет испарения для магнетрона с горячей хромовой мишенью было подтверждено экспериментами (рисунок 1.5). На данном графике показаны рассчитанные зависимости скорости осаждения  $V_{dep}$  и максимальной температуры на поверхности мишени в зависимости от усредненной плотности мощности. Для расчета  $V_{dep}$  использовалась методика из [18].

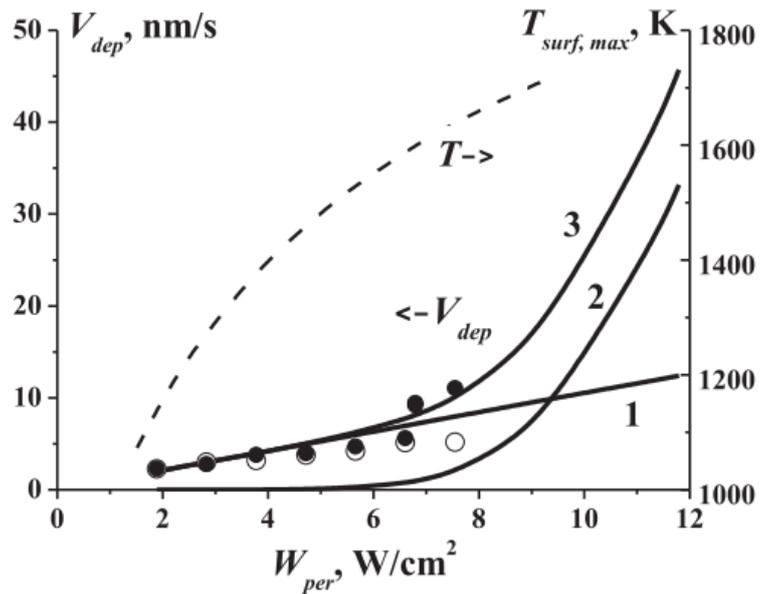


Рисунок 1.5 – Зависимость скорости осаждения покрытий и максимальной температуры поверхности мишени ( $T_{surf,max}$ ) от усредненной плотности мощности магнетрона ( $W_{per}$ ). Сплошные линии - расчет (1 - за счет распыления, 2 - за счет испарения, 3 - суммарное); точки - эксперимент (охлажденная мишень – белые точки, горячая мишень – черные точки).

Пунктирная линия - расчет  $T_{surf,max}$

Расчеты, а также экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при низкой мощности источника питания МРС распыление теплоизолированной мишени. В этом случае скорость осаждения пропорциональна плотности мощности и не превышает нескольких нм в секунду. При  $W_{per} \approx 6,6 \text{ Вт/см}^2$  вклад, вносимый испарением, становится заметным. При  $W_{per} \approx 9,3 \text{ Вт/см}^2$  скорости осаждения за счет испарения и распыления становятся примерно одинаковыми. При более высокой

мощности испарительная составляющая в осажденном потоке частиц становится преобладающей. Расчеты показывают, что за счет испарения (или сублимации) скорость осаждения твердой мишени Cr может быть примерно в 20 раз выше. Следует отметить, что такая ситуация возникает при температурах ниже точки плавления. В случае мишени из Ti максимальное прогнозируемое увеличение скорости за счет сублимации составляет около пяти.

### **1.5. Постановка задачи исследований**

Получение покрытий на основе нитрида хрома с помощью магнетронного распыления вызывает ряд трудностей. Во-первых, существует вероятность отравления мишени, распыляемой в среде реактивного газа. Обычно это приводит к нестабильности процессов формирования плёнки, плохой повторяемости результатов и т.д. Во-вторых, если будем распыляться сублимирующая мишень, то плотность потока осаждаемых атомарных частиц хрома должна существенно возрасти по сравнению с традиционным распылением. Таким потоком нужно научиться управлять для того, чтобы надёжно контролировать состав формируемого покрытия. В-третьих, молекулы азота без предварительной диссоциации характеризуются довольно слабой способностью к хемосорбции на подложке с растущим покрытием на основе атомов хрома. Для того, чтобы преодолеть вышеуказанные трудности, было решено реализовать следующую схему осаждения.

1). Магнетрон с сублимирующей хромовой мишенью используется в качестве инструмента для формирования потока осаждаемых металлических атомов с высокой плотностью. За счет данного механизма планируется увеличить скорость осаждения пленки на подложке.

2). Подложка с растущим покрытием погружена в атмосферу аргона и азота. При этом используется отдельная подача газов, что должно

способствовать минимизации отравления хромовой мишени соединениями с азотом.

3). Используется высокочастотная антенна в качестве дополнительного источника плазмы, ассистирующего процесс формирования покрытия. Данный процесс необходим для диссоциации молекул азота и ионизации.

4). Подложка должна находиться под отрицательным потенциалом смещения для того, чтобы вытягивать поток высокоэнергетических ионов из области реактивной плазмы и таким образом уплотнять структуру покрытия, а также улучшать адгезию.

Для того, чтобы разработать высокопроизводительную технологию осаждения качественных покрытий из нитрида хрома с использованием магнетронных распылительных систем, необходимо исследовать зависимости изменения плотности потока частиц и энергии, поступающих на подложку, при наращивании мощности магнетрона и усилении нагрева мишени. При изменении данных параметров будет зафиксирован вклад сублимирующей составляющей, таким образом можно будет понять, какова кинетика осаждения и поступление энергии на подложку в течение эксперимента, в каких пределах может быть увеличена скорость роста покрытия на основе нитрида хрома.

Основные задачи исследования состояли в следующем.

1). Исследовать механизмы формирования потоков атомарных частиц хрома, эмитируемых с поверхности горячей хромовой мишени в зависимости от мощности магнетрона.

2). Изучить кинетику поступления частиц на поверхность растущей пленки в атмосфере аргона и азота.

3). Проанализировать потоки энергии и изменение температуры подложки в зависимости от мощности магнетрона при осаждении Cr и CrN покрытий.

4). Получить зависимости скорости роста покрытий на основе нитрида хрома от мощности магнетрона, выявить роль сублимации на поверхности

мишени в усилении скорости формирования покрытия, а также оценить фактор распыления растущей плёнки, находящейся под отрицательным потенциалом смещения.

## **Глава 2. Описание экспериментального оборудования и расчётных методов**

В данной главе представлено описание экспериментального оборудования для осаждения покрытий из хрома и на основе нитрида хрома, диагностическое оборудование, необходимое для анализа получившихся пленок, а также описаны программные коды, с помощью которых выполнены расчёты тепловых и эрозионных процессов на поверхности мишени MPC, плотностей потоков осаждаемых частиц и энергии, поступающей на подложку, скорости роста покрытия (Hot Target, HIPIMS, SRIM, SIMTRA).

### **2.1 Описание экспериментального и диагностического оборудования**

#### **2.1.1 Оснастка вакуумно-плазменной установки и конструкция магнетрона с теплоизолированной хромовой мишенью**

В рамках данной работы были проведены две серии экспериментов. Первая – по напылению хрома методом магнетронного распыления горячей мишени. Вторая – по осаждению пленок на основе нитрида хрома методом магнетронного распыления горячей хромовой мишени в среде аргона и азота. Все эксперименты проводились на вакуумно-плазменной установке, разработанной в лаборатории НОЦ Б.П. Вейнберга ТПУ.

Конструкционные и технологические особенности проведенных экспериментов описаны ниже.

##### **1). Осаждение покрытий из хрома**

На рисунке 2.1 представлена схема установки, на которой происходило осаждение хромовых покрытий.

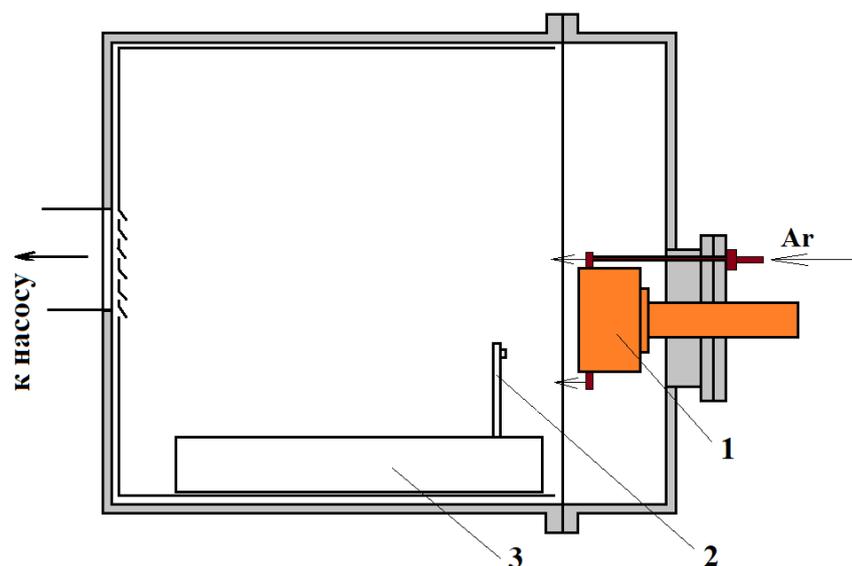


Рисунок 2.1 – Схема установки: 1 – магнетронная распылительная система; 2 – подложкодержатель; 3 – вращающийся столик

На рисунке 2.2 показана схема катодного узла, при которой материал мишени может сильно разогреваться и вызывать механизм сублимации атомов с ее поверхности.

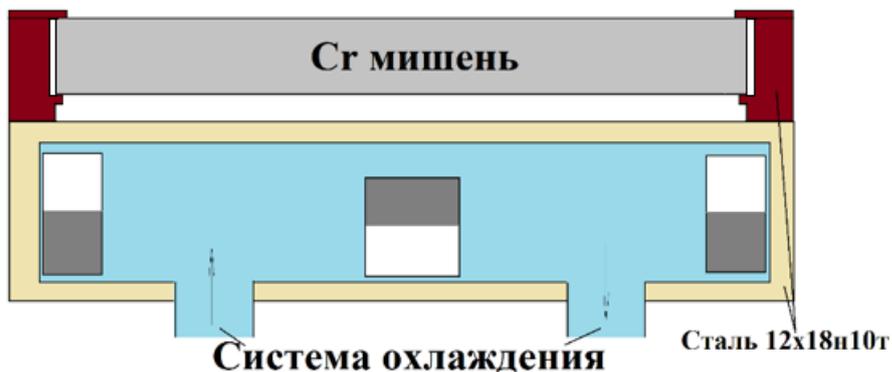


Рисунок 2.2 - Схематическое изображение катодного узла с мишенью, имеющей ограниченный теплопроводный контакт с охлаждаемым корпусом магнетрона

В таблице 2.1 приведены геометрические размеры данной конструкции

Таблица 2.1 – Геометрические размеры конструкции МРС

Диаметр мишени, мм	80
Толщина мишени, мм	6
Толщина перегородки кольца	1 мм+1мм до корпуса магнетрона
Толщина кольца (размер контакта кольца с корпусом магнетрона), мм	1

Конструкция в виде кольца обеспечивает более устойчивую работу системы. Энергия ионного тока, поступающая на поверхность мишени, тратится на ее распыление, а также на разогрев. В обычных магнетронах мишень плотно прижата к корпусу магнетрона, охлаждаемого водой (в противном случае, если не будет охлаждения, то магниты разогреются выше точки Кюри, и МРС перестанет работать). В этом случае тепло выводится из мишени за счёт хорошего теплопроводного контакта с охлаждаемым корпусом магнетрона, поэтому она разогревается незначительно. Сток тепловой энергии из мишени можно ограничить, если реализовать конструкцию, показанную на рисунке 2.2, где теплопроводный контакт с системой охлаждения минимальный. Тогда тепловая энергия пойдёт на разогрев мишени, и скорость сублимации её вещества (это – хром) может стать заметной.

При проведении экспериментов использовалась вращающаяся магнитная система с частотой 2 оборота в секунду. Данное конструкторское решение помогает решить проблему с локальными перегревами на поверхности мишени.

Образцы были закреплены на подложкодержателе и помещены в камеру. Подложкодержатель устанавливался неподвижно напротив хромовой мишени, вращение отсутствовало. Камера откачивалась до давления  $10^{-3}$  Па. Далее запускался аргон (Ar) чистотой 99,99%. Рабочее давление в камере поднималось до 0,3-0,5 Па. Эксперименты по осаждению пленок Cr проводились при различной мощности МРС от 300 до 1600 Вт. При 300, 500

и 1000 Вт соответственно на подложку подавалось отрицательное смещение  $U_{смещ} = - 100$  В. Поверхности подложек предварительно очищались 2 минуты при  $U_{смещ} = - 1$  кВ. Все эксперименты проводились в течение 20 минут, за исключением 300 Вт. Время осаждения для данного случая составило 40 минут. В течение осаждения каждые 2 минуты фиксировалась температура подложки, вольт-амперные характеристики и давление в камере. Температура на подложке измерялась с помощью термопары прикреплённой к задней стороне подложки.

## 2). Осаждение пленок на основе нитрида хрома

На рисунке 2.3 представлена схема установки, на которой происходило осаждение покрытий на основе нитрида хрома.

