

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий
Отделение школы (НОЦ) – Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга
Направление подготовки – 16.04.01 Техническая физика
Специализация – Пучковые и плазменные технологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
«Исследование условий осаждения CrN _x покрытий при магнетронном распылении горячей хромовой мишени в атмосфере аргона и азота»
УДК 621.793.182.02:669.26.058

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ11	Дербин Алексей Юрьевич		

Руководитель ВКР

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

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к. т. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД	Сечин Андрей Александрович	к. т. н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Б.П. Вейнберга	Сиделёв Дмитрий Владимирович	к. т. н.		

Томск – 2023 г.

Компетенции выпускников ООП «Пучковые и плазменные технологии» по
направлению 16.04.01 Техническая физика (2021 года приёма)

Код компетенции	Наименование компетенции
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, выработывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
ОПК(У)-1	Способен к профессиональной эксплуатации современного научного и технологического оборудования и приборов в своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Способен использовать углубленные теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, в том числе технической физики
ОПК(У)-3	Способен работать в научном коллективе, готов генерировать, оценивать и использовать новые идеи, способен находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач
ОПК(У)-4	Способен вскрывать физическую, естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе осуществления профессиональной деятельности, проводить их качественный и количественный анализ
ОПК(У)-5	Способен осуществлять научный поиск и разработку новых перспективных подходов и методов к решению профессиональных задач, участвовать в научной и инновационной деятельности
ОПК(У)-6	Способен осваивать и применять современные физико-математические методы и методы искусственного интеллекта для решения профессиональных задач, составлять практические рекомендации по использованию полученных результатов
ОПК(У)-7	Способен представлять результаты исследования в формах отчетов, рефератов, публикаций и презентаций
ОПК(У)-8	Способен проводить патентные исследования, определять формы и методы правовой охраны и защиты прав на результаты интеллектуальной деятельности.
ПК(У)-1	Способен самостоятельно проводить научные исследования в областях, связанных с применением пучковых и плазменных технологий, с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств
ПК(У)-2	Способен к организации и выполнению научно-исследовательских разработок в области создания функциональных покрытий и технологий их изготовления методами осаждения в вакууме
ПК(У)-3	Способен к организации и выполнению научно-исследовательских разработок в области создания микро- и наноразмерных систем с использованием плазменных и пучковых технологий
ПК(У)-4	Готов принимать непосредственное участие в учебной и учебно-методической работе по направлению «Техническая физика», участвовать в разработке программ учебных дисциплин и курсов
ПК(У)-5	Способен проводить учебные занятия, лабораторные работы, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся

Код компетенции	Наименование компетенции
ПК(У)-6	Способен применять и разрабатывать новые образовательные технологии
ПК(У)-7	Способен разрабатывать, оптимизировать и реализовывать современные наукоёмкие технологии в областях технической физики, связанных с применением пучковых и плазменных технологий
ПК(У)-8	Способен разрабатывать, проводить наладку и испытания, а также эксплуатировать наукоёмкое технологическое и аналитическое оборудование для решения технологических задач в областях, связанных с применением пучковых и плазменных технологий
ПК(У)-9	Готов решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи, связанные с применением пучковых и плазменных технологий, с помощью стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств



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

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ 06.02.2023 г. Сиделёв Д.В.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
ОДМ11	Дербин Алексей Юрьевич

Тема работы:

«Исследование условий осаждения CrN_x покрытий при магнетронном распылении горячей хромовой мишени в атмосфере аргона и азота»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	Приказ №34-110/с от 03.02.2023 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2023 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	
<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"> 1. Экспериментальная вакуумно-плазменная установка, разработанная в НОЦ Б.П. Вейнберга для магнетронного осаждения. 2. Диагностическое оборудование: <ul style="list-style-type: none"> – определение фазового состава: рентгеновский дифрактометр XRD-7000S; – измерение твердости: тестер наноиндентирования NHT² от CSM Instruments SA; – толщина покрытий: СЭМ Quanta 200 3D. 3. Программные коды, разработанные в НОЦ Б.П. Вейнберга: <ul style="list-style-type: none"> – расчет плотности потока частиц и скорости осаждения за счет сублимации: «Hot Target»;

	<ul style="list-style-type: none"> – расчет плотности потока частиц и скорости осаждения за счет распыления: «HIPIMS»; – расчет плотности потока частиц и скорости осаждения, усредненные по обороту карусели: «Planet Rotation».
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><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"> 1. Получить данные о потоках частиц, поступающих на растущее покрытие, в зависимости от мощности магнетрона и положения подложки с растущим покрытием относительно горячей хромовой мишени. Сравнить расчёты с данными экспериментов о скорости осаждения в режиме планетарного вращения. 2. Выявить закономерности поступления частиц на подложку для прогнозирования элементного состава образующейся пленки. 3. Построить соотношения «ионный ток/осаждаемый атом Cr в зависимости от рабочих параметров для разных режимов осаждения; выявить наибольшие значения этих характеристик и установить связь с характеристиками механических свойств осаждаемых CrN_x покрытий. 4. Выполнить эксперименты по созданию потоков ускоренных ионов на подложку при использовании различных приёмов в организации осаждения; произвести анализ ионного тока в зависимости от рабочих параметров осаждения, выявить режимы осаждения, при которых ионный ток является наибольшим.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Титульный лист. 2. Актуальность. 3. Цели и задачи. 4. Конструкция магнетрона с теплоизолированной хромовой мишенью. 5. Методы исследования и используемое диагностическое оборудование. 6. Определение плотностей потоков частиц, формирующих покрытие, в зависимости от мощности магнетрона. 7. Сравнение расчётов с данными экспериментов о скорости осаждения в режиме планетарного вращения. 8. Определение плотностей потоков частиц, формирующих покрытие, в зависимости от положения подложки. 9. Влияние положения подложки на формирование

	<p>элементного состава CrN_x покрытий.</p> <p>10. Прогнозирование элементного состава образующейся пленки и анализ твердости сформированных покрытий.</p> <p>11. Связь соотношения «ионный ток/осаждаемый атом Cr» с механическими характеристиками осаждаемых покрытий.</p> <p>12. Описание экспериментов по созданию потоков ускоренных ионов на подложку в процессе осаждения CrN_x покрытий.</p> <p>13. Влияние плотности мощности, поступающей на мишень магнетрона.</p> <p>14. Влияние величины потока азота.</p> <p>15. Влияние наложения факторов.</p> <p>16. Защищаемое положение.</p> <p>17. Заключение.</p>
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кашук И.В., к.т.н, доцент отделения социально-гуманитарных наук
Социальная ответственность	Сечин А.А., к.т.н., доцент отделения общетехнических дисциплин
Раздел на англ	Матвеевко И.А., д.фил.наук, профессор отделения иностранных языков

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

Введение, обзор литературы, результаты исследования

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	06.02.2023 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н.		06.02.23 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ11	Дербин А.Ю.		06.02.23 г

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

Обучающемуся:

Группа ОДМ11	ФИО Дербин Алексей Юрьевич
------------------------	--------------------------------------

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

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	<i>Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами. Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.</i>
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование</i>
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30 %</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)	<i>Анализ потенциальных потребителей результатов исследования, конкурентных технических решений, оценка готовности проекта к коммерциализации, проведение SWOT-анализа.</i>
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования</i>
3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)	<i>Расчет бюджетной стоимости НИ</i>
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)	<i>Расчет показателей сравнительной эффективности проекта, интегрального показателя ресурсоэффективности.</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. 1.Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений
2. 2.Матрица SWOT
3. 3.Календарный план
4. 4.Бюджет НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	13.03.2023 г.
---	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н. доцент		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ11	Дербин Алексей Юрьевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа ОДМ11		ФИО Дербин Алексей Юрьевич	
Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Тема ВКР:

«Исследование условий осаждения CrN_x покрытий при магнетронном распылении горячей хромовой мишени в атмосфере аргона и азота»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> покрытия CrN_x, нанесенные на подложку при различных параметрах осаждения.</p> <p><i>Область применения:</i> машиностроение, автомобилестроение.</p> <p><i>Рабочая зона:</i> лаборатория.</p> <p><i>Размеры помещения:</i> 138 м².</p> <p><i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> МРС, ПЭВМ, спиральный насос, турбомолекулярный насос, криогенный насос, вакуумная камера.</p> <p><i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> напыление покрытий магнетронным распылением.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем. 1. ГОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности 2. ГОСТ 12.4.154-85 “ССБТ. Устройства экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты” 4. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 "Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)"
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, могущих вызвать ожоги тканей организма человека. 2. Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий. <p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении

	<p>работающего.</p> <p>2. Повышенный уровень шума.</p> <p>3. Повышенный уровень электромагнитных излучений.</p> <p>4. Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения.</p> <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: беруши, наушники.</p> <p>Расчет: расчет системы искусственного освещения.</p>
3. Экологическая безопасность при эксплуатации	Воздействие на литосферу: наличие промышленных отходов (бумага, черновики, вторцвет- и чермет, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника).
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации	Возможные ЧС: 1) природная – сильные морозы зимой (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале); 2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
13.03.2023 г.	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ООД	Сечин Андрей Александрович	к.т.н		13.03.2023 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ11	Дербин Алексей Юрьевич		13.03.2023 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 127 с., 44 рис., 19 табл., 28 источников, 1 приложение на английском языке.