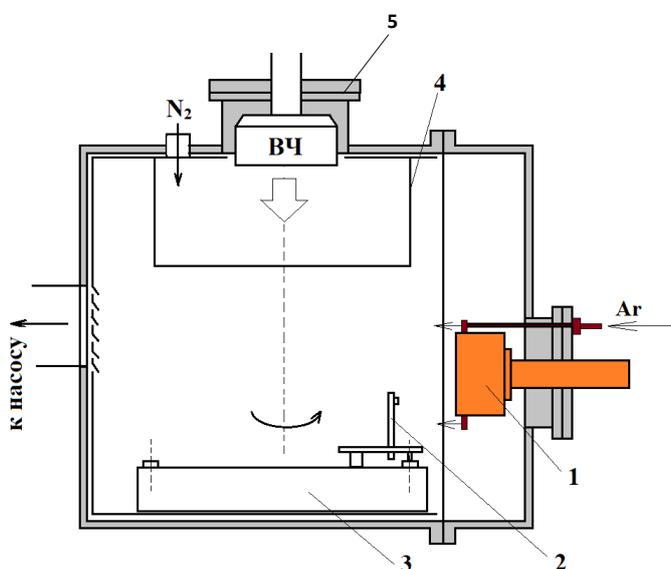


Рисунок 2.3 – Схема установки: 1 – магнетронная распылительная система; 2 – подложкодержатель; 3 – вращающийся столик; 4 – экран; 5 – ВЧ источник плазмы

В вакуумной камере установлен ВЧ источник плазмы, он необходим для диссоциации молекул азота и ионизации. Столик и подложкодержатели вращались (планетарное вращение подложек было реализовано).

Присутствует отдельная подача потоков азота и аргона. Аргон подавался непосредственно рядом с мишенью, а азот рядом с ВЧ источником.

При проведении экспериментов использовалась вращающаяся магнитная система с частотой 2 оборота в секунду. Температура фиксировалась инфракрасным пирометром. Напуск азота в камеру составлял  $55 \text{ см}^3/\text{мин}$ , аргона –  $45 \text{ см}^3/\text{мин}$ . Мощность ВЧ источника плазмы – 0,5 кВт.

Предварительно образцы в камере подвергались ионной очистке в течение 30 минут при  $U = 2500 \text{ В}$ .

Эксперименты по осаждению пленок проводились при различной мощности МРС: 800, 1000, 1200 и 1400 Вт соответственно. Эксперимент при 800 Вт проводился в течение 60 минут, 1000 В – 45 минут, 1200 Вт – 30 минут и 1400 Вт – 20 минут. На образцы подавалось смещение - 20 В.

### 2.1.2 Диагностическое оборудование

После проведения экспериментов определялась толщина полученных покрытий с помощью Calotest и СЭМ. Данные методы описаны ниже.

#### 1). Метод сферического шлифа

Метод сферического шлифа – один из способов измерения толщины покрытий (толстых, более 1 мкм). Определение толщины (рисунок 2.4) проводится с помощью прибора типа Calotest. Он позволяет измерять толщины плёнок в диапазоне от 1 до 50 мкм с точностью  $\pm 3\%$ .

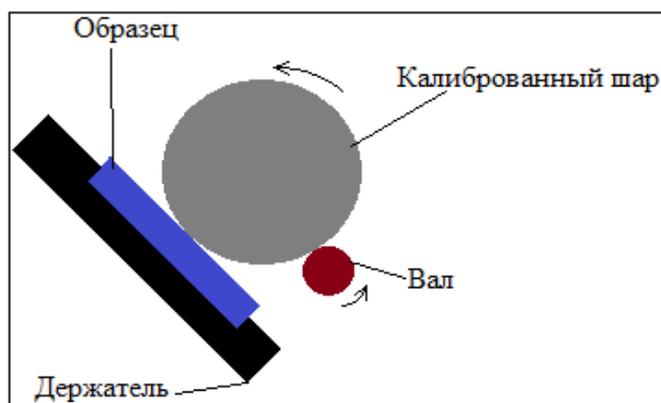


Рисунок 2.4 – Схема прибора для измерения толщины покрытий.

Образец закрепляется в держателе, на него устанавливается калиброванный шар диаметром 1 дюйм. Вал приходит в движение, вынуждая шар совершать движение обратного направления. Положение шара по отношению к образцу и нагрузка в зоне контакта постоянно.

После формирования сферического шлифа на поверхности образца (рисунок 2.5) происходит его анализ с помощью оптического микроскопа.

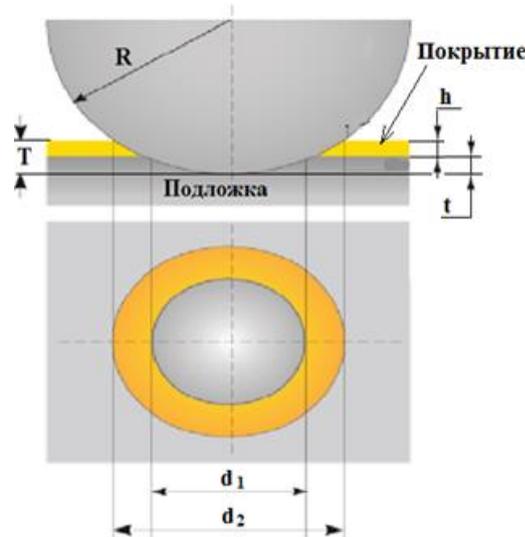


Рисунок 2.5 – Изображение сферического шлифа:  $R$  – радиус шара,  $T$  – глубина сферического кратера,  $t$  – глубина кратера в материале подложке,  $h$  – толщина покрытия.

Расчёт толщины покрытия происходит 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 (1) примет вид:

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

После добавления абразивной суспензии в зону контакта, шар вырабатывает сферическую лунку в поверхности образца (в покрытии и субстрате).

## 2). Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Сканирующий электронный микроскоп — это прибор, предназначенный для получения увеличенного изображения объекта путем сканирования по объекту сфокусированным пучком электронов и регистрации детектором сигнала, возникающего в результате взаимодействия электронов с веществом.

Принципиальная схема сканирующего электронного (рисунок 2.6) микроскопа включает в себя источник электронов, оптическую систему для фокусировки электронов и сканирования (электронную колонну), камеру с образцом и детекторы для регистрации сигнала, а также систему откачки, необходимую для создания вакуума в микроскопе. Необходимо помнить, что в воздухе электрон не сможет долететь от источника до образца, т.к. столкнется с молекулами воздуха на своем пути, поэтому вакуум в пушке, колонне и камере микроскопа является необходимым условием для работы микроскопа.

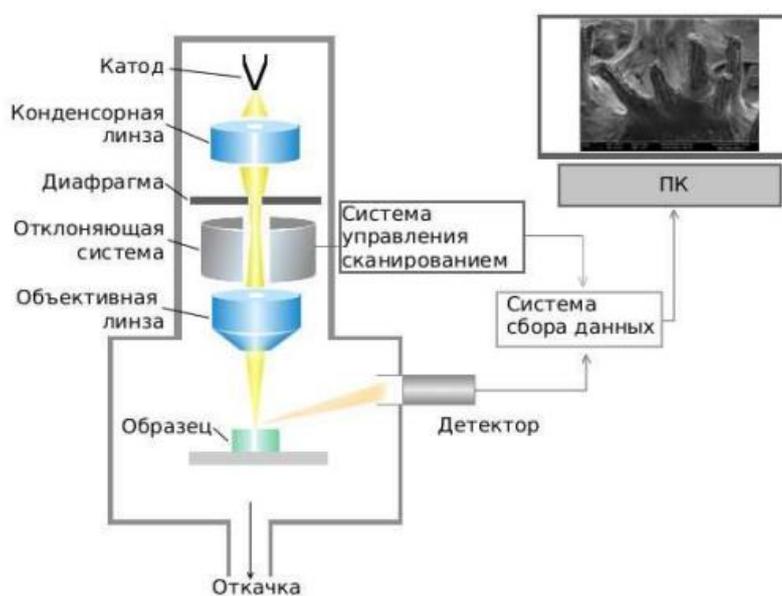


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема СЭМ

Испускаемые катодом электроны, проходя через систему электронной оптики, фокусируются и ускоряются в направлении образца. В процессе сканирования сфокусированным пучком по поверхности образца происходит эмиссия вторичных электронов, которые регистрируются детектором. Таким образом, на систему сбора данных поступает информация о координатах пучка на образце и величине сигнала с детектора. При построении изображения каждой точке образца приписывается яркость пропорциональная величине сигнала, измеренного в момент, когда пучок находился в этой точке.

В исследованиях был использован сканирующий электронный микроскоп Quanta 200 3D.

### **2.1.3 Порядок проведения экспериментов по измерению тока и напряжения в цепи МРС с горячей мишенью и измерению температуры подложки**

Во время проведения экспериментов каждые 2 минуты фиксировалось значение вольт-амперных характеристик в цепи МРС с горячей мишенью, значения температуры на поверхности подложки, а также давление в камере.

При проведении экспериментов по осаждению пленок хрома измерение температуры осуществлялось с помощью термопары, которая прикреплялась к задней стороне подложки. Термопара – старейший и до сих пор наиболее распространенный в промышленности температурный датчик. Действие термопары основано на эффекте, который впервые был открыт и описан Томасом Зеебеком в 1821 г. – возникновении тока в замкнутой цепи из двух разнородных проводников при наличии градиента температур между спаями.

При осаждении пленок на основе нитрида хрома, а, следовательно, при использовании вращения подложки температуру измеряли с помощью инфракрасного пирометра. Измерение происходило в момент, когда подложка проходила мимо направленного в камеру луча пирометра. Пирометр предназначен для дистанционного измерения температуры

поверхности твёрдых тел. Принцип действия инфракрасного термометра основан на измерении амплитуды электромагнитного излучения от объекта в инфракрасной части спектра и последующем пересчётом измеренного значения в мощность теплового излучения.

После измерения толщины покрытий по методикам, описанным выше, была рассчитана скорость осаждения по следующей формуле:

$$V_{dep} = \frac{d}{t}, \quad (2.5)$$

где  $d$  – толщина покрытий, м;

$t$  – время осаждения, мин.

## **2.2. Описание расчётных методик и использованных программных кодов**

Для расчета тепловых процессов в мишени, скорости сублимации, плотности потока частиц и скорости осаждения за счет сублимации, а также потоков энергии на подложку использовался программный код «Hot target». Скорости распыления, плотности потоков частиц и энергии, поступающих на подложку за счет распыления мишени определялись с помощью программного кода «HIPIMS». Обе эти программы разработаны в НОЦ Б.П. Вейнберга ТПУ. Коэффициенты распыления, необходимые для организации вычислений, были рассчитаны по программе SRIM (в свободном доступе на сайте [19]). Для оценки рассеяния расплывённых частиц при их движении от мишени к подложке была использована программа «SIMTRA» (в свободном доступе на сайте [20]). Ниже подробнее рассмотрим описание каждой программы.

### **2.2.1. Модель эрозии мишени с сублимирующей хромовой мишенью и методика Ламберта-Кнудсена**

Интенсивность потока атомов и молекул, расплывённых или сублимированных на поверхности мишени, в первом приближении можно рассматривать как косинусоидальное распределение:

$$I = I_0 \cos(\varphi) \quad (2.6)$$

где  $\varphi$  – угол между нормалью к поверхности элементарной площадки на поверхности мишени и вектором, соединяющим центры элементарных площадок мишени и подложки.

Скорость роста толщины осаждаемого покрытия при распылении с некоторой элементарной площадки подложки, расположенной параллельно поверхности мишени, может быть описана с использованием второго закона Ламберта-Кнудсена [21]:

$$V_{dep} = \frac{v_i dS_i \cos^4 \varphi_i}{\pi n_0 L^2}, \quad (2.7)$$

где  $v_i$  – скорость движения распылённых частиц с элементарной площадки  $dS_i$ ;

$\varphi_i$  – угол между нормалью от элементарной площадки  $dS_i$  и центром осаждения на элементарную площадку  $dS_{xy}$ ;

$L$  – расстояние между мишенью и подложкой.

Плотность потока осаждаемых частиц в любой точке на подложке с координатами  $(X, Y)$  в любой момент времени  $t$  складывается из распыленных и испаренных атомов [22]:

$$F_{dep}(X, Y, t) = F_{dep,sput}(X, Y, t) + F_{dep,ev}(X, Y, t) \\ = \frac{L^2 n_0}{n} \iint_{S_{tag}} \frac{(V_{sput}(x_{tag}, y_{tag}, t - t_{fly}) + V_{ev}(x_{tag}, y_{tag}, t - t_{fly})) dx_{tag} dy_{tag}}{(L^2 + (X - x_{tag})^2 + (Y - y_{tag})^2)^2}, \quad (2.8)$$

где  $F_{dep,sput}$  и  $F_{dep,ev}$  – плотности потоков осаждаемых распыленных и испаренных атомов;

$n_0$  – ядерная плотность вещества покрытия, которая в расчетах предполагается равной ядерной плотности вещества мишени;

$L$  – расстояние между параллельно расположенными мишенью и подложкой;

$S_{tag}$  – площадь поверхности мишени;

$t_{fly}$  – время движения частицы, эмитированной с поверхности мишени в точке с координатами  $(x_{tag}, y_{tag})$ , до подложки в точку с координатами  $(X, Y)$ .

$$\text{Скорости осаждения, выраженная в м/с, } V_{dep} = F_{dep} n_0. \quad (2.9)$$

### **2.2.2. Описание комплекса программ для расчёта скоростей эрозии и осаждения при работе магнетрона с теплоизолированной мишенью**

В этом разделе описана математическая модель тепловых и эрозионных процессов в мишени МРС, имеющей ограниченный тепловодный контакт с охлаждаемым корпусом магнетрона [22].

Механизмы распыления и испарения частиц с поверхности мишени имеют различную природу и не оказывают существенного влияния друг на друга. Следовательно, можно предположить, что поток атомов с сильно нагретой поверхности мишени состоит из двух независимых компонентов: распыленных и испаренных частиц. В этом случае скорость перемещения межфазной границы, разделяющей конденсированную и газообразную фазы представляется в виде суммы:

$$V = V_{ev} + V_{sput}, \quad (2.10)$$

где  $V_{ev}$  – скорость перемещения межфазной границы за счет испарения (скорость испарения с поверхности мишени);

$V_{sput}$  – скорость перемещения межфазной границы за счет распыления (скорость распыления мишени);

$V$  – общая скорость эрозии поверхности.

Скорость распыления пропорциональна плотности ионного тока  $I_{ion}$  для ионов, извлеченных из плазмы, расположенной вблизи мишени, и коэффициенту распыления  $S$ :

$$V_{sput} = \frac{S \cdot I_{ion}}{e \cdot n_0}, \quad (2.11)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$n_0$  – ядерная плотность вещества мишени.

Коэффициент распыления  $S$  зависит от энергии ионов  $E_0$ . Ионы приобретают эту энергию в результате ускорения в катодной области из-за разности электрических потенциалов. Эта энергия приблизительно равна напряжению в разрядном промежутке, которое обычно составляет не более 1 кэВ для магнетронов. Используя формулу Зигмунда, можно вычислить коэффициент распыления [23]:

$$S = \frac{3}{4\pi^2} \alpha \frac{\gamma E_0}{U_s}, \quad (2.12)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2};$$

$M_1$  и  $M_2$  – атомные массы распыляющего иона и материала мишени соответственно;

$\alpha$  – параметр, зависящий от соотношения масс  $\frac{M_2}{M_1}$ ;

$U_s$  – энергия связи на поверхности мишени.

Тогда скорость распыления может быть представлена следующим образом:

$$V_{sput} = \frac{3\alpha M_1 M_2 W_{ion}}{\pi^2 (M_1 + M_2)^2 n_0 U_s}, \quad (2.13)$$

где  $W_{ion}$  – плотность мощности ионного тока, направленного на мишень.

Программный код HIPIMS для расчета скорости распыления содержит в себе формулу (2.8). Коэффициенты распыления рассчитываются с помощью программы SRIM и задаются во входном файле.

Скорость испарения в вакууме рассчитывалась с использованием уравнения Герца-Кнудсена [24]:

$$V_{ev}(T) = \frac{1}{n_0 (2\pi m k T)^{\frac{1}{2}}} (P_{sat}(T) - P^*), \quad (2.14)$$

где  $m$  – масса испаренного атома (молекулы);

$k$  – постоянная Больцмана;

$P_{sat}(T)$  – давление насыщенного пара при температуре поверхности

$T$ ;

$P^*$  – гидростатическое давление над поверхностью испарения.

Для определения скорости испарения необходимо рассчитать температуру на поверхности мишени МРС.

Температурное поле и скорость испарения рассчитываются при решении краевой задачи, сформулированной на основе уравнения теплопроводности. Это уравнение записывается в цилиндрической системе координат с азимутальной симметрией. С учетом фазовых превращений первого порядка его можно представить следующим образом:

Ось  $OZ$  направлена перпендикулярно облучаемой поверхности, вдоль направления падения пучка ионов, ось  $Or$  – вдоль поверхности (рисунок 2.7)

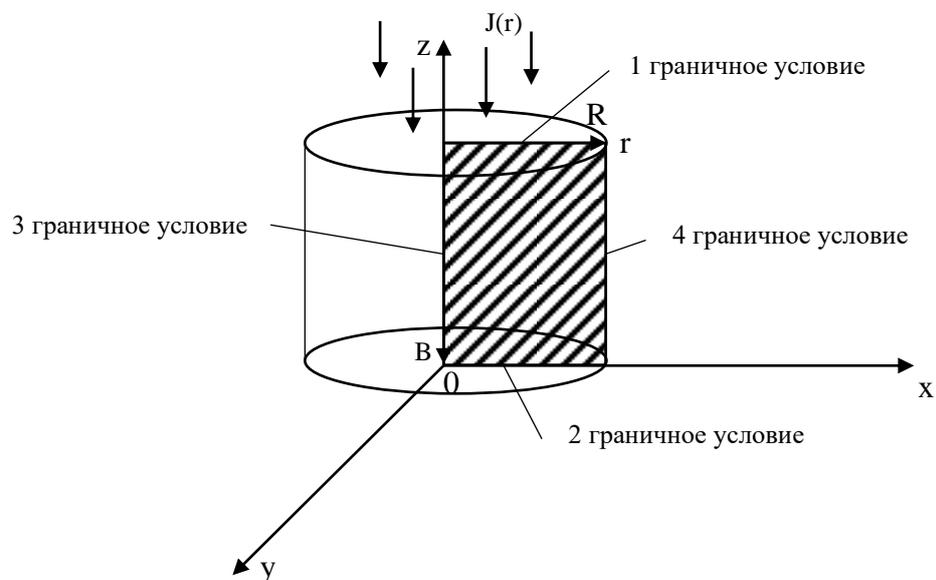


Рисунок 2.7 – Цилиндрическая система координат с азимутальной симметрией

Поле температур и скорость испарения рассчитываются при решении краевой задачи, сформулированной на основе уравнения теплопроводности, записанного в цилиндрической системе координат с азимутальной симметрией. Уравнение в частных производных:

$$c\rho \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \lambda(z, r) \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} \right), \quad (2.15)$$

где  $\frac{\lambda(z, r)}{c\rho}$  можно заменить на коэффициент температуропроводности

«а», который является постоянной величиной. Получим:

$$\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} \right) \quad (2.16)$$

Начальные условия (в начальный момент времени):

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad (2.17)$$

Граничные условия (на границах мишени):

1. На облучаемой поверхности:

$$\lambda(z, r) \cdot \frac{\partial T(r, z = 0, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = -q(r, t) + \rho \cdot V_{ev}(r, t) \cdot \Delta H + Q_{rad}(r, t) + Q_s(r, t), \quad (1.4)$$

где  $\rho$  – плотность вещества мишени;

$V_{ev}(r, t)$  – скорость испарения поверхности мишени (сублимации);

$\Delta H$  – разность энтальпий паровой и конденсированной фаз

вещества мишени;

$Q_{rad}(r, t)$  - сток тепла за счет теплового излучения;

$Q_s(r, t)$  – плотность мощности, которую уносят распыленные частицы;

$q(r, t)$  – плотность мощности плазмы, действующей на поверхность мишени, которая принимается равной плотности мощности  $W_i$  тока ионов, образующихся в области газового разряда, с поправкой на энергию ионов, отраженных от поверхности:

$$q(r, t) = j(r, t) \cdot E_0, \quad (2.18)$$

где  $j(r, t)$  – ионный ток;

$E_0$  – энергия частиц.

1. На задней стороне, противоположной поверхности облучения:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T(r, z = b, t)}{\partial z} = Q_{rad}(r, t) \quad (2.19)$$

2. На оси симметрии. Так как используются координаты с азимутальной симметрией, количество тепла, которое приходит, соответствует ушедшему количеству тепла.

$$\lambda \cdot \frac{\partial T(r = 0, z, t)}{\partial r} = 0 \quad (2.20)$$

3. На боковой стороне:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T(r = R, z, t)}{\partial z} = Q_{rad}(r, t) \quad (2.21)$$

На боковой и задних стенках присутствует только тепловое излучение.

### 2.2.3. Программы SIMTRA и SRIM

SIMTRA (Simulation of the metal flux) – это программа, основанная на методе Монте-Карло, разработанная для моделирования потока частиц металла во время магнетронного распыления. Используя определенные поверхности, с помощью программы можно создать геометрическое представление экспериментальной установки, которое визуализируется графическим пользовательским интерфейсом. Движение ряда частиц, созданных с начальными условиями (положение, энергия и направление) от поверхности мишени, отслеживается до тех пор, пока они не пересекут одну из заданных поверхностей. Доступно несколько опций для настройки генерации и транспортировки частиц через газовую фазу, таких как: настраиваемые зоны эрозии, начальное распределение энергии и углов.

Доступны два варианта начального распределения энергии. Он взят либо из файла программы SRIM, либо из аналитического распределения Томпсона. Для углового распределения также может использоваться выходной файл SRIM.

SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) – это набор программных пакетов, основанные на метода Монте-Карло, которые

рассчитывают многие характеристики переноса ионов в веществе: пробег ионов в мишени, характеристики ионной имплантации, распыление, пропускание ионов через слои смешанного газа / твердой мишени и т.п. С помощью данной программы были рассчитаны коэффициенты распыления и энергии ионов при взаимодействии с подложкой.

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

Данный раздел магистерской диссертации предназначен для анализа конкурентоспособности, ресурсоэффективности и расчёта бюджета проводимой разработки. Целью данной магистерской диссертации является выявление закономерностей поступления частиц и энергии на подложку при формировании покрытия на основе нитрида хрома при работе магнетрона с горячей мишенью. Вакуумно-плазменная установка по нанесению покрытий на основе нитрида хрома располагается в лаборатории 101 НОЦ Б. П. Вейнберга. Настоящая работа предполагает исследование эффективности способа решения поставленной инженерной задачи, а именно – применения программного кода «Hot target» и «HIPIMS» в качестве средства для моделирования скоростей осаждения покрытий и потоков частиц и энергий на подложку. Оценка перспективности, планирование и формирование бюджета научного исследования позволяют анализировать его экономическую эффективность.

### **4.1 Предпроектный анализ**

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

Данная работа посвящена технологии изготовления покрытий на основе нитрида хрома при использовании магнетронной распылительной системы. Новизна разработки состоит в использовании системы с «горячей мишенью», которая позволяет увеличивать скорость осаждения покрытий при мощности источника MPC 1600 Вт почти в 5 раз.

Пленки нитрида хрома обладают высокой температурой плавления, достаточной твердостью, износостойкостью, электро- и теплопроводностью. Однако параллельно было обнаружено, что эти характеристики существенно зависят от фазового состава, структуры покрытий, степени текстурированности, пористости и т.п. Это указывало на наличие прямой

взаимосвязи между способами получения материала и его свойствами. Получить пленки нитрида хрома можно методом вакуумно-дугового испарения в вакууме, ионного распыления и магнетронного реактивного распыления в среде азота. Последний метод позволяет получить пленки высокого качества, но проблемой остается низкие скорости осаждения покрытий, по сравнению с другими методами. Для решения данной проблемы была разработана новая схема конструкции, имеющий ограничивающий теплопроводный контакт с мишенью, позволяющий ее разогревать до таких температур, которые приводят к еще 1 механизму эрозии поверхности – сублимации.

Разработанная технология может быть востребована на любом производстве, связанном с технологиями тонких плёнок.

#### **4.1.2 Анализ конкурентных технических решений**

Анализ конкурентных технических решений позволяет производить сравнения между конкурирующими разработками и определить тенденции для ее дальнейшего роста.

Данное исследование целесообразно производить с использованием оценочной карты, показанной в таблице 4.1. Для этого были определены 2 конкурента на рынке технологии нанесения покрытий на основе нитридов методом высокоскоростного магнетронного распыления из жидкой фазы ( $B_1$ ) и технология среднечастотного магнетронного распыления ( $B_2$ ).

Расчет показателя конкурентоспособности производился по следующей формуле:

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i, \quad (4.1)$$

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		
		$B_{\phi}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$K_{\phi}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
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
<b>Экономические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
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
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>46</b>	<b>35</b>	<b>43</b>	<b>4,55</b>	<b>3,66</b>	<b>3,84</b>

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 надежна, а также имеет высокую производительность.

## 4.2 SWOT анализ

SWOT-анализ проводится для комплексной оценки внешней и внутренней среды проекта. При SWOT-анализе рассматриваются сильные и слабые стороны, возможности и угрозы применительно к способу решения

поставленной задачи. Итоговая матрица SWOT-анализа приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны:</b>  С1. Предварительное моделирование.  С2. Высокая производительность метода  С3. Высокое качество получаемых покрытий  С4. Простая методика получения пленок</p>	<p><b>Слабые стороны:</b>  Сл1. Сложность управления некоторыми параметрами эксперимента  Сл2. Быстрое изнашивание мишени  Сл3. Использование устаревшего оборудования для нанесения покрытий  Сл4. Сложность измерения некоторых характеристик во время проведения эксперимента</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1. Повышение стоимости конкурентных разработок  В2. Использование инновационной структуры ТПУ</p>	<p>1. Получение технологии исследования  2. Продвижение технологии на рынке</p>	<p>1. Приобретения необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ  2. Сокращение поставок или смена поставщика  3. Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др.</p>
<p><b>Угрозы:</b>  У1. Отсутствие спроса на технологию  У2. Введение дополнительных гос. требований к сертификации технологии</p>	<p>1. Продвижение технологии с целью создания спроса  2. Сертификация и стандартизация технологии</p>	<p>1. Приобретение необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ  2. Продвижение технологии с целью создания спроса</p>

По итогам SWOT-анализа выявлены возможности для дальнейшего развития и автоматизации технологии для создания покрытий на основе нитрида хрома.