Ключевые слова: хромовые покрытия; магнетронное напыление; горячая хромовая мишень; сублимирующая мишень; высокоскоростное осаждение.

Объект исследования – покрытия на основе нитрида хрома.

Цель работы – выявление условий осаждения защитных покрытий на основе нитрида хрома, которые способствуют обеспечению не только высоких скоростей роста, но и продвинутых характеристик механических свойств.

В процессе исследования были даны рекомендации рабочих параметров метода высокоскоростного осаждения, при которых помимо увеличенной скорости осаждения покрытий достигается приемлемая твердость получаемых покрытий на основе нитрида хрома.

Область применения: защитное покрытие нитрида хрома широко используется в промышленности для улучшения жизненного цикла различных деталей и инструментов.

Оглавление

Введение.....	15
Глава 1 Аналитический обзор и постановка задачи	18
1.1 Вакуумно-дуговое испарение.....	18
1.2 Ионное распыление	19
1.3 Магнетронное распыление в атмосфере аргона и азота.....	20
1.4 Особенности осаждения металлических плёнок при работе магнетрона с сублимацией вещества мишени	25
1.5 Существующие способы управления осаждаемыми потоками частиц и энергии для обеспечения формирования защитных и упрочняющих покрытий при реализации вакуумно-плазменных методов	27
Заключение к разделу 1	28
Глава 2 Описание экспериментального, диагностического оборудования и расчётных методов	30
2.1 Описание экспериментального и диагностического оборудования.....	30
2.1.1 Оснастка вакуумно-плазменной установки и конструкция магнетрона с теплоизолированной хромовой мишенью	30
2.1.2 Диагностическое оборудование	33
2.2 Описание расчётных методик и использованных программных кодов.....	36
2.2.1 Модель эрозии мишени с сублимирующей хромовой мишенью и методика Ламберта-Кнудсена	37
2.2.2 Описание комплекса программ для расчёта скоростей эрозии и осаждения при работе магнетрона с теплоизолированной мишенью.....	38
Глава 3 Результаты исследований и их анализ	42

3.1	Определение скоростей осаждения Cr покрытий, плотностей потоков частиц, формирующих покрытие, в зависимости от мощности магнетрона...	42
	Заключение к разделу 3.1	49
3.2	Влияние положения подложки на величину плотности потока осаждаемых частиц и формирование элементного состава CrN _x покрытий	49
3.2.1	Эксперимент по измерению скорости роста хромовых покрытий	49
3.2.2	Анализ кинетики поступления потоков частиц разного вида на подложку при формировании покрытия на основе нитрида хрома	51
3.2.3	Определение толщины полученных покрытий	53
3.2.4	Анализ фазового состава покрытий	54
3.2.5	Анализ поперечного сечения покрытий	55
3.2.6	Энергодисперсионный анализ покрытий	56
3.2.7	Анализ твердости сформированных покрытий	56
	Заключение к разделу 3.2	59
3.3	Описание связи соотношений «ионный ток/осаждаемый атом Cr» с механическими характеристиками осаждаемых CrN _x покрытий	60
3.3.1	Корреляция соотношения «ионный ток/осаждаемый атом Cr» и напуска азота	61
	Заключение к разделу 3.3	62
3.4	Влияние различных режимов осаждения и положения подложки в пространстве вакуумной камеры на величину ионного тока	63
3.4.1	Описание экспериментов по созданию потоков ускоренных ионов на подложку в процессе осаждения CrN _x покрытий	63
3.4.2	Результаты исследований и их анализ	65
	Заключение к разделу 3.4	73
4	Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность ..	75

4.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	75
4.1.1	Анализ конкурентных технических решений	76
4.1.2	SWOT-анализ	77
4.2	Планирование научно-исследовательских работ.....	78
4.2.1	Структура работ в рамках научного исследования.....	78
4.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	79
4.3	Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	82
4.3.1	Расчет материальных затрат научно-технического исследования	82
4.3.2	Расчет амортизации специального оборудования	83
4.3.3	Основная заработная плата исполнителей темы.....	84
4.3.4	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	86
4.3.5	Накладные расходы	87
4.3.6	Бюджет НИР	87
4.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	88
	Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность».....	91
Глава 5	Социальная ответственность	92
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	92
5.1.1	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	92
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	93

5.1.3 Перечень нормативных документов	95
5.2 Производственная безопасность	96
5.2.1 Отклонение показателей микроклимата в помещении	96
5.2.2 Превышение уровней шума	97
5.2.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений	98
5.2.4 Освещенность	99
5.2.5 Пожарная безопасность.....	103
5.2.6 Электробезопасность.....	106
5.3 Экологическая безопасность	109
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	111
5.5 Выводы по разделу «Социальная ответственность»	112
Заключение	113
Список литературы	114
Приложение А	117

Введение

Длительное время для получения покрытий использовался метод термического испарения в вакууме. Этот метод долгое время являлся самым распространенным методом получения пленок на основе нитрида хрома. К плюсам этого метода относят несложную реализацию и достаточно высокие скорости роста пленки на подложке. Но данный метод не может обеспечить достаточную воспроизводимость свойств пленок, не позволяет использовать тугоплавкие материалы. Также не исключена вероятность возникновения дефектов на покрытии, вызванная возможностью вылета крупных частиц при испарении.

Из-за этих недостатков, методы осаждения, основанные на распылении специальных мишеней, стали очень привлекательными. Здесь можно выделить катодное распыление, при котором тонкие покрытия можно получить бомбардировкой ионами осаждаемого материала. К достоинствам этого метода можно отнести высокую адгезию пленок, однородность покрытий и т.д. Основные минусы: низкая скорость осаждения, высокий нагрев подложки из-за ее бомбардировки высокоэнергетическими вторичными электронами.

Магнетронные распылительные системы (МРС) помогают частично преодолеть эти ограничения. Магнитное поле создает «ловушку» для электронов, благодаря которой скорость распыления мишени увеличивается в 500-1000 раз [1].

Примерно с 1980 года активно изучается реактивное магнетронное напыление тонких пленок, поскольку распыление хромовой мишени в атмосфере инертных газов с добавлением в атмосферу различных газов позволяет напылять сложные пленки, которые активно используются в промышленности, такие, как нитриды, карбиды и т.д. [2]. Также данный метод позволяет получить плотные покрытия с хорошей адгезией и высокой твердостью.

Покрyтия на основе нитрида хрома широко используются в промышленности благодаря их высокой прочности, стойкости к коррозии и износу.

Традиционный способ получения покрyтий на основе нитрида хрома – реактивное магнетронное осаждение, основным механизмом формирования потока осаждаемых частиц в котором является распыление на поверхности мишени в присутствии азота. Производительность осаждения покрyтия данным методом составляет меньше 1 нм/с [3]. Такая скорость напыления не подходит для реализации технологий в промышленном масштабе.

Установлено, что при организации магнетронного распыления хромовой мишени с ограниченным теплоотводом, скорости осаждения хромовых покрyтий могут вырасти в 10 и более раз [4]. Отсюда возникло предположение, что можно добиться значительного увеличения производительности осаждения покрyтий на основе нитрида хрома, если магнетронное распыление сублимирующей хромовой мишени соединить с напуском азота в рабочую камеру. Для развития этой идеи требуется детальное изучение процессов в системе «мишень - подложка» при работе магнетронной распылительной системы с теплоизолированной хромовой мишенью.