Для противодействия угрозе У1 следует приобрести и ввести в эксплуатацию современное оборудование, чтобы увеличить

производительность и качество получаемых покрытий, но, так как стоимость таких установок значительно высока, необходимо активное участие принимать в конкурсах на гранты для разработок научных исследований. Также необходимо участвовать в различных конференциях и вебинарах с целью продвижения технологии.

Для противодействия угрозе У2 необходимо своевременно сертифицировать и стандартизировать технологии в соответствии с актуальными ГОСТами РФ. В случае, если этим пренебречь, разработанная технология может не выйти в промышленное использование.

### **4.3 Планирование научно-исследовательский работ**

#### **4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования**

Прежде чем начать работу над проектом, необходимо провести планирование этапов работы, обозначив при этом занятость каждого из участников, а также привести сроки выполнения каждого этапа. Работа выполнялась студентом (инженер) под руководством научного руководителя. Структура работ и распределение занятости исполнителей приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность
Разработка технического задания	1	Постановка целей и задачи исследования	Руководитель – 100%
	2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель – 100%
Выбор направления исследований	3	Выбор направления исследований и способа решения задач	Руководитель – 100%
	4	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер – 100 %
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Составление плана экспериментов	Руководитель – 20%, Инженер – 80%
	6	Подготовка образцов для экспериментов	Инженер – 100 %
	7	Проведение экспериментальных работ	Руководитель – 50%, Инженер – 50%
	8	Выполнение расчётов	Инженер – 100%
Обобщение и оценка результатов	9	Анализ и обработка полученных результатов	Инженер – 100%
	10	Обсуждение и оценка эффективности результатов	Руководитель – 50%, Инженер – 50%
Оформление отчета по НИР	11	Составление пояснительной записки	Инженер – 100%
	12	Подготовка к защите	Инженер – 100%

#### 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работы

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 определяется по формуле:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2 \cdot t_{\text{max}}}{5} \quad (4.2)$$

где  $t_{ож}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения работы, чел.дн;

$t_{min}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, чел.дн;

$t_{max}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной работы, чел.дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{рд}$ :

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{Ч_i} \quad (4.3)$$

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

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

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Постановка целей и задачи исследования»:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел. – дн}$$

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{Ч_i} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ раб. дн}$$

### **4.3.3 Разработка графика проведения научно-технического 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:

$$T_{кд} = T_{рд} \cdot К_{кд}, \quad (4.4)$$

где  $T_{КД}$  – продолжительность выполнения работы в календарных днях;

$T_{РД}$  – продолжительность выполнения работы в рабочих днях;

$K_{КД}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$K_{КД} = \frac{T_{КД}}{T_{КД} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (4.5)$$

где  $T_{КД}$  – количество календарных дней в году;

$T_{ВД}$  – количество выходных дней в году;

$T_{ПД}$  – количество праздничных дней в году.

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

$$K_{КД} = \frac{T_{КД}}{T_{КД} - T_{ВД} - T_{ПД}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48$$

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

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot K_{КД} = 2,8 \cdot 1,48 = 4,144 \approx 4 \text{ кал. дн.}$$

Все полученные значения в календарных днях округлялись до целого числа. Результаты представлены в таблице 4.4, где Р – руководитель, И – инженер.

Таблица 4.4 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Название работы	Трудоёмкость						Длит-сть в рабочих днях, Т <sub>РД</sub>		Длит-сть в календарных днях, Т <sub>КД</sub>	
	t <sub>min</sub> , чел.-дн.		t <sub>max</sub> , чел.-дн.		t <sub>ож</sub> , чел.-дн.					
	Р	И	Р	И	Р	И	Р	И	Р	И
Постановка целей и задач исследования	2		4		2.8		2.8		4.1	
Составление и утверждение технического задания	2		4		2.8		2.8		4.1	
Выбор направления исследований и способа решения задач	2		4		2.8		2.8		4.1	
Подбор и изучение материалов по теме		21		28		23.8		23.8		35.2
Составление плана экспериментов	1	4	2	5	1.4	4.4	0.7	2.2	1	3.3
Подготовка образцов для экспериментов		3		5		3.8		3.8		5.6
Проведение экспериментальных работ	14	24	20	34	16.4	28	8.2	14	12.1	20.7
Выполнение расчетов		10		15		12		12		17.8
Анализ и обработка полученных результатов		6		10		7.6		7.6		11.2
Обсуждение и оценка эффективности результатов	5	5	10	10	7	7	3.5	3.5	5.2	5.2
Составление пояснительной записки		4		6		4.8		4.8		7.1
Подготовка к защите		4		6		4.8		4.8		7.1
Итого					33.2	96.2	20.8	76.5	30.8	113.2

Таблица 4.5 – Линейный график работы

Этап	Р	И	Март			Апрель			Май		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90
Постановка целей и задач исследования	2.8		■								
Составление и утверждение технического задания	2.8		■								
Выбор направления исследований и способа решения задач	2.8		■								
Подбор и изучение материалов по теме		23.8	▨	▨	▨						
Составление плана экспериментов	0.7	2.2		▨							
Подготовка образцов для экспериментов		3.8		▨							
Проведение экспериментальных работ	8.2	14		■	■						
Выполнение расчетов		12				▨	▨				
Анализ и обработка полученных результатов		7.6					▨	▨			
Обсуждение и оценка эффективности результатов	3.5	3.5						■	▨		
Составление пояснительной записки		4.8							▨		
Подготовка к защите		4.8								▨	

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**

Планирование бюджета позволяет оценить затраты на проведение исследования до его фактического начала и позволяет судить об экономической эффективности работы. В данном разделе подсчитываются следующие статьи расходов:

- материальные затраты;
- амортизационные отчисления;
- заработная плата исполнителей;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы.

##### **4.4.1 Расчет материальных затрат**

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).

Теоретические исследования, а также моделирование системы требуют ряд программных продуктов: Microsoft Office, NIPIIMS, HOT TARGET, SRIM др. Большинство из них предоставляются бесплатно для студентов ТПУ, другие находятся в свободном доступе в сети «Интернет».

Расчёт материальных затрат приведён в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Сырье, материалы и комплектующие изделия.

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Баллон Водорода	H <sub>2</sub> , 99,99%	1	13000	13000
Баллон Аргон	Ar, 99,99%	1	9000	9000
Всего за материалы				22000
Транспортно-заготовительные расходы (3–5%)				1760
<b>Итого по статье</b>				<b>23760</b>

#### 4.4.2 Расчёт амортизационных отчислений

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	ВЧ – генератор COMDEL CB 5000	1	7	1000	1000
2	Генератор плазмы РПГ-128	1	10	2000	2000
<b>Итого:</b>					<b>3000 тыс. руб.</b>

Норма амортизации  $N_A$  рассчитывается как:

$$N_A = \frac{1}{T} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

где  $T$  – срок полезного использования, лет.

Если принять срок полезного использования равным 7 годам для ВЧ – генератора COMDEL CB 5000 тогда норма амортизации  $N_A$ :

$$N_A = \frac{1}{7} \cdot 100\% = 14,3\%$$

Амортизация:

$$A = \frac{N_{AI}}{12} m, \quad (4.7)$$

где И – итоговая сумма, тыс. руб.;

$m$  – время использования, мес.

Таким образом, для ВЧ – генератора COMDEL СВ 5000 амортизация будет составлять:

$$A = \frac{0,143 \cdot 1000000}{12} \cdot 0,5 = 5958 \text{ руб}$$

Для генератора плазмы РПГ-128:

$$N_A = \frac{1}{10} \cdot 100\% = 10\%$$

$$A = \frac{0,1 \cdot 2000000}{12} \cdot 0,5 = 8333 \text{ руб}$$

Суммарные затраты амортизированных отчислений:

$$A = 5958 + 8333 = 14291 \text{ руб}$$

#### **4.4.3 Расчёт заработной платы и отчислений во внебюджетные фонды**

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

Заработная плата включает в себя основную и дополнительную части:

$$Z_{п} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (4.8)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата, руб.

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.

Заработная плата основная:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{рд} \cdot (1 + K_{пр} + K_{д}) \cdot K_{р} \quad (4.9)$$

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

$K_{пр}$  – премиальный коэффициент (0,3);

$K_{д}$  – коэффициент доплат и надбавок (0,2-0,5);

$K_{р}$  – районный коэффициент (для Томска 1,3);

$T_{РД}$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дни

Среднедневная заработная плата:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_D} \quad (4.10)$$

где  $Z_M$  – оклад работника за месяц, руб.

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб.дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб.дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени персонала, раб.дн.

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени (для 6-дневной недели)

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

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{гс}$ , руб.	$K_{ПР}$	$K_D$	$K_P$	$Z_M$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_{РД}$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель	24960	0,3	0,3	1,3	51917	2608	21	54757
Инженер	12664	0,3	0,3	1,3	26341	1323	77	101868
<b>Итого <math>Z_{осн}</math></b>								156625

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

Таким образом, дополнительная заработная плата, по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (4.11)$$

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

Таблица 4.10 – Заработная плата исполнителей проекта

Исполнитель	Руководитель	Инженер
Основная зарплата, руб.	54757	101868
Дополнительная зарплата, руб.	8213,5	15280,2
Суммарная зарплата, руб.	62970,65	117148,3
Итого по статье, руб	180118,9	

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

$$Z_{\text{внеб}} = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \cdot K_{\text{внеб}} \quad (4.12)$$

где  $K_{\text{внеб}}$  – 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	62970,65	18891,2
Инженер	117148,3	35144,5
Итого:		54035,68

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы и т.д. Величина коэффициента накладных расходов принимается в размере 16%. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (Z_{\text{мат}} + Z_{\text{амор}} + Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}) = 0,16 \cdot (26760 + 14291 + 156625 + 23493 + 54035) = 44032,64 \text{ руб} \quad (4.13)$$

#### 1.4.4 Формирование бюджета затрат

Рассчитанная величина затрат проектной работы является основной для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается проектной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку. Данные бюджета затрат ТП приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Бюджет затрат

Наименование	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты	26760	8.44
Затраты на амортизацию	14291	4.51
Основная заработная плата	156625	49.42
Дополнительная заработная плата	23493	7.41
Страховые взносы	54035	17.05
Накладные расходы	41748	13.17
<b>Итого</b>	<b>316952</b>	<b>100</b>

В ходе подсчёта затрат на разработку проекта выявлено, что основная часть (49,42%) средств расходуется на заработную плату исполнителей.

### 4.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности исследования

#### 4.5.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

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 ближайšie аналоги магнетронного распыления с «горячей» мишенью ( $\Phi_{p1}=316952$ ), электролитический метод осаждения пленок ( $\Phi_{p2}=420000$ ) и дуговые источники плазмы ( $\Phi_{p3}=540000$ ).

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (4.14)$$

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

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

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

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{316952}{540000} = 0,58$$

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}2} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{420000}{540000} = 0,77$$

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}3} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{540000}{540000} = 1$$

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).

#### 4.5.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

Оценка ресурсоэффективности проекта определялась посредством расчета интегрального критерия по формуле:

$$I_{\text{исп}i} = \sum a_i \cdot b_i \quad (4.15)$$

где  $I_{\text{исп}i}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент проекта;

$b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным 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:

$$I_{\text{исп1}} = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,13 \cdot 4 + 0,12 \cdot 4 = 4,25$$

$$I_{\text{исп2}} = 0,25 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,13 \cdot 2 + 0,12 \cdot 4 = 3,29$$

$$I_{\text{исп1}} = 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 5 + 0,13 \cdot 4 + 0,12 \cdot 4 = 3,9$$

#### 4.5.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

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

$$I_{\text{исп1}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{фин.р}}} = \frac{4,25}{0,58} = 7,32$$

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

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{исп2}}} = \frac{758}{4,27} = 1,77 \quad (4.16)$$

Таблица 4.14 - Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

<b>№ п/п</b>	<b>Показатели</b>	<b>Исп.1</b>	<b>Исп.2</b>	<b>Исп.3</b>
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,58	0,77	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,25	3,29	3,9
3	Интегральный показатель эффективности	7,32	4,27	3,9
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,71	1,87

## **Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность»**

В данном разделе была проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности научного исследования:

1. Выявлены потенциальные потребители результатов исследования. Разработанная технология может быть востребована на любом производстве, связанном с технологиями тонких плёнок. (см. подраздел 4.1.1).

2. Проведён анализ конкурентных технических решений. Были определены 2 конкурента на рынке технологии нанесений покрытий на основе нитридов: метод высокоскоростного магнетронного распыления из жидкой фазы и технология среднечастотного магнетронного распыления (см. подраздел 4.1.2). Разрабатываемая нами технология имеет преимущество, относительно конкурентов, за счет компактной и безопасной технологии, простотой в эксплуатации и надежности, а также высокой скорости производительности.

3. В ходе SWOT-анализа основными угрозами обозначены: отсутствие спроса на технологию и введение дополнительных гос. требований к сертификации технологии. Возможные пути снижения влияния выявленных угроз представлены в подразделе 4.2.