В связи с этим **целью** настоящего исследования является выявление условий осаждения защитных покрyтий на основе нитрида хрома, которые способствуют обеспечению не только высоких скоростей роста, но и продвинутых характеристик механических свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Получить данные о потоках частиц, поступающих на растущее покрyтие, в зависимости от мощности магнетрона и положения подложки с растущим покрyтием относительно мишени (на примере DOMS (Deep Oscillation Magnetron Sputtering [5]) с магнетроном, содержащим горячую хромовую мишень). Сравнить расчёты с данными экспериментов о скорости осаждения в режиме планетарного вращения.

2. Выполнить эксперименты по созданию потоков ускоренных ионов на подложку при использовании различных приёмов в организации осаждения; произвести анализ ионного тока в зависимости от рабочих параметров осаждения, выявить режимы осаждения, при которых ионный ток является наибольшим (рассмотреть DOMS и среднечастотный источник питания, разный напуск газов, влияние ВЧ-источника плазмы).

3. Построить соотношения «ионный ток/осаждаемый атом Cr» в зависимости от рабочих параметров для разных схем режимов осаждения; выявить наибольшие значения этих характеристик и установить связь с характеристиками механических свойств осаждаемых CrN_x покрытий; проанализировать влияние пространственного фактора.

Объект исследования – покрытия на основе нитрида хрома; а **предмет исследования** – твердость полученных покрытий.

Научная новизна работы.

Выявлены совокупность рабочих параметров и критерий для оценки условий осаждения, при которых происходит высокоскоростное осаждение CrN_x покрытия с приемлемой твёрдостью.

Практическая значимость работы.

Определены рабочие параметры магнетронного осаждения защитных покрытий на основе нитрида хрома с хорошими функциональными характеристиками, при которых достигается высокая скорость осаждения.

Защищаемое положение.

При магнетронном распылении горячей хромовой мишени в атмосфере аргона и азота можно обеспечить высокоскоростное осаждение достаточно твердых покрытий на основе нитрида хрома, если обеспечить ионную бомбардировку растущего покрытия с $k_{ion} > 0,2$, где k_{ion} – количество ускоренных ионов, приходящееся на один осаждаемый атом хрома.

Глава 1 Аналитический обзор и постановка задачи

На данный момент защитные, упрочняющие, коррозионностойкие покрытия на основе соединений металлов различных элементов и развитие технологий по их получению представляет большой интерес. Несмотря на то, что существующие методы развиваются и совершенствуются для достижения лучших свойств получаемых покрытий, производительность самого процесса не увеличивается.

В настоящей главе рассмотрены способы получения пленок на основе нитрида хрома, особенности при работе магнетрона с сублимацией вещества мишени; также затронуты способы управления эрозионным потоком. Методы обработки поверхности твердого тела в вакууме осаждением на неё частиц, относят к группе PVD-технологий. Далее рассмотрены некоторые из них.

1.1 Вакуумно-дуговое испарение

Вакуумно-дуговое испарение – процесс нанесения высококачественных тонкопленочных покрытий, широко используемый в промышленных масштабах. Процесс вакуумно-дугового испарения основан на физике низковольтной, сильноточной катодной дуги. Эта дуга производит плотную, сильно ионизированную плазму, которая испаряет материал с поверхности мишени. Это возможно благодаря концентрации тока дуги на маленькой площади поверхности катода («катодные пятна»), что создает достаточно высокую плотность тока (10^{12} А/м²), связанную с высокой плотностью мощности (10^{13} Вт/м²). Такая концентрации тока дуги приводит к локализованному фазовому превращению катодного материала (мишени) в ионизированную плазму, которая расширяется в вакууме по направлению к подложке.

Применение технологии вакуумно-дугового испарения для получения покрытий на основе CrN реализуется при давлениях азота ниже 1 Па или от 2

Па до 10 Па. Авторами статьи [3] выдвинуто предположение, что при давлении азота ниже 1 Па диссоциация молекулярного азота при дальнейшем хемосорбировании происходит на поверхности подложки, а при давлении азота 2-10 Па – в объеме плазмы.

К достоинствам вакуумно-дугового испарения относят вариативность настройки скорости нанесения пленок, а также возможность нанесения сложных по химическому составу покрытий (например, нитридов, оксидов и т.д.). Также этот метод обеспечивает хорошую адгезию и сплошность получаемых пленок.

Основной недостаток вакуумно-дугового испарения – капли в газовой фазе. Авторы работы [6] наиболее вероятной причиной образования капель считают присутствие рабочего газа в объеме катода. Из-за этого во время кипения появляются газовые пузыри, которые интенсивно движутся на поверхность, при достижении которой разбрызгивают расплавленные микрочастицы катода. Наличие капель приводит к нарушению однородности пленки и ухудшению ее свойств. Исключить капли из газовой фазы можно следующими способами: сепарировать газовый поток в электрическом или магнитном полях; использовать дегазированные катоды или оптимизировать режимы испарения.

Вакуумно-дуговое испарение достаточно широко применяется для нанесения износостойких и защитных покрытий на поверхность режущих инструментов. При помощи вакуумно-дугового испарения могут быть получены достаточно твердые и нанокompозитные пленки [7].

1.2 Ионное распыление

Суть метода ионного распыления заключается в следующем. Катод бомбардируется ионизированными атомами разряженного газа. В результате этой бомбардировки катод разрушается, а распыленные атомы разлетаются по объему рабочей камеры и осаждаются на подложке. Напряжение между

катодом и анодом в диапазоне 1-5 кВ при низком давлении (10 Па) обеспечивает возникновение тлеющего разряда. Важный момент – при бомбардировке катода возможен отрыв целых кластеров (более крупных частиц).

К достоинствам данного метода нанесения покрытий относят следующие:

1) распыление – процесс, протекающий при низких температурах, поэтому возможно использование тугоплавкой мишени;

2) однородность покрытия по толщине (достигается благодаря постоянству химического состава распыляемого катода);

3) высокая адгезия получаемых покрытий к подложке;

4) высокий коэффициент использования распыляемого материала;

5) так как напыление происходит не из точечного источника, площадь поверхности получаемых пленок больше, чем при напылении термическим испарением.

Основной недостаток данного метода напыления – низкая скорость напыления.

1.3 Магнетронное распыление в атмосфере аргона и азота

Магнетронное распыление – это технология нанесения покрытия в вакууме, которая обеспечивает осаждение многих видов материалов, на поверхность подложки. Особенность данного метода – специально сформированное магнитное поле, приложенное к мишени. Это поле ускоряет и направляет в сторону мишени положительно заряженные ионы из плазмы. Направленные ионы выбивают с поверхности мишени атомы, которые затем осаждаются на подложке.

Для магнетронного распыления характерно замкнутое магнитное поле (оно создает «ловушку» для электронов). Использование плазмы при более низких давлениях уменьшает потери энергии распыленных атомов из-за

газовых столкновений [8]. Магнетронное распыление – основной метод выращивания тонких пленок. Это объясняется хорошей производительностью и низкой стоимостью [9]. Для реализации технологии магнетронного распыления используют специальные установки – магнетронные распылительные системы (МРС).

На рис. 1.1. показан принцип действия магнетронной распылительной системы. Основные элементы установки – катод-мишень, анод и магнитная система.

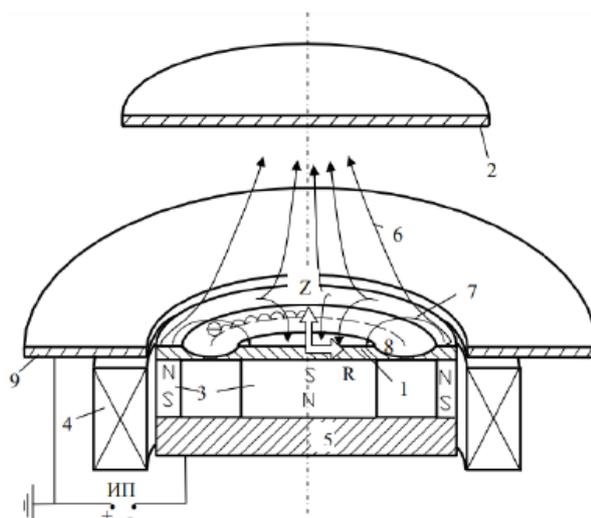


Рисунок 1.1 – Схема магнетронной распылительной системы:

1 – катод; 2 – подложка; 3 – постоянные магниты; 4 – электромагнит; 5 – магнитопровод; 6,7 – несбалансированные/ сбалансированные линии магнитного поля; 8 – область распыленного катода, 9 – крепежный фланец (выступает анодом), ИП – источник питания [10]

Между мишенью и анодом подаётся постоянное или импульсное напряжения, вследствие чего возникает неоднородное электрическое поле и появляется аномальный тлеющий разряд. Линии же магнитного поля перпендикулярны электрическому полю и параллельны катоду. Взаимодействие двух полей (магнитного и электрического) обуславливает движение электронов по спирали, а с увеличением длины пробега электронов увеличивается и вероятность столкновения с атомами аргона для генерации

ионов – повышается эффективность процесса ионизации и увеличивается концентрация положительных ионов у поверхности мишени. Чем выше концентрация положительных ионов, тем больше столкновений происходит на поверхности мишени под действием электрического поля и тем больше поток распыленных частиц.