4. Подсчёт затрат (см. подраздел 4.4) на разработку позволяет заключить, что основной статьёй расходов в научно-исследовательской работе является заработная плата исполнителей: основная – 156625 руб. (49,42%), дополнительная – 23493 руб. (7,41%). На втором месте страховые взносы – 54035 руб. (17,05%). Затем идут накладные расходы – 41748 руб. (13,17%). Меньше всего средств уходит на амортизацию оборудования – 14291 руб. (4,51%) и на материальные затраты – 26760 руб. (8,44%). Общий бюджет разработки составил 316952 руб. При этом запланированная продолжительность работы составляет 76,5 дней (см. подраздел 4.3).

5. В подразделе 4.5 оценена экономическая эффективность разработки. Были выбраны ближайшие аналоги магнетронного распыления с «горячей»

мишенью, электролитический метод осаждения пленок и дуговые источники плазмы. Разрабатываемая система превосходит аналоги №2 и №3 по ресурсоэффективности в виду лучшего получения качества покрытий. А также разработка превосходит аналоги по интегральному показателю эффективности в следствии меньшей стоимости реализации проекта.

## Глава 5. Социальная ответственность

В настоящей магистерской диссертации ведется исследование условий осаждения пленок на основе хрома и нитрида хрома методом реактивного магнетронного напыления с «горячей мишенью».

Процесс нанесения покрытий осуществлялся на вакуумно-плазменной установке. Исследование предполагает работу с высоким напряжением и различными газами. Алгоритм процесса представлен ниже:

1. Подготовка образцов с помощью шлифовально-полировальной машины;
2. Загрузка образцов в рабочую камеру;
3. Откачка воздуха, создание вакуума;
4. Подача напряжения на МРС, мощность источника питания которой варьировалась от 300 до 1600 Вт;
5. Напыление покрытий;
6. Отключение источника;
7. Развакуумирование камеры;
8. Выгрузка образцов;
9. Анализ полученных данных с помощью специальных программных кодов на ПК.

Научно-технической базой для проведения исследований стала лаборатория 101 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**

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом (ГОСТ 12.0.004-2015 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения).

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальное удостоверение.

К работе на лабораторной вакуумно-плазменной установке допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы и имеющие не менее II группы по электробезопасности.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности, правил безопасной работы с химическими веществами проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в Журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения

инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники, которые будут работать на нем, должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании (ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты).

### 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.

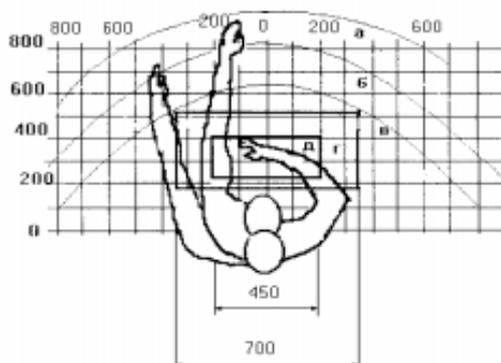


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

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 также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420–550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем. Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране. Должна предусматриваться возможность регулирования экрана. 98 Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края [28].

## **5.2 Производственная безопасность**

Выпускная работа выполнялась на вакуумной установке по магнетронному осаждению. Согласно приведённой выше классификации, были выделены опасные и вредные производственные факторы при работе, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003–2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение
2. Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
3. Повышенный уровень электромагнитного излучения	-	+	+	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.
4. Повышенный уровень шума	-	+	-	ГОСТ 12.1.029-80 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация»
5. Повышенная температура поверхностей оборудования, изделий	-	+	-	ГОСТ 12.2.003-91 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное Общие требования безопасности»
6. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	-	+	-	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов

### 5.3 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя (работающего)

В данном разделе будут представлены решения, обеспечивающие снижение влияния факторов, представленных в таблице 1. Также предлагаются мероприятия, обеспечивающие безопасность технологического процесса и эксплуатации оборудования.

### **5.3.1. Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Согласно СП 52.13330.2016 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 200 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

Лаборатория, в которой производилось нанесение покрытий на основе нитрида хрома имеет следующие размеры  $A = 5,7$  м, ширина  $B = 4,3$  м, высота  $H = 3,7$  м. Высота рабочей поверхности над полом  $h_{рп} = 1,0$  м. Требуется создать освещенность  $E \geq 200$  лк. Данное значение соответствует СП 52.13330.2016 [29]. Площадь помещения равна:

$$S = A \cdot B = 5,7 \cdot 4,3 = 24,51 \text{ м}^2 \quad (5.1)$$

Коэффициент отражения стен (свежепобеленные с окнами, без штор)  $R_c = 50$  %, потолка (свежепобеленный)  $R_n = 70$  %.

Коэффициент запаса (помещение с малым выделением пыли)  $k = 1,5$ , коэффициент неравномерности (для люминесцентных ламп)  $Z = 1,1$ .

Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения.

В лаборатории применяется общая система освещения люминесцентными лампами ЛД.

Выбираем светильники "Светодиодный светильник "ВАРТОН" А270 2.0 офисный встраиваемый/накладной 1195×180×50мм, 30 Вт, 4000К, IP40 с рассеивателем призма стандарт". Внутри данного светильника 2 светодиодные лампы. Световой поток данного светильника составляет 3800 лм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda = L/h$ , характеризующая наивыгоднейшее относительное расстояние между светильниками. Уменьшение  $\lambda$  удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. Для люминесцентных светильников с защитной решёткой  $\lambda$  лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda = 1,2$ .

Расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,3$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_{pp}, \quad (5.2)$$

где  $h_n$  – высота светильника над полом, высота подвеса;

$h_p$  – высота рабочей поверхности над полом.

Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3700 - 300 = 3400 \text{ мм} \quad (5.3)$$

Высота рабочей поверхности над полом:  $h_{pp} = 1000$  мм.

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{pp} = 3400 - 1000 = 2400 \text{ мм} = 2,4 \text{ м}$$

Расстояние между соседними светильниками можно определить по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,2 \cdot 2,4 = 2,88 \text{ м} \quad (5.4)$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$L/3 = 2,88/3 = 0,86 \text{ м}$$

Определим количество рядов светильников и количество светильников в ряду:

$$Nb = \frac{B - \frac{2}{3}L}{L} + 1 = \frac{4,3 - \frac{2}{3} \cdot 2,88}{2,88} + 1 = 1,82 \approx 2 \quad (5.5)$$

$$Na = \frac{A - \frac{2}{3}L}{L_{\text{св}} + 0,5} = \frac{5,7 - \frac{2}{3} \cdot 2,88}{1,195 + 0,5} = 2,23 \approx 3 \quad (5.6)$$

Общее число светильников в помещении определяется по формуле:

$$N = Na \cdot Nb = 2 \cdot 3 = 6 \quad (5.7)$$

В одном светильнике 2 светодиодные лампы, таким образом общее число ламп равно 12.

Таким образом, размещаем по три светильника в 2 ряда. На рисунке изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами. Однако необходимо провести дополнительные расчеты для ширины комнаты, для точного определения расположения светильника, где  $L_1$  – расстояние между светильниками по ширине,  $L_2$  – расстояние между светильниками по длине:

$$B = L_1 + \frac{2}{3}L_1 + 2 \cdot L_{\text{св}} \quad (5.8)$$

$$4300 = \frac{5}{3}L_1 + 2 \cdot 1195$$

$$L_1 = \frac{(4300 - 2390) \cdot 3}{5} = 1146 \text{ мм}$$

$$l = \frac{L_1}{3} = \frac{1146}{3} = 382 \text{ мм}$$

Аналогичные расчеты проводим для длины комнаты, где  $B_{\text{св}}$  – ширина светильника:

$$A = 2L_2 + \frac{2}{4}L_2 + 3 \cdot B_{\text{св}} \quad (5.9)$$

$$5700 = \frac{10}{4}L_2 + 3 \cdot 180$$

$$L_2 = \frac{(5700 - 540) \cdot 4}{10} = 2064 \text{ мм}$$

$$l = \frac{L^2}{4} = \frac{2064}{4} = 516 \text{ мм}$$

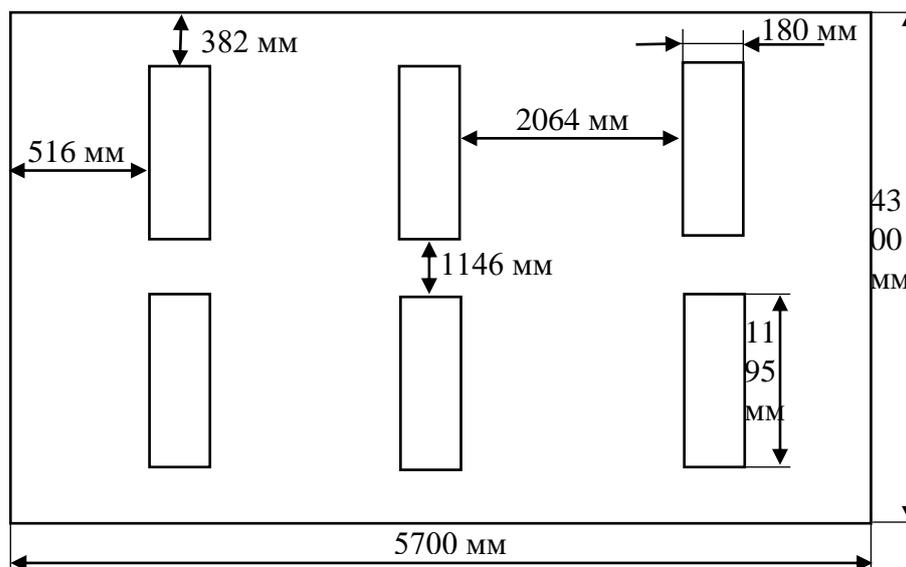


Рисунок 5.2 – Схема размещения светильников в помещении

Находим индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A+B)} = \frac{5,7 \cdot 4,3}{2,6 \cdot (5,7+4,3)} = 0,94 \quad (5.10)$$

Зная величины коэффициентов отражения: коэффициент отражения стен (свежепобеленные с окнами, без штор)  $R_c = 50 \%$ , потолка (свежепобеленный)  $R_n = 70 \%$ , определим коэффициент использования светового потока  $\eta = 33\%$ .

Определяем потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 5,7 \cdot 4,3 \cdot 1,5 \cdot 1,2}{12 \cdot 0,33} = 2228,18 \text{ лм} \quad (5.11)$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{ЛД} - \Phi_{\Pi}}{\Phi_{ЛД}} \cdot 100\% \leq 20\%; \quad (5.12)$$

$$\frac{\Phi_{ЛД} - \Phi_{\Pi}}{\Phi_{ЛД}} \cdot 100\% = \frac{3800 - 2228,18}{3800} \cdot 100\% = 0,41\%$$

Таким образом, получаем  $-10\% \leq 0,41\% \leq 20\%$ .

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = 12 \cdot 30 = 360 \text{ Вт}$$

### 5.3.2 Отклонение показателей микроклимата в закрытом помещении

Микроклимат обеспечивает поддержание теплового равновесия между организмом человека и окружающей средой. Основными факторами, характеризующими метеорологические условия, являются температура воздуха, влажность воздуха и подвижность воздуха.

Длительное воздействие на человека неблагоприятных метеорологических условий резко уменьшает его самочувствие, снижает производительность труда и часто приводит к заболеваниям [30].

Влажность воздуха оказывает значительное влияние на терморегуляцию организма человека. Высокая относительная влажность воздуха при его высокой температуре способствует перегреванию организма. Низкая влажность вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей. Подвижность воздуха весьма эффективно способствует теплоотдаче, что является положительным явлением при высокой температуре окружающей среды и отрицательным - при низкой.

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:

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

Выполняемые работы относятся к Іб 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.

Оптимальные и допустимые показатели температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений должны соответствовать значениям, указанным в таблице 5.2,

согласно СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

Интенсивность теплового облучения работающих от электронного оборудования, электронагревательных и осветительных приборов на постоянных рабочих местах не должна превышать 35 Вт/м<sup>2</sup> при облучении 50% поверхности тела и более, 70 Вт/м<sup>2</sup> при облучаемой поверхности от 25 до 50 % и 100 Вт/м<sup>2</sup> при облучении не более 50 % поверхности тела.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые нормы 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

Согласно санитарным нормам и правилам в производственных помещениях, с объемом до 20 м<sup>3</sup> и площадью 4,5 м<sup>2</sup> на одного работающего, при отсутствии загрязнения воздуха, вентиляция должна обеспечивать подачу наружного воздуха в количестве не менее 30 м<sup>3</sup>/час на каждого работающего. Такой обмен воздуха обеспечивается естественной вентиляцией посредством форточек.

### 5.3.3 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Источником электромагнитных полей промышленной частоты являются ведущие части действующих электроустановок, в том числе ПК. Длительное воздействие электромагнитного поля на организм человека может вызвать нарушение состояния нервной и сердечно-сосудистой систем. Это выражается в повышенной утомляемости, болях в области сердца, изменениях кровяного давления и пульса [31]. В соответствии с ГОСТ 12.1.002-84 [32] нормы допустимых уровней напряженности электрических полей зависят от времени

пребывания человека в контролируемой зоны. Время допустимого пребывания в рабочей зоне в часах составляет:

$$T = 50/E - 2, \quad (5.13)$$

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 ГОСТ12.1.002-84 [32] 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	80

Предельно допустимая напряженность магнитного поля в диапазоне частот 0,06 – 3 МГц в соответствии СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 [31] должна составлять  $H_{пд} = 50$  А/м, предельно допустимая энергетическая нагрузка за рабочий день 200 А/м<sup>2</sup>.

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

#### **5.3.4 Повышенный уровень шума**

Осаждение хромовых пленок и пленок на основе нитрида хрома осуществлялось на вакуумной установке, одними из основных частей которой являются форвакуумный и турбомолекулярный насосы, создающие производственный шум.

Шум неблагоприятно воздействуя на человека вызывает психические и физиологические нарушения, снижающие работоспособность и создает предпосылки для общих и профессиональных заболеваний (тугоухость, неврит слухового нерва и др.), а также для производственного травматизма [33].

В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 [34] допустимый уровень шума при высококвалифицированной умственной работе, требующей сосредоточенности, составляет 55 дБЛ.

Рекомендуется использовать следующие средства коллективной защиты: акустические экраны, выгородки, объемные поглотители звука, виброизолирующие опоры; средства индивидуальной защиты: специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противозумные каски.

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

#### **5.3.5 Повышенная температура поверхностей оборудования, изделий**

Так как температура на поверхности мишени достигает 1630 К при мощности источника питания 1600 Вт источником данного фактора являются нагретые внешние стенки вакуумной камеры. Нагреваются они за счет теплопроводности и теплового излучения. Тепловое излучение также называют «инфракрасным излучением».

Повышенная температура поверхностей оборудования является источником инфракрасного излучения. Основная реакция организма человека на инфракрасное облучение – повышение температуры частей тела (до 1,5-2°C).

Воздействуя на мозговую ткань облучение инфракрасными лучами может вызвать так называемый «солнечный удар». Человек при таком облучении ощущает головную боль, головокружение, учащение пульса и дыхания, нарушение координации движений и даже потерю сознания.

Температура внутренних поверхностей рабочей зоны (стены, пол, потолок), технологического оборудования (экраны и т.д.), наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих конструкций не должна выходить более чем на за пределы оптимальных величин температуры воздуха для данной категории работ, указанных в таблице 2.

Допустимая величина потока энергии инфракрасного излучения на рабочем месте не должна превышать 350 Вт/м<sup>2</sup>. Меры по снижению воздействия инфракрасного излучения состоят в защитном экранировании источников и рабочих мест, использовании средств индивидуальной защиты.

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

Несоблюдение правил ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» может привести к опасным последствиям [35]. Поражение электрическим током

может произойти при прикосновении к токоведущим частям, находящимся под напряжением, на которых остался заряд или появилось напряжение. Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, биологическое и механическое воздействие. Действие электрического тока на человека приводит к травмам или гибели людей. Для переменного тока частотой 50 Гц допустимое значение напряжения прикосновения составляет 2 В, а силы тока – 0,3 мА, для тока частотой 400 Гц, соответственно – 2 В и 0,4 мА, для постоянного тока – 8 В и 1 мА.

Мерами защиты от воздействия электрического тока являются:

1 Защитные оболочки, защитные ограждения (временные или стационарные). В этом случае достигается недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения. Ограждения в виде корпусов выполняются сплошными или сетчатыми. Для доступа непосредственно к электрооборудованию или токоведущим частям в ограждениях предусматриваются открывающиеся части: крышки, дверцы и т.д. Эти части закрываются специальными запорами или снабжаются блокировками.

2 Защитное заземление – это преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Защитное действие заземления основано на снижении напряжения прикосновения при переходе напряжения на нетоковедущие части, что достигается уменьшением потенциала корпуса относительно «земли» как за счет малого сопротивления заземления, так и за счет повышения потенциала примыкающей к оборудованию поверхности земли.

3 Изоляция токоведущих частей. Использование двойной изоляции, состоящей из рабочей и дополнительной изоляции. Дополнительная изоляция предусмотрена для защиты от поражения электрическим током в случае повреждения рабочей изоляции. Дополнительная изоляция может выполняться покрытием металлических конструктивных частей (корпусов,

рукояток и т.д.) слоем изоляционного материала. Для этого целесообразно использовать лаки, смолы, изолирующие пленки. Наиболее совершенным, обеспечивающим практически полную безопасность, является изготовление корпусов электрооборудования из изоляционного материала.

4 Защитное отключение – быстродействующая защита, которая обеспечивает автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения током. Устройства защитного отключения должны осуществлять защиту при глухих и неполных замыканиях на землю, автоматически контроль изоляции, цепей защитного заземления или зануления. К устройствам защитного отключения предъявляются следующие требования: чувствительность, быстродействие (не более 0,2 с), стабильность, надежность, помехоустойчивость.

#### **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.

По степени воздействия на организм человека вредные вещества, согласно ГОСТ 12.1.007-99 [36], делятся на четыре класса опасности:

1. 1-й класс – вещества чрезвычайно опасные (ртуть, свинец, тетраэтилсвинец и др.);

2. 2-й класс – вещества высокоопасные (бензол, марганец, медь, сероводород и др.);

3. 3-й класс – вещества умеренно опасные (толуол, метанол, уксусная кислота и др.);

4. 4-й класс – вещества малоопасные (нефть, бензин, ацетон, этиловый спирт и др.).

Класс опасности вредных веществ устанавливается в зависимости от норм и показателей, указанных в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Класс опасности вредных веществ [36]

Наименование показателя	Норма для класса опасности			
	1-го	2-го	3-го	4-го
Предельно-допустимая концентрация (ПДК), мг/м <sup>3</sup>	Менее 0,1	0,1-1,0	1,1-10,0	Более 10
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	Менее 15	15-150	151-5000	Более 5000
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	Менее 100	100-500	501-50000	Более 50000
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м <sup>3</sup>	Менее 500	500-5000	5001-50000	Более 50000
Коэффициент возможности ингаляционного отравления (КВИО)	Более 300	300-30	29-3	Менее 3
Зона острого действия	Менее 6,0	6,0-18,0	18,1-54,0	Более 54,0
Зона хронического действия	Более 10,0	10,0-5,0	4,9-2,5	Менее 2,5

В данной работе отходами являются продукты реакций, полученные вследствие взаимодействий вакуумно-плазменной установки с хромовыми покрытиями и покрытиями на основе нитрида хрома. 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.

## **5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Возможные ЧС, которые могут возникнуть при осаждении хромовых покрытий и покрытий на основе нитрида хрома методом магнетронной распылительной системы: пожар, террористические действия, диверсия. Основными, наиболее вероятными ЧС, являются возникновение пожара. Причиной пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования.

Согласно федеральному закону от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" помещения, по взрывопожарной и пожарной опасности, подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д. Категории помещений и зданий определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений помещений и характеристик проводимых в них технологических процессов.

Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности делятся на: А – повышенная взрывопожароопасность; Б – взрывопожароопасность; В1-В4 – пожароопасность; Г – умеренная пожароопасность; Д – пониженная пожароопасность [37].

Используемое помещение относится к категории Г по пожарной и взрывопожарной опасности так, как в данном помещении используются (обращаются) негорючие вещества и горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива. Также в данном помещении расположены баллоны с инертными газами (азот, аргон), которые не относятся к категории А, Б или В [37].

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 м<sup>3</sup>.

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. В лаборатории расположены огнетушители порошковые ОП-4(з)- АВСЕ-02 (предназначен для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000 вольт). Пострадавшим при пожаре необходимо обеспечить скорую медицинскую помощь.

### **Выводы по разделу «Социальная ответственность»**

В главе социальной ответственности были рассмотрены условия работы с вакуумной установкой при напылении покрытий на основе хрома и нитрида хрома, 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 проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. При мощности источника питания  $Q > 800$  Вт сублимация вносит существенный вклад в увеличение скорости роста хромовых покрытий. Так, при  $Q = 1600$  Вт скорость осаждения за счёт сублимации увеличивается почти в 5 раз по сравнению с распылением.

2. Основным потоком энергии, поступающим на подложку при осаждении покрытий на основе Cr и CrN в условиях работы магнетрона с горячей мишенью, является тепловое излучение со стороны мишени.

3. При получении покрытий на основе нитрида хрома зависимость скорости осаждения от мощности источника питания приобретает нелинейный характер при  $Q > 800$  Вт, что свидетельствует о значительной роли сублимации в этих процессах.

4. За счет распыления растущего покрытия при подаче смещения на подложку  $U_{bias} = -50$  В толщина Cr-N покрытия может уменьшиться до 50%; с увеличением мощности МРС доля распылённой плёнки уменьшается.

5. Существует проблема с формированием однородных по стехиометрическому составу CrN покрытий при использовании магнетронов с сублимирующей мишенью, так как поток атомов хрома на подложку является весьма интенсивным.

Проведённые исследования позволяют считать доказанным следующее положение. В диапазоне плотности мощности МРС от 18 до 33 Вт/см<sup>2</sup> сублимация на поверхности сильно разогретой хромовой мишени приводит к существенному увеличению скорости осаждения покрытий из Cr и CrN<sub>x</sub>. При этом наиболее вероятно, что покрытия на основе Cr-N, будут иметь неоднородный по толщине элементный состав.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы, Кн.1 Введение в физику и технику магнетронного распыления. – К.: Аверс, 2008 г. – 244 с.
2. J. Musil, P. Baroch, J. Vlček, K. H. Nam, J. G. Han, Reactive magnetron sputtering of thin films: present status and trends, Thin Solid Films 475 №1-2 SPEC. ISS (2005) 208-218
3. Гугля А. Г., Неклюдов И. М. Покрытия на базе нитрида хрома. Опыт создания и исследования // Х.: ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины. – 2005
4. Bleykher, G. A., Borduleva, A. O., Krivobokov, V. P., Sidelev, D. V., Evaporation factor in productivity increase of hot target magnetron sputtering systems. Vacuum, 132, (2016). 62-69.
5. Дунюшкина Л.А. введение в методы получения пленочных электролитов для твердооксидных топливных элементов: монография. – Е: УРО РАН, 2015 г. – 126 с.
6. Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок, учебно-методическое пособие для студентов физического факультета. – К.: Издание 2-е, исправленное и дополненное, 2010.- 87 с.
7. Magnetron Sputtering Solutions. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.dentonvacuum.com/products-technologies/magnetron-sputtering/>
8. F. Shi, Introductory Chapter: Basic Theory of Magnetron Sputtering, Magnetron Sputtering [Working Title], 2018
9. Магнетронная распылительная система для размещения внутри вакуумной камеры: руководство пользователя. – Т.: ООО прикладная электроника, 2013 г.
10. M. Ohring, Materials Science of Thin Films: Depositions & Structure 2nd Edition, San Diego, USA: Academic Press, (2002).

11. Сейдман Л. А., Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением/ Л. А. Сейдман, Е. В. Берлин, мир материалов и технологий, М.: техносфера, 2014 – 26 с.
12. S. Swann, Magnetron sputtering, Phys Technol 19 (1988) 67-75.
13. J. Musil, V. Satava, P. Baroch, High-rate reactive deposition of transparent SiO<sub>2</sub> films containing low amount of Zr from molten magnetron target // Thin Solid Films 519(2) (2010) 775-777
14. J.M. Schneider, W.D. Sproul, R.W.J. Chia, M.S. Wong, A. Matthews, Surf. Coat. Technol. 96 (1997) 262
15. Z.G. Li, S. Miyake, M. Makino, Y.X. Wu, Metallic sputtering growth of crystalline titanium oxide films on unheated glass substrate using inductively coupled plasma assisted direct current magnetron sputtering // Thin Solid Films 517 (2008) 699.
16. Достанко А.П., Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые/ А.П.Достанко, В.Г.Залесский, А.М.Русецкий, В.Л.Ланин, И.Б.Петухов, Д.А.Голосов, Е.В.Телеш, С.В.Бордусов, С.М.Завадский, Минск: Бестпринт, 2009 – 202 с.
17. Духопельников Д.В., Магнетронные распылительные системы. Часть 1: Устройство принципы работы применение/ Д.В. Духопельников, М.:Издательство МГТУ им. Баумана, 2014 – 55 с.
18. P. Sigmund, Sputtering by ion bombardment theoretical concepts, in: R. Behrisch (Ed.), Sputtering by Particle Bombardment I: Physical Sputtering of Single-element Solids, Topics in Applied Physics, 47, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, (1981), 971.
19. Программа SRIM [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.srim.org/>
20. Программа SIMTRA [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://draftugentbe.webhosting.be>

21. L.I. Maissel, R. Glang (Eds.), Handbook of Thin Film Technology, V. 1, McGraw-Hill Book Company, 1970 (Eds)
22. Г.А. Блейхер, А.В. Юрьева, В.П. Кривобоков, Д.В. Сиделёв. Высокоскоростное осаждение металлических покрытий с помощью плазмы магнетронного разряда // В кн. Научноёмкие технологии в проектах РФФ. Сибирь / под. ред. С.Г. Псахье, Ю.П. Шаркеева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2017. – 428 с. (с. 36-79)
23. R. Glang, Vacuum evaporation, in: L.I. Maissel, R. Glang (Eds.), Handbook of Thin Film Technology, 1, McGraw-Hill Book Company, 1970.
24. A. Grudin, D.V. Sidelev, G.A. Bleykher, Yu.N. Yuriev, V.P. Krivobokov, E.V. Berlin, V.Yu. Grigoriev, A. Obrosof, S. Weiß. Hot target magnetron sputtering enhanced by RF-ICP source for CrNx coatings deposition // Vacuum, 2021 (in press)
25. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Зиновьев В.Е., Справ. Изд., М.: Металлургия, 1989, 364 с.
26. A. Anders, Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering, Surf. Coat. Technol. 205 (2011) S1–S9.
27. D. Depla, Magnetrons, Reactive Gases and Sputtering, Ghent University, Belgium, 2015.
28. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года).
29. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.
30. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений;
31. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы.