Реактивное магнетронное осаждение протекает в атмосфере смешанных химически активного газа и инертного рабочего газа (обычно аргон) [11]. Эта смесь газов вступает в реакцию с материалом мишени, образуя на ее поверхности химические соединения [12], поэтому такое магнетронное осаждение называется реактивным.

Управляя подачей газов, можно менять стехиометрический состав будущей пленки [13].

В данной работе в качестве химически активного газа выступает азот, поэтому в дальнейшем будет рассмотрено только получение нитридов.

Режимы распыления мишени в атмосфере аргона и азота: металлический, нитридный и переходный. При металлическом режиме распыляются атомы металла с поверхности мишени, при нитридном – сначала происходит травление мишени (т.е. газ взаимодействует с поверхностью мишени с образованием нитридов), а затем распыляются получившиеся химические соединения.

Авторами работы [14] установлено, что 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 рис. 1.2.

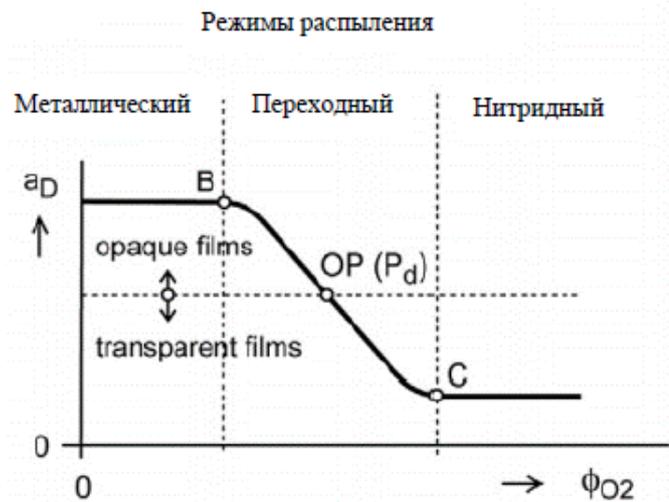


Рисунок 1.2 – Схематическое представление режимов при реактивном магнетронном распылении нитридных пленок [14]

Скорость осаждения нитридов в переходном режиме распыления превышает скорость осаждения в нитридном режиме (доказано экспериментально в работах [15,16]).

Выделяют три стадии процесса образования химических связей при реактивном магнетронном распылении (рис. 1.3).

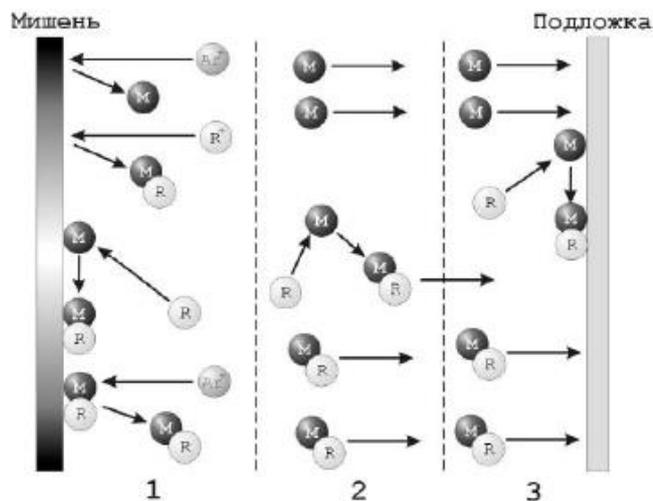


Рисунок 1.3 – Стадии процесса реактивного распыления: 1,2,3 – первая/вторая/третья стадии, соответственно; (М – атом материала мишени, R – атом реактивного газа; R⁺ – ион реактивного газа, Ar⁺ – ион атома аргона [17])

При реализации реактивного магнетронного распыления в объем рабочей камеры подаются смешанные потоки аргона и азота. Помимо бомбардировки катода происходит травление мишени (химически активные ионы образуют соединения на поверхности катода). Следовательно, распыляются и атомы чистого материала мишени, и образовавшиеся соединения.

Эти распыленные атомы устремляются к подложке, взаимодействуя на своем пути с другими частицами (иногда образуя соединения) в объеме рабочей камеры.

Достигая подложки, распыленные атомы осаждаются на ней. Наличие у этих атомов высокой энергии определяет сильную миграцию.

Реактивное магнетронное распыление имеет проблемы устойчивости распыления, вызванные образованием соединений в результате химических реакций на поверхности мишени и подложки (анодов): электрические пробой на поверхности мишени и анода, если образованное химическое соединение – диэлектрик, также травление снижает скорость распыления мишени [15].

Преимуществами традиционного реактивного магнетронного осаждения являются:

- 1) низкие тепловые нагрузки на подложку (это особенно значимо при напылении пленок на полимеры);

- 2) из сплавов возможно нанести покрытия сложного состава;

- 3) основное преимущество реактивного магнетронного осаждения перед другими способами осаждения – это хорошая воспроизводимость наносимых покрытий на большие подложки по составу и толщине;

- 4) покрытия можно непрерывно наносить в течении долгого времени (5от пяти до двадцати дней) благодаря запасу материала в распыляемой мишени [18].

Недостатки традиционных методов реактивного магнетронного осаждения представлены ниже:

1) значительная энергоёмкость процесса: 500 эВ на один распыленный атом против 50 эВ при, например, вакуумно-дуговом испарении;

2) из-за «вредного» образования соединений возникает нестабильность реактивных процессов при нанесении нитридов (карбидов, оксидов...) металлов, следовательно, появляется необходимость использования сложных систем контроля и управления разрядом [18];

3) скорость осаждения покрытий меньше 1 нм/с.

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

Если обеспечить условия, при которых мишень будет значительно нагреваться, то добавится еще один механизм эрозии – сублимация. Так как хром характеризуется высокой скоростью сублимации (при достижении температуры 1600 К), то при увеличении мощности источника питания магнетрона можно добиться значительного прироста к величине эрозионного потока. Помимо хрома высокой скоростью сублимации обладают титан, магний, цинк.

Конструкционные особенности катодного узла, при которых ограничивается теплоотвод с мишени, представлены во главе 2.

Авторы статьи [4] был проведен эксперимент по магнетронному осаждению хромовых покрытий при распылении мишени с полным теплоотводом («холодная» мишень) и мишени с ограниченным теплоотводом («горячая» мишень). Схема использованной авторами теплоизоляции горячей мишени показана на рис. 1.4(d).

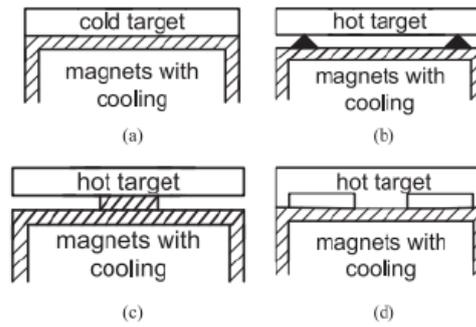


Рисунок 1.4 – Схемы теплопроводного контакта мишени с охлаждаемым корпусом магнетрона: (а) полное охлаждение, (b) полная теплоизоляция, (с) и (d) частичная теплопроводная изоляция.

Эксперименты подтвердили, что скорость осаждения экспоненциально растет при добавлении к механизму эрозии процесса сублимации. На рис. 1.5 представлены рассчитанные зависимости скорости осаждения V_{dep} и максимальной температуры на поверхности мишени в зависимости от усредненной плотности мощности. Для расчета скорости осаждения V_{dep} использовалась методика из [19].