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

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

34. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности

35. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»

36. ГОСТ 12.1.007-99 «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».

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

## Приложение А

(Справочное)

### Chromium nitride deposition methods

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ91	Гладышева А. Н.		

Руководитель ВКР:

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

Консультант – лингвист отделения иностранных языков школы ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения иностраных языков ШБИП	Зеремская Юлия Александровна	к. филол. н.		

## Contents

1 Chromium nitride deposition methods.....	138
1.1 Vacuum-arc evaporation .....	138
1.2 Ion sputtering .....	139
1.3 Magnetron sputtering in an argon and nitrogen atmosphere .....	140
1.4 Features of metal film deposition during magnetron operation with evaporation or sublimation of the target substance .....	145
References.....	148

## **1 Chromium nitride deposition methods**

The production and development of technologies for obtaining protective, strengthening and corrosion-resistant coatings based on metal compounds of various elements (Cr, Ti etc.) with nitrogen, carbon, etc. has been of great interest for a long time. Currently, existing methods for obtaining such compounds are being developed and improved in order to improve the properties of the resulting coatings. However, the problem in this case is not only to get good quality films, but also to improve the performance of the process itself. In this literature review, we will review and analyze a number of traditional methods for films deposition based on CrN: vacuum-arc evaporation, ion sputtering, magnetron sputtering in the atmosphere of argon and nitrogen. These methods belong to the group PVD- technologies (physical vapor deposition), which are the treatment of the metal surface in a vacuum environment by exposing it to molecules of other metals.

### **1.1 Vacuum-arc evaporation**

Vacuum arc evaporation is a widely used industrial-scale process for applying high-quality thin-film coatings. This process is based on the physics of a low-voltage, high-current cathode arc, which produces a dense, highly ionized plasma. This method uses an electric arc that vaporizes material from the target surface.

The arc current is concentrated on a small area of the cathode surface, in so-called «cathode spots», which in turn creates an extremely high current density ( $\sim 10^{12}$  A/m<sup>2</sup>).

This high current density is associated with an extremely high power density ( $\sim 10^{13}$  W/m<sup>2</sup>), which leads to a localized phase transformation of the solid target (cathode material) into an almost completely ionized plasma. The plasma expands rapidly in vacuum towards the substrate.

The production of chromium nitride-based coatings using vacuum-arc evaporation technology is realized in two nitrogen pressure ranges below 1 Pa and 2.0-10.0 Pa. The authors [3] suggest that in the first case, the dissociation of

molecular nitrogen during further chemisorption occurs on the substrate surface, and in the second case, in the plasma volume.

One of their main disadvantages of an electric arc coating is the presence of droplets in the gas phase. According to the authors of the textbook [4], the most likely cause of a droplet formation is the presence of dissolved gas in the cathode volume, as a result of which gas bubbles are formed during boiling, intensively emerging to the surface and leading to splashing of molten cathode macroparticles. When deposited on the substrate, droplets disrupt the uniformity of the film and worsen its properties. To eliminate droplets in the gas phase, a gas flow separation in electric or magnetic fields is used, moreover, degassed cathodes are used and evaporation modes are optimized.

**Advantages:** The advantages of electric arc evaporation are the ability to control the speed of film deposition within a wide range, the ability to apply coatings that are complex in chemical composition (oxides, etc.), good adhesion and continuity of the resulting films.

**Application:** Electric arc deposition is widely used for applying wear-resistant and protective coatings to the surface of cutting tools, which significantly extend its service life. This technology can be used to synthesize a wide range of super-hard and nanocomposite coatings, including TiN, TiAlN, CrN, ZrN, AlCrTiN, and TiAlSiN [4].

## **1.2 Ion sputtering**

This method is based on the phenomenon of the cathode destruction when it is bombarded with ionized atoms of a discharged gas. Escaping atoms from the cathode surface during sputtering are distributed in the surrounding space and condense on the substrate. When a constant voltage is applied between the cathode and the anode (~1 ... 5 kV), which is located in the gas at a small pressure (~10 Pa), a glow discharge occurs. The resulting ions bombard the cathode and cause the sputtering of target atoms (or even larger cluster particles).

Methods for producing films by ion sputtering of the target material have a number of **advantages** over other methods.

a) Since sputtering is a low-temperature process, it is possible to use refractory materials as the initial target and synthesize compounds that are practically impossible to obtain by thermal evaporation.

b) The applied films have high adhesion to the substrate.

c) The constancy of the chemical composition of the sprayed material ensures the uniformity of the film thickness.

d) The surface areas of the resulting films are larger than during thermal evaporation, since the material is sprayed onto the substrate not from a point source.

e) High utilization rate of the sprayed material [5]

**The disadvantage** of this method is the low rate of obtaining coatings.

### **1.3 Magnetron sputtering in an argon and nitrogen atmosphere**

Magnetron sputtering is a vacuum coating technology that allows many types of materials, including metals and ceramics, to be deposited on the surface of a substrate using a specially formed magnetic field applied to the target. Positively charged ions from the plasma are accelerated and directed towards the target, knocking out or spraying atoms from its surface, which are then deposited on the substrate.

Magnetron sputtering uses a closed magnetic field to capture electrons, increasing the efficiency of the ionization process and creating a plasma at lower pressures, reducing energy losses in the sputtered atom as a result of gas collisions [6]. Magnetron sputtering is the dominant technology for growing thin films, because it is possible to obtain a large number of thin films with relatively high purity and low cost [7]. To implement this technology, special devices are used - magnetron sputtering systems (MSS).

The principle of MSS operation is shown in the Figure 1. The main elements of the device are a target cathode, an anode, and a magnetic system.

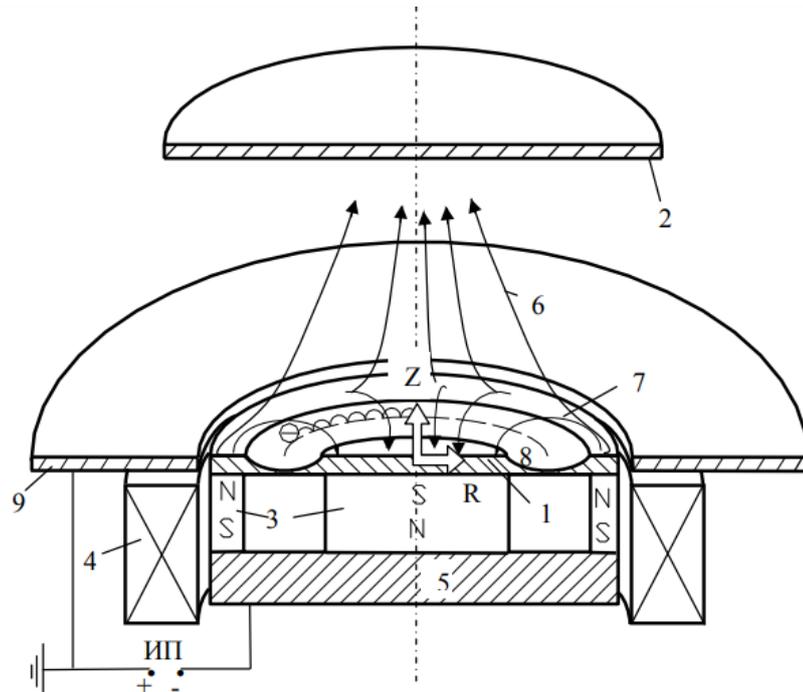


Figure 1 – Diagram of a magnetron sputtering system:

1 – sputtered cathode, 2 – substrate, 3 – permanent magnets, 4 – electromagnet, 5 – magnetic circuit, 6 – unbalanced magnetic field lines, 7 – balanced magnetic field lines, 8 – cathode sputtering zone, 9 – anode (mounting flange), 8 – magnetron power source [8]

A constant or pulsed voltage is applied between the target and the anode. In this case, an inhomogeneous electric field is generated and an anomalous glow discharge is excited. Perpendicular to the electric field, parallel to the cathode, a magnetic field is superimposed. The interaction between the magnetic field and the electric field causes the electrons to spiral near the target surface, thereby increasing the probability that the electrons will collide with argon atoms to generate ions. Thus, most of the electron energy before it reaches the anode is used for ionization and excitation, which significantly increases the efficiency of the ionization process and leads to an increase in the concentration of positive ions at the target surface. The generated ions collide with the target surface under the action of an electric field to sputter it.

In reactive magnetron deposition, thin films of compounds are deposited on substrates by sputtering from metallic (nonmetallic) targets in the presence of a chemically active gas, usually mixed with an inert working gas (invariably Ar) [9]. These gases react with the target material to form a chemical compound [10]. Therefore, such gases are called reactive.

The most common compounds produced by magnetron reactive sputtering are briefly listed below:

1. Oxides (oxygen) are  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .
2. Nitrides (nitrogen, ammonia) — $\text{TaN}$ ,  $\text{TiN}$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{CNX}$ .
3. Carbides (methane, acetylene, propane)— $\text{TiC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{SiC}$ .
4. Sulfides ( $\text{H}_2\text{S}$ ) - $\text{CdS}$ ,  $\text{CuS}$ ,  $\text{ZnS}$ .
5. Oxycarbides and oxynitrides of Ti, Ta, Al, and Si [9].

By controlling the jet gas flow rate, the stoichiometry of the growing film can be controlled [11].

In this paper, the method of reactive magnetron sputtering in a nitrogen atmosphere is used, so in the future we will only consider the formation of nitrides.

Sputtering of the target can occur in three modes: metallic (sputtering of metal atoms from the target surface), transition, and nitride. In the nitride mode, nitride is formed directly on the target (poisoning of the target), thus sputtering occurs from the surface of chemical compounds.

As shown by the authors [12], with an increase in the current power density on the target, the amount of reactive gas required for the formation of stoichiometric compounds also increases, and the formation of such compounds can be moved from the nitride mode (point C) to the transition mode (point OP) of sputtering, as shown in Figure 2. In the transient sputtering mode, nitrides can be deposited at a higher deposition rate. This has already been experimentally demonstrated, for instance, in the works [13,14].

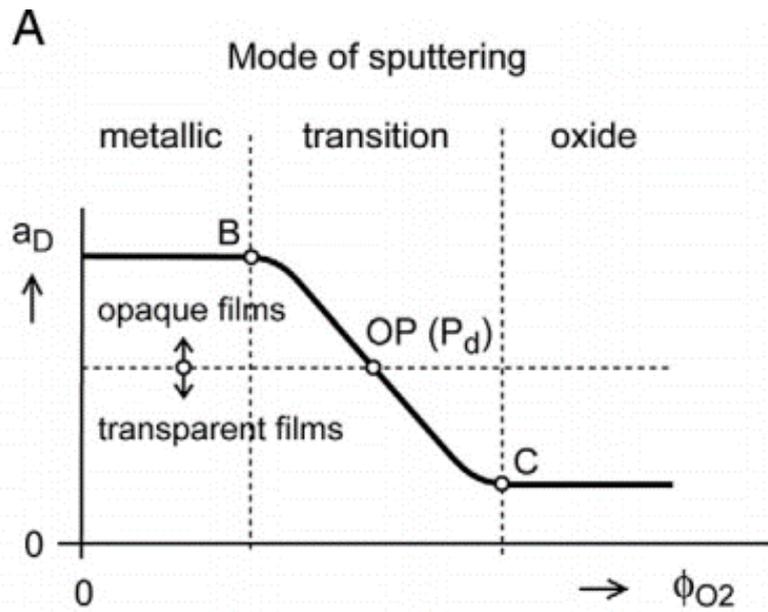


Figure 2 – Schematic representation of the modes of reactive magnetron sputtering of nitride films

In general, the formation of chemical bonds during reactive sputtering can be observed at three stages of the process (Figure 3):

*The first stage.* Since reactive processes use a mixture of inert and active gases, the target receives a mixed flow of ions and atoms. Chemically active ions, excited atoms in the process of bombardment of the target not only participate in its sputtering, but also react with the target atoms, forming compounds on the surface. In this case, atomization of both pure target material and its compounds is possible.

*The second stage.* Atoms sputtered from the target are transported to the substrate. At the same time, the process of their interaction with plasma particles and working gas atoms, including the formation of chemical bonds, is not excluded.

*The third stage.* The atoms condensed on the substrate surface have a high migration capacity due to their significant energy and actively interact with each other and with surface atoms, including reactive gas atoms adsorbed from the gas phase to form a chemical bond.