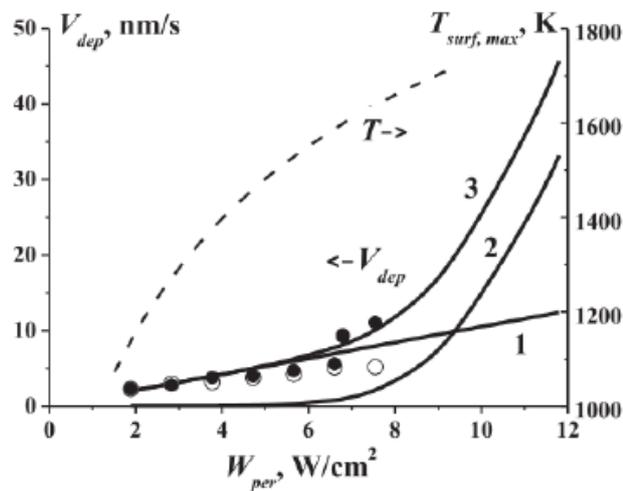


Рисунок 1.5 – Зависимость скорости осаждения покрытий и температуры на поверхности мишени ($T_{surf,max}$) от усредненной плотности мощности магнетрона (W_{per}). Пунктир – расчет $T_{surf,max}$. 1,2,3 – расчетные вклады процесса распыления и сублимации и их суммарная скорость, соответственно, Белые точки – экспериментальные данные относительно «холодной» мишени, черные точки – относительно «горячей» мишени.

И эксперименты, и расчетные данные показывают, что при низкой мощности источника питания магнетронной распылительной системы роль сублимации незначительна, так как мишень не нагревается до необходимой для сублимации температуры. Тогда скорость осаждения покрытий все еще остается не больше 1 нм/с.

Расчеты показывают, что, при добавлении потока сублимации в эрозионный поток, скорость нанесения покрытий может быть увеличена на порядок. Но существует ограничение в виде температуры плавления (в данном случае нельзя допускать плавления мишени).

1.5 Существующие способы управления осаждаемыми потоками частиц и энергии для обеспечения формирования защитных и упрочняющих покрытий при реализации вакуумно-плазменных методов

Управление осаждаемыми потоками частиц и энергии может осуществляться следующими способами. [20]

1. Регулируемая подача ионизирующих газов. Осаждаемые потоки частиц и энергии могут быть управляемыми путем регулировки подачи ионизирующих газов в плазму. Увеличение или уменьшение количества газа может изменить концентрацию и скорость ионов и электронов в плазме, что может привести к изменению свойств покрытия.

2. Изменение температуры субстрата и плазменного газа. Изменение температур может изменить скорость реакций на субстрате и в плазме, что в свою очередь повлияет на свойства покрытия.

3. Изменение конфигурации электродов. Изменение конфигурации электродов (например, расстояние между ними) может изменить распределение потоков частиц и энергии в плазме.

4. Изменение магнитных полей. Изменение магнитных полей в реакционной камере может изменить движение частиц в плазме, что также может повлиять на свойства покрытия.

5. Использование различных типов газов. Использование различных типов газов в плазме может привести к различным свойствам покрытия.

6. Использование различных типов субстратов. Использование различных типов субстратов может привести к изменению свойств покрытия. Например, использование металлического субстрата может привести к более твердым и устойчивым покрытиям.

7. Управление структурой покрытий. Управление структурой покрытий может осуществляться путем изменения параметров процесса осаждения, таких как скорость осаждения, температура субстрата и состав плазмы. [20]

Заключение к разделу 1

Из аналитического обзора можно заключить следующее. Необходимо научиться управлять потоками осаждаемых частиц, чтобы обеспечить и высокую скорость осаждения, и получить хорошие функциональные свойства покрытия.

В связи с этим были поставлены следующие задачи.

1. Получить данные о потоках частиц, поступающих на растущее покрытие, в зависимости от мощности магнетрона и положения подложки с растущим покрытием относительно горячей хромовой мишени. Сравнить расчёты с данными экспериментов о скорости осаждения в режиме планетарного вращения.

2. Выявить закономерности поступления частиц на подложку для прогнозирования элементного состава образующейся пленки.

3. Построить соотношения «ионный ток/осаждаемый атом Cr в зависимости от рабочих параметров для разных режимов осаждения; выявить наибольшие значения этих характеристик и установить связь с характеристиками механических свойств осаждаемых CrN_x покрытий.

4. Выполнить эксперименты по созданию потоков ускоренных ионов на подложку при использовании различных приёмов в организации осаждения;

произвести анализ ионного тока в зависимости от рабочих параметров осаждения, выявить режимы осаждения, при которых ионный ток является наибольшим.

Глава 2 Описание экспериментального, диагностического оборудования и расчётных методов

В главе 2 описываются отличительные особенности вакуумно-плазменной установки, разработанной в лаборатории НОЦ Б.П. Вейнберга ТПУ для магнетронного осаждения покрытий с использованием мишени с ограниченным теплоотводом, диагностическое оборудование, а также разработанные в НОЦ Б.П. Вейнберга ТПУ программные коды, с помощью которых были выполнены все необходимые расчеты (Hot Target, HIPIMS, Planet Rotation).

2.1 Описание экспериментального и диагностического оборудования

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

В данной работе было поставлено несколько экспериментов по магнетронному осаждению хромовых покрытий при распылении горячей хромовой мишени.

Конструкционные и технологические особенности эксперимента по осаждению покрытий из хрома описаны ниже.

На рис. 2.1 представлена схема вакуумно-плазменной установки, на которой происходило осаждение хромовых покрытий.

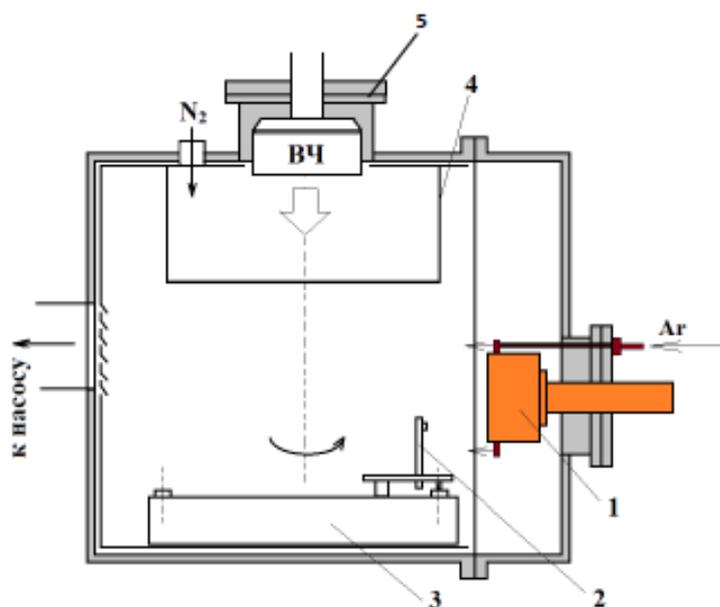


Рисунок 2.1 – Схема установки: 1 – магнетронная распылительная система; 2 – подложкодержатель; 3 – вращающийся столик; 4 – экран; 5 – ВЧ-источник плазмы

В таблице 2.1 приведены геометрические размеры используемой в экспериментах вакуумно-плазменной установки.

Таблица 2.1 – Геометрические размеры конструкции МРС

Диаметр мишени, мм	90
Толщина мишени, мм	6
Толщина перегородки кольца	1 мм+1 мм до корпуса магнетрона
Толщина кольца (размер контакта кольца с корпусом магнетрона), мм	1

Данная установка имеет два важных конструктивных отличия от классической магнетронной распылительной системы.

При реактивном магнетронном осаждении поток азота смешивается с потоком аргона. В магнетронном разряде молекулы азота диссоциируют, после чего взаимодействуют с поверхностью мишени с образованием нитридов

(травление мишени). Травление отрицательно сказывается на коэффициенте эрозии мишени.

В используемой в экспериментах установке организована отдельная подача рабочего газа (аргона) и азота (рис. 2.1). Электроны, генерируемые высокочастотным источником плазмы (расположен рядом с патрубком подачи азота), ионизируют и возбуждают атомы азота, и уже эти диссоциированные атомы и ионы устремляются к растущему покрытию. Отдельной подачей азота и аргона достигается увеличение коэффициента эрозии за счет исключения процесса травления (распыление происходит в металлическом режиме).