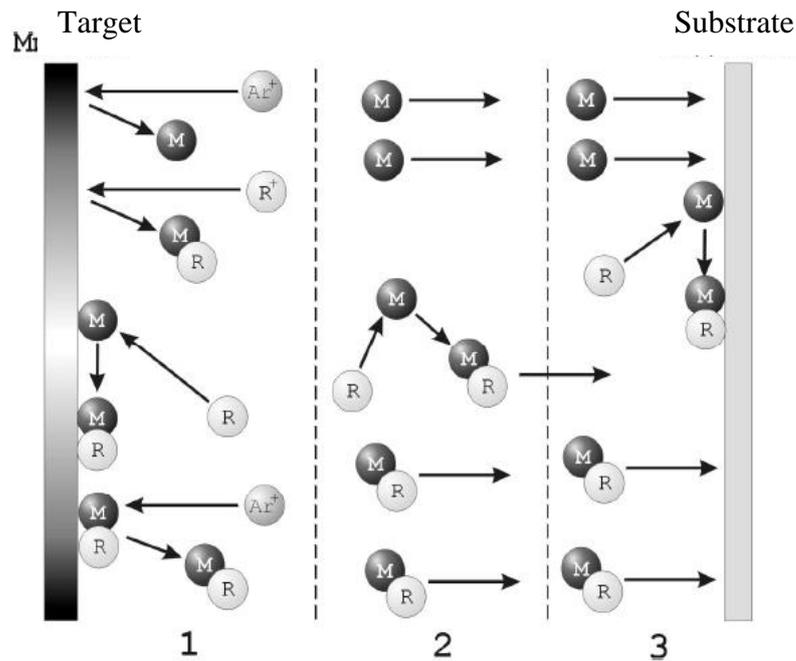


Figure 3 – Stages of the reactive sputtering process: 1 – the first stage, 2 – the second stage, 3 – the third stage ( $M$  is the atom of the target material,  $R$  and  $R^+$  are the atom and ion of the reactive gas, respectively, and  $Ar^+$  is the ion of the argon atom [15])

A chemical reaction on the surface of the target and magnetron anodes with the formation of a chemical compound creates problems with the stability of reactive sputtering. These problems are mainly two: the first one is a decrease in the sputtering rate of the target, and the second one is the appearance of electrical breakdowns on the surface of the target and the anode, if the resulting chemical compound is a dielectric [10].

The main applications of reactive deposition are hard coatings, wear-resistant coatings, energy coatings, and transparent conductive films. Hard materials such as TiN are used as wear-resistant coatings, such as tools and stamps, as well as decorative coatings such as watch cases, where the gold color and hardness create the perfect combination of properties. They are often reactively sprayed from titanium targets in an  $N_2$ -Ar atmosphere. The substrates are often shifted to increase the reactivity on the surface and obtain the correct film color [11].

**The advantages** of MSS are:

- 1) low thermal loads on the substrate that is important when applying coatings on polymer substrates;
- 2) the possibility of applying coatings of complex composition from alloys (for example, during thermal vacuum evaporation, the alloy components are separated);
- 3) possibility of applying coatings in a reactive gas environment (oxides, nitrides, carbides);
- 4) the ability to apply coatings with good reproducibility in thickness and composition on large substrates (this feature of MSS determines their main advantage over other systems when applying coatings on rolled and sheet materials);
- 5) the ability to use MSS in process lines with continuous coating due to the large stock of material in the sputtered cathode (sputtering time is 5-20 days) [16];

**The disadvantages** of MSS include:

- 1) relatively high energy intensity of the process (500 eV per atom sprayed versus 50 eV in vacuum-arc evaporation);
- 2) instability of reactive processes in the deposition of metal oxides, nitrides, and carbides, and, as a consequence, the need to use complex systems for monitoring and controlling the discharge [16]. This instability is associated with the aforementioned poisoning of the target.

#### **1.4 Features of metal film deposition during magnetron operation with evaporation or sublimation of the target substance**

As the power of the MSS power source increases, the current power density on the target increases, which in turn leads to an increase in the temperature on its surface. As the temperature increases, another erosion mechanism appears on the target surface, in addition to sputtering: sublimation. Sublimation is the evaporation of atoms from the surface of a solid. This effect is typical for materials with evaporation temperatures below the melting point, such as Ti, Mg, Zn, and Cr. Such

high surface temperatures can be achieved by using a special MSS design (described in section 2) with a "hot target".

The authors of the paper [17] conducted an experiment on the deposition of Cr-based coatings. The coatings were deposited in an Ar atmosphere at the pressure of 0.2 Pa. The operating pressure was 0.003 Pa. A Cr (99.95%) target in the form of a disk with a radius  $R = 4.5$  cm and a thickness  $h = 0.8$  cm was fixed to the magnetron body. Experiments were performed with a fully cooled («cold») and partially cooled («hot») target. The scheme of thermal insulation of the hot target used by the authors is shown in Figure 4 (d).

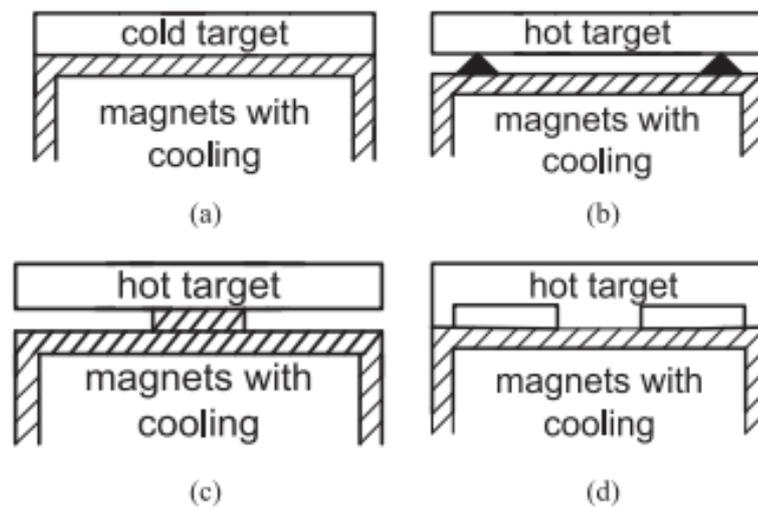


Figure 4 – Schemes of heat-conducting contact of the target with the cooled magnetron body: (a) full cooling, (b) full thermal insulation, (c) and (d) partial heat-conducting insulation

A non-linear increase in the deposition rate due to evaporation for a magnetron with a hot chromium target was confirmed by the experiments (Figure 5). This graph shows the calculated dependences of the deposition rate  $V_{\text{dep}}$  and the maximum temperature on the target surface as a function of the averaged power density. To calculate  $V_{\text{dep}}$ , we use the methodology from the reference [18].

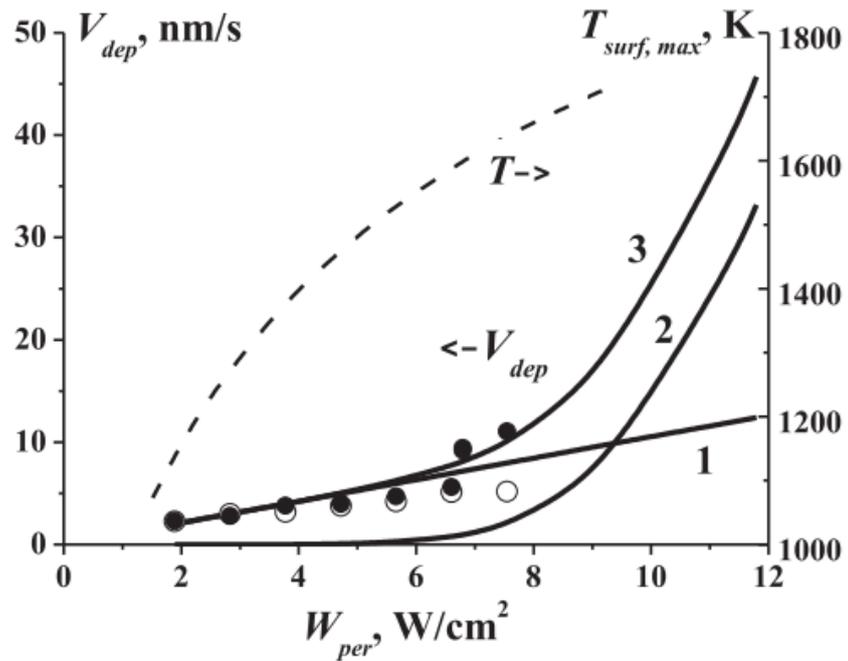


Figure 5 – Dependence of the coating deposition rate and the maximum target surface temperature ( $T_{surf,max}$ ) on the average magnetron power density ( $W_{per}$ ). Solid lines - calculation (1-due to sputtering, 2 - due to evaporation, 3 - total); points- experiment (cooled target – white dots, hot target- black dots). Dashed line - calculation of  $T_{surf,max}$

Calculations, as well as experimental data, indicate that at a low power of the MSS power source, sputtering of a heat-insulated target occurs. In this case, the deposition rate is proportional to the power density and does not exceed several nm per second. At  $W_{per} \approx 6.6 W/cm^2$ , the contribution made by evaporation becomes noticeable. At  $W_{per} \approx 9.3 W/cm^2$ , the deposition rates due to evaporation and sputtering become approximately the same. At higher power, the evaporative component in the deposited particle flow becomes predominant. Calculations show that due to evaporation (or sublimation), the deposition rate of a solid Cr target can be approximately 20 times higher. It should be noted that this situation occurs at temperatures below the melting point. In the case of a Ti target, the maximum predicted rate increase due to sublimation is about five.

## References

1. Kuzmichev A. I. Magnetron sputtering systems, Book 1 Introduction to the physics and technology of magnetron sputtering. - K.: Avers, 2008 – 244 p.
2. J. Musil, P. Baroch, J. Vlček, K. H. Nam, J. G. Han, Reactive magnetron sputtering of thin films: present status and trends, Thin Solid Films 475 №1-2 SPEC. ISS (2005) 208-218
3. Guglya A. G., Neklyudov I. M. Coatings based on chromium nitride. Experience of creation and research / / Kh.: NSC "Kharkiv Institute of Physics and Technology" of the National Academy of Sciences of Ukraine. – 2005
4. Dunyushkina L. A. Introduction to methods for obtaining film electrolytes for solid oxide fuel cells: monograph, 2015-126 p.
5. Petukhov V. Yu., Gumarov G. G. Ion-beam methods for obtaining thin films, educational and methodological manual for students of the Faculty of Physics. - K.: Edition 2-e, corrected and supplemented, 2010. - 87 p.
6. Magnetron Sputtering Solutions. [Electronic resource] – URL: <https://www.dentonvacuum.com/products-technologies/magnetron-sputtering/> [Accessed on 25.05.2021]
7. F. Shi, Introductory Chapter: Basic Theory of Magnetron Sputtering, Magnetron Sputtering [Working Title], 2018
8. Magnetron spray system for placement inside the vacuum chamber: user's guide. - T.: Applied electronics LLC, 2013.
9. M. Ohring, Materials Science of Thin Films: Depositions & Structure 2nd Edition, San Diego, USA: Academic Press, (2002).
10. 10. Seidman L. A., Obtaining thin films by reactive magnetron sputtering/ L. A. Seidman, E. V. Berlin, mir materialov i tekhnologii, Moscow: technosphere, 2014-26 p.
11. S. Swann, Magnetron sputtering, Phys Technol 19 (1988) 67-75.

12. J. Musil, V. Satava, P. Baroch, High-rate reactive deposition of transparent SiO<sub>2</sub> films containing low amount of Zr from molten magnetron target // *Thin Solid Films* 519(2) (2010) 775-777
13. J.M. Schneider, W.D. Sproul, R.W.J. Chia, M.S. Wong, A. Matthews, *Surf. Coat. Technol.* 96 (1997) 262
14. Z.G. Li, S. Miyake, M. Makino, Y.X. Wu, Metallic sputtering growth of crystalline titanium oxide films on unheated glass substrate using inductively coupled plasma assisted direct current magnetron sputtering // *Thin Solid Films* 517 (2008) 699.
15. Dostanko A. P., Technological processes and systems in microelectronics: plasma, electron-ion-beam, ultrasonic/ A. P. Dostanko, V. G. Zalessky, A.M. Rusetsky, V. L. Lanin, I. B. Petukhov, D. A. Golosov, E. V. Telesh, S. V. Bordusov, S. M. Zavadsky, Minsk: Bestprint, 2009-202 p.
16. Dukhopelnikov D. V., Magnetron sputtering systems. Part 1: Device principles of operation application / D. V. Dvukhopelnikov, Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2014 – 55 p.
17. Bleykher, G. A., Borduleva, A. O., Krivobokov, V. P., Sidelev, D. V., Evaporation factor in productivity increase of hot target magnetron sputtering systems. *Vacuum*, 132, (2016). 62-69.
18. P. Sigmund, Sputtering by ion bombardment theoretical concepts, in: R. Behrisch (Ed.), *Sputtering by Particle Bombardment I: Physical Sputtering of Single-element Solids*, Topics in Applied Physics, 47, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, (1981), 971.
19. R. Glang, Vacuum evaporation, in: L.I. Maissel, R. Glang (Eds.), *Handbook of Thin Film Technology*, 1, McGraw-Hill Book Company, 1970.