Второе принципиальное отличие – катодный узел. На рис. 2.2 представлено схематическое изображение катодного узла с мишенью, при реализации которого ограничивается теплоотвод с мишени. Мишень нагревается и начинает сублимировать.



Рисунок 2.2 – Схематическое изображение катодного узла вакуумно-плазменной установки, разработанной в лаборатории НОЦ Б.П. Вейнберга ТПУ для магнетронного осаждения покрытий

Более стабильной работы системы можно добиться при использовании конструкции в виде кольца. Поступающая на поверхность катода энергия ионного тока расходуется на его распыление и нагрев. В классических магнетронных распылительных системах мишень имеет полный контакт с корпусом магнетрона (мишень охлаждается во избежание достижения точки

Кюри), который, в свою очередь, охлаждается водой. При таком контакте разогрев мишени минимален. Для того, чтобы мишень разогревалась, необходимо, соответственно, ограничить теплопроводный контакт мишени с корпусом магнетрона (рис. 2.2). Тогда при достаточном разогреве хромовой мишени поток сублимированных частиц будет доминирующим в суммарном эрозионном потоке.

2.1.2 Диагностическое оборудование

2.1.2.1 Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

С помощью сканирующего электронного микроскопа можно определить толщину получаемых покрытий.

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 микроскопа представлена на рис. 2.3. Вакуум рабочих объемах СЭМ – необходимое условие работы СЭМ, так как иначе электроны при своем движении будут сталкиваться с молекулами воздуха.



Рисунок 2.3 – 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.

2.1.2.2 Определение твердости. Метод Виккерса

В данной работе измерение твердости покрытий проводилось с помощью тестера наноиндентирования NHT² от CSM Instruments SA (рис. 2.4). Представленный нанотвердомер предназначен для измерений твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса.



Рисунок 2.4 – Внешний вид нанотвердомера NHT² от CSM Instruments SA

При измерении твердости и микротвердости по Виккерсу алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом между

противоположными гранями при вершине вдавливаются в поверхность испытуемого образца под действием нагрузки (статической силы). Схема приложения нагрузки приведена на рис. 2.5. Нагрузку прикладывают перпендикулярно к поверхности испытуемого образца. После снятия нагрузки измеряют длины диагоналей отпечатка d_1 и d_2 .

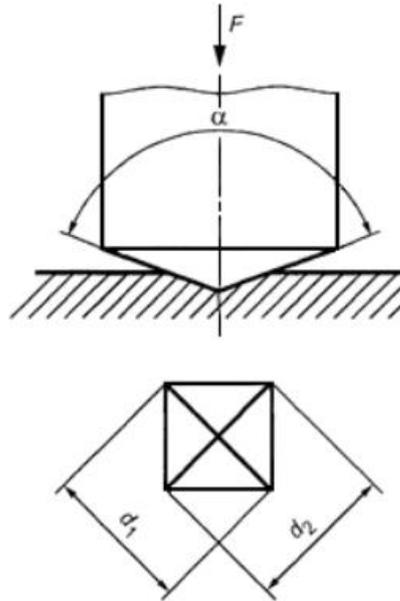


Рисунок 2.5 – Схема приложения нагрузки

Твердость по Виккерсу пропорциональна частному от деления нагрузки на площадь боковой поверхности отпечатка. Площадь боковой поверхности рассчитывают по длинам диагоналей, допуская, что отпечаток имеет форму правильной пирамиды, имеющей в основании квадрат, и с углом при вершине, совпадающим с углом при вершине у наконечника.

Число твердости по Виккерсу HV определяют по формуле:

$$HV = k \frac{F}{d^2}, \quad (2.1)$$

где $k = 0,1891$ – постоянная; F – нагрузка, используемая при измерении, Н; d – среднеарифметическое значение длин диагоналей d_1 и d_2 , мм.

2.1.2.3 Определение фазового состава. Метод рентгеновской дифракции

Метод рентгеновской дифракции (XRD) – это экспериментальный метод, используемый для определения структуры кристаллических веществ. Он основан на дифракции рентгеновских лучей на кристаллических решетках, что позволяет получить информацию о расположении атомов внутри кристалла.

В XRD образец нагревается или охлаждается и подвергается облучению рентгеновскими лучами различной длины волн. Рентгеновские лучи, проходя через образец, дифрагируют на кристаллической решетке, образуя дифракционные максимумы на детекторе. От расположения максимумов можно определить расстояние между плоскостями атомов в кристалле и его структуру.

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 на подложку использовался программный код «Hot target». Скорости распыления, плотности потоков частиц, поступающих на подложку за счет распыления мишени, определялись с помощью программного кода «HIPIMS». Плотность потоков и скорости осаждения, усредненные по обороту карусели, определялись с помощью программного кода «Planet Rotation». Эти программы разработаны в НОЦ Б.П. Вейнберга ТПУ.

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:

$$I = I_0 \cos(\varphi), \quad (2.2)$$

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

Скорость роста толщины осаждаемого покрытия на подложке в любой точке с координатами (x, y) при испарении с некоторой элементарной площадки i на мишени может быть описана законом Ламберта-Кнудсена в виде [21]:

$$V_{dep} = \frac{v_i dS_i \cos \alpha_i \cos \gamma_i}{\pi L_i^2}, \quad (2.3)$$

где v_i – скорость испарения с элементарной площадки площадью dS_i ; α_i – угол между прямой, соединяющей все центры элементарных ячеек на мишени $x_{targ\ i}, y_{targ\ i}$, и нормалью к поверхности мишени. γ_i – угол между прямой, соединяющей все центры элементарных ячеек на мишени, и нормалью к поверхности подложки; L – расстояние между мишенью и подложкой.

Плотность потока осаждаемых частиц в любой точке на подложке с координатами (x, y) в любой момент времени t при организации планетарного вращения [22]:

$$F_{dep}(X, Y, t) = \int \frac{F_i(x_{targ}, y_{targ}) \cos \alpha_i(x_t, y_t) \cos \gamma_i(x_{targ}, y_{targ}, t)}{\pi L_i^2(x_{targ}, y_{targ}, t)} dx_{tag} dy_{tag} \quad (2.4)$$

Скорость осаждения, выраженная в м/с, $V_{dep} = F_{dep}/n_0$, где n_0 – ядерная плотность вещества покрытия, которая в расчетах предполагается равной ядерной плотности вещества мишени

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:

$$V = V_{ev} + V_{sput}, \quad (2.5)$$

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 :

$$V_{sput} = S \cdot I_{ion} \cdot n_0, \quad (2.6)$$

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]:

$$S = \frac{3}{4\pi^2} \alpha \frac{\gamma E_0}{U_s}, \quad (2.7)$$

где $\gamma = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2}$; M_1 и M_2 – атомные массы распыляющего иона и материала мишени соответственно; α – 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:

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

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]:

$$V_{ev}(T) = \frac{1}{n_0 (2\pi m k T)^{\frac{1}{2}}} (P_{sat}(T) - P^*), \quad (2.9)$$

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 $O\tau$ – вдоль поверхности (рис. 2.6)

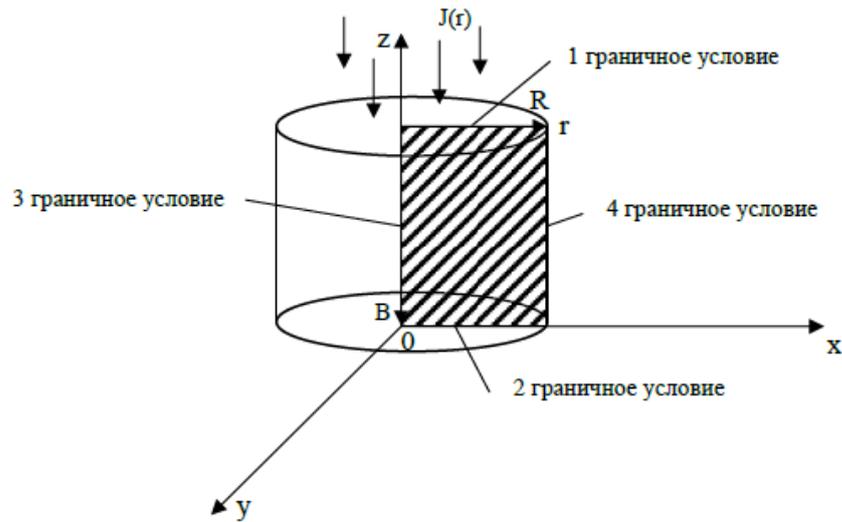


Рисунок 2.6 – Цилиндрическая система координат с азимутальной симметрией

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:

$$c\rho \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \lambda(z, r) \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} \right), \quad (2.10)$$

где $\frac{\lambda(z, r)}{c\rho}$ можно заменить на коэффициент температуропроводности «а», который является постоянной величиной. Получим:

$$\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} \right), \quad (2.11)$$

Начальные условия (в начальный момент времени):

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (2.12)$$

Граничные условия (на границах мишени):

1. На облучаемой поверхности:

$$\lambda(z, r) \frac{\partial T(r, z=0, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = -q(r, t) + \rho \cdot V_{ev}(r, t) \cdot \Delta H + Q_{rad}(r, t) + Q_s(r, t), \quad (2.13)$$

где ρ – плотность вещества мишени; $V_{ev}(r, t)$ – скорость испарения поверхности мишени (сублимации); ΔH – 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:

$$q(r, t) = j(r, t) \cdot E_0, \quad (2.14)$$

где $j(r, t)$ – ионный ток; E_0 – энергия частиц.

2. На задней стороне, противоположной поверхности облучения:

$$\lambda \cdot \partial \frac{T(r, z = b, t)}{\partial z} = Q_{rad}(r, t). \quad (2.15)$$

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

$$\lambda \cdot \frac{\partial T(r = 0, z, t)}{\partial r} = 0. \quad (2.16)$$

4. На боковой стороне:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T(r = R, z, t)}{\partial z} = Q_{rad}(r, t) \quad (2.17)$$

На боковой и задних стенках присутствует только тепловое излучение.

4 Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность

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

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- оценка коммерческого потенциала разработки;
- планирование научно-исследовательской работы;
- расчет стоимости научно-исследовательской работы;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной НИР – выявление условий осаждения защитных покрытий на основе нитрида хрома, которые способствуют обеспечению не только высоких скоростей роста, но и продвинутых характеристик механических свойств.

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

В настоящей работе используется метод высокоскоростного магнетронного напыления защитных CrN_x покрытий. Покрытия CrN_x используются в различных промышленных отраслях, в основном в области производства инструментов и механических деталей.

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений целесообразно проводить при помощи оценочной карты (таблица 4.1), для этого были определены 2 конкурента на рынке: технология ионно-лучевого распыления (К1), технология ионного осаждения (К2).

Таблица 4.1 – Карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Производительность	0,12	5	4	3	0,6	0,48	0,36
2. Надежность	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
3. Простота методики получения покрытий	0,08	5	4	5	0,4	0,32	0,4
4. Стоимость оборудования	0,06	4	4	4	0,24	0,3	0,24
5. Возможность автоматизации	0,1	4	4	5	0,4	0,4	0,5
6. Качество покрытий	0,12	5	4	3	0,6	0,48	0,36
7. Сложность получения покрытий	0,08	5	4	4	0,4	0,5	0,32
8. Безопасность	0,05	4	4	4	0,2	0,25	0,2
Экономические критерии оценки							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	3	4	5	0,12	0,16	0,2
3. Стоимость технологии	0,07	3	4	5	0,21	0,28	0,35
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	3	0,4	0,4	0,24
5. Послепродажное обслуживание	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
Итого:	1	57	54	52	4,52	4,47	3,87

Таким образом, конкурентоспособность научной разработки составила 4,52, в то время как у конкурентов 4,47 и 3,87, соответственно. Результаты показывают, что данная научно-исследовательская разработка является

конкурентоспособной и имеет полное преимущество по таким показателям, как производительность, качество покрытия, которые являются для нанесенного материала наиболее важными.

4.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Результаты исследования приведены в SWOT-анализ (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Лучшая производительность производства по сравнению с другими технологиями.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки. Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ. В2. Повышение стоимости конкурентных разработок.	1. Получение технологии исследований. 2. Продвижение НТИ на рынок.	1. Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др. 2. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей. 3. Приобретения необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ.
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологию. У2. Введения дополнительных государственных требований к сертификации технологии.	1. Продвижение технологии с целью создания спроса. 2. Сертификация и стандартизация технологии.	1. Приобретение необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ. 2. Продвижение технологии с целью создания спроса.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Список производимых задач и работ и их исполнители

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

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

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

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях».

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ожі}$ определяется по формуле:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.1)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; $t_{\min i}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.; $t_{\max i}$ – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн).

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

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

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 переводилась в календарные дни по формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.3)$$

где T_{ki} – календарный коэффициент. Для каждого исполнителя расчеты производились индивидуально; T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях; $k_{\text{кал}}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определялся по формуле:

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

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

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

$$1) t_{\text{ож}i} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8; T_{pi} = \frac{2,8}{1} = 2,8; T_{ki} = 2,8 \cdot 1,49 = 4,2 \approx 4 \text{ дн.}$$

Все полученные значения в календарных днях округлялись до целого числа.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость						Длит-сть в рабочих днях, T_{pi}		Длит-сть в календарных днях, T_{ki}	
	t_{min} , чел.-дн		t_{max} , чел.-дн		$t_{ож}$, чел.-дн		Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер
	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер				
Составление и утверждение технического задания	2	–	4	–	2,8	–	2,8	–	4	–
Выбор направления исследований и способа решения задач	2	–	4	–	2,8	–	2,8	–	4	–

Продолжение таблицы 4.4.

Подбор и изучение материалов по тем	–	21	–	28	–	23,8	–	23,8	–	35
Составление плана экспериментов	4	4	7	7	5,2	5,2	2,6	2,6	4	4
Подготовка образцов для экспериментов	–	3	–	5	–	3,8	–	3,8	–	7
Проведение экспериментальных работ	14	24	20	34	16,4	28	8,2	14	12	21
Выполнение расчетов	–	7	–	10	–	8,2	–	8,2	–	12
Анализ и обработка полученных результатов	–	5	–	8	–	6,2	–	6,2	–	9
Обсуждение и оценка эффективности результатов	5	6	7	9	5,8	7,2	2,9	3,6	4	5
Составление пояснительной записки	–	3	–	6	–	4,2	–	4,2	–	6
Подготовка к защите	–	4	–	6	–	4,8	–	4,8	–	7
ИТОГО	25	77	42	113	33	91,4	19,3	71,2	28	116

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Диаграмма Ганта

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ									
				февр		март		апр		май			
				1	2	1	2	1	2	1	2		
1	Составление ТЗ	Руководитель	4										
2	Выбор направления исследований	Руководитель	4										
3	Составление литературного обзора по теме	Инженер	35										
4	Построение модели проведения эксперимента	Руководитель, инженер	4										
5	Подготовка образцов к эксперименту	Инженер	7										

материальных ценностей определяется по нормам расхода. Также в стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3-5% от цены).

Таблица 4.6 – Сырье, материалы и комплектующие изделия

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб	Цена за единицу, руб
Баллон Кислород	O ₂ , 99,99%	1	13000	13000
Баллон Аргон	Ar, 99,99%	1	9000	9000
Всего за материалы				22000
Транспортно-заготовительные расходы (3–5%)				1760
Итого по статье				23760

4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме (таблица 4.7).

Расчет амортизации проводится следующим образом.

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.4)$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A N}{12} m, \quad (4.5)$$

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

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 РПГ128	1	10	2000	2000
Итого:					3000 тыс. руб.

Таким образом, для источника питания Applied Eletronics APEL-M5HPIMS-1k амортизация будет составлять:

$$A = \frac{100000}{7 \cdot 12 \cdot 30} \cdot 2 = 793,65 \text{ руб.}$$

Сканирующий электронный микроскоп:

$$A = \frac{2000000}{10 \cdot 12 \cdot 30} \cdot 1 = 555,55 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизированных отчислений:

$$A = 793,65 + 555,55 = 1349,2 \text{ руб.}$$

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

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

Основная заработная плата одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.6)$$

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (4.7)$$

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

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

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (4.8)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата; $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (4.9)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}, \quad (4.10)$$

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

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365

Продолжение таблицы 4.8.

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

Расчет основной заработной платы представлен в таблицу 4.9.

Таблица 4.9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.	$Z_{доп}$, руб.
Руководитель	37700	0,3	0,3	1,3	78416	3938,4	19,3	76011	9881
Инженер	23800	0,3	0,3	1,3	49504	2483,8	71,2	176790	22983
Итого								252801	32864

4.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды (таблица 4.10) определяется по формуле:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.11)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2023 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

Таблица 4.10– Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления во внебюджетные фонды
Руководитель проекта	76011	9881	25767,6
Инженер	176790	22983	59931,9
Итого	252801	32864	85699,5

4.3.5 Накладные расходы

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

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (4.12)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = (252801 + 32864 + 85699,5) \cdot 0,16 = 59418,32 \text{ руб.}$$

4.3.6 Бюджет НИР

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

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Рассчитанный бюджет затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты НИИ	23760
Амортизация оборудования	1349
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	252801
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	32864
Отчисления во внебюджетные фонды	85699,5
Накладные расходы	59418,32
Бюджет затрат НИИ	455891,82

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

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

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги напыления метода магнетронного распыления ($\Phi_{p1}=560535$): ионное осаждение ($\Phi_{p2}=420000$) и ионно-плазменное осаждение ($\Phi_{p3}=510000$).

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.13)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{pi} – стоимость i -ого варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{455892}{510000} = 0,89;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{420000}{510000} = 0,82;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = \frac{510000}{510000} = 1.$$

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

Оценка ресурсоэффективности проекта определялась посредством расчета интегрального критерия по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i b_i, \quad (4.14)$$

где I_{pi} – 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 4.12.

Таблица 4.12 – Сравнительная оценка характеристик проекта

	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Возможность получения покрытий сложного состава	0,25	5	3	4
Однородность покрытия	0,15	5	4	3
Адгезия покрытия	0,15	3	4	3
Скорость осаждения покрытия	0,2	4	3	5
Низкие температуры подложки	0,13	4	2	4
Управляемость процесса	0,12	4	4	4
	1	4,25	3,29	3,9

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

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

$$I_{p-исп3} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,13 + 4 \cdot 0,12 = 3,9.$$

Текущий проект по интегральному показателю ресурсоэффективности вариантов является выгодным и превосходит аналоги.

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

$$I_{ИП 1} = \frac{I_{р\text{исп}1}}{I_{фин.р}} = \frac{4,25}{0,89} = 4,78.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (табл. 4.13). Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}} = \frac{3,29}{4,78} = 0,77.$$

Таблица 4.13 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,89	0,82	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,25	3,29	3,9
3	Интегральный показатель эффективности	4,78	4,01	3,9
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,84	0,82

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект). Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность»

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

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено, что общее количество календарных дней для выполнения работ составляет 144 дня.

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 455892 руб;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

– значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,89, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;

– значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,25, по сравнению с 3,29 и 3,9;

– значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,78, по сравнению с 4,01 и 3,9, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

Глава 5 Социальная ответственность

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

В основе законодательства Российской Федерации об охране труда лежит конституция Российской Федерации и трудовой кодекс Российской Федерации. Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда в организации возлагаются на работодателя. Согласно Федеральному закону от 17 июля 1999 г. №181–ФЗ "Об основах охраны труда в Российской Федерации" (с изменениями от 20 мая 2002 г., 10 января 2003 г., 9 мая, 26 декабря 2005 г.).

Настоящая магистерская диссертация посвящена осаждению многослойного защитного покрытий на оболочки тепловыделяющих элементов. Данное исследование предполагает работу с высоким напряжением и различными газами. Объектом исследования являются покрытия CrN_x , а предметом исследования служат различные соотношения параметров напыления.

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

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

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

К специальным правовым нормам трудового законодательства относятся режим рабочего времени и защита персональных данных. Так как вредные

условия труда не наблюдались, то различные виды компенсаций не учитывались.

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

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

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

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

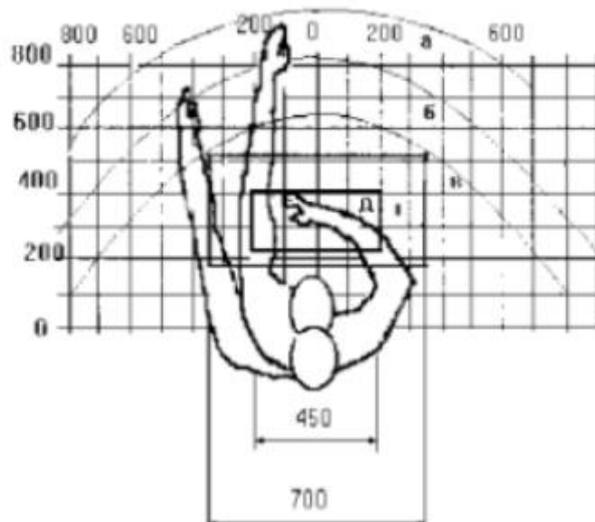


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; в – оптимальное пространство для грубой ручной работы; г – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

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 подъемно-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 заглубленным передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора

будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана.

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

5.1.3 Перечень нормативных документов

1. ГОСТ 54 30013-83 Электромагнитные излучения СВЧ. Предельно допустимые уровни облучения. Требования безопасности.

2. ГОСТ 12.4.154-85 "ССБТ. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты".

3. ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны

4. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 "Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)".

5. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

6. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

7. ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.

8. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

9. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.

10. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.

11. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха.

12. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов.

13. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.

14. ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования, основные параметры и размеры.

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 Отклонение показателей микроклимата в помещении

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека. К микроклиматическим показателям относятся температура, влажность и скорость движения воздуха, температура поверхностей ограждающих конструкций, предметов, оборудования, а также некоторые их производные.

В таблице 5.1 представлены оптимальные и допустимые значения температуры, влажности и скорости движения воздуха согласно ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

Таблица 5.1 – Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений

Период года	Категория работ, Вт	Параметр микроклимата	Допустимая величина
Холодный	Іб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	15-28 °С 20 – 80% < 0,5 м/с
Теплый	Іб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	21-28 °С 20 – 80% 0,1-0,5 м/с

При работе установки включены охлаждающие системы и одновременно с этим процессом происходит, нагрев вакуумной камеры, что приводит к изменению микроклимата в помещении.

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.

Температура наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не превышает 45 °С. Для создания оптимальных метеорологических условий применяется кондиционер, который поддерживает оптимальные параметры микроклимата автоматически, независимо от меняющихся условий. В холодное время года для поддержания в помещении оптимальной температуры воздуха применяется отопление.

5.2.2 Превышение уровней шума

Напыления многослойных покрытий осуществлялось на вакуумной установке, одними из основных частей которой являются форвакуумный и турбомолекулярный насосы, создающие производственный шум. Воздействие шума в первую очередь влияет на органы слуха, нервную и сердечно-сосудистую системы. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума при сосредоточенной умственной работе составляет дБА. Зоны с уровнем звука или эквивалентным уровнем звука выше 82 дБА обозначены знаками безопасности по ГОСТ 12.4.026. 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.

5.2.3 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Источником электромагнитных излучений в нашем случае являются дисплеи ПЭВМ. Монитор компьютера включает в себя излучения рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной области, а также широкий диапазон электромагнитных волн других частот. Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см вокруг ВДТ не должна превышать 25 В/м в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц, 2,5 В/м в диапазоне от 2 до 400кГц. Плотность магнитного потока не должна превышать в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц 250 нТл, и 25нТл в диапазоне от 2 до 400 кГц. Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать 500 В. В ходе работы использовалась ПЭВМ типа Acer VN7-791 со следующими характеристиками: напряженность электромагнитного поля 2,5 В/м; поверхностный потенциал составляет 450 В (основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76.).

При длительном постоянном воздействии электромагнитного поля (ЭМП) радиочастотного диапазона при работе на ПЭВМ у человеческого организма сердечно-сосудистые, респираторные и нервные расстройства, головные боли, усталость, ухудшение состояния здоровья, гипотония, изменения сердечной мышцы проводимости. Тепловой эффект ЭМП характеризуется увеличением температуры тела, локальным селективным нагревом тканей, органов, клеток за счет перехода ЭМП на теплую энергию.

Предельно допустимые уровни облучения (по ОСТ 54 30013-83):

а) до 10 мкВт/см², время работы (8 часов);

б) от 10 до 100 мкВт/см², время работы не более 2 часов;

в) от 100 до 1000 мкВт/см², время работы не более 20 мин. при условии пользования защитными очками;

г) для населения в целом ППМ не должен превышать 1 мкВт/см².

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется следующими способами:

СКЗ

1 защита временем;

2 защита расстоянием;

3 снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения;

4 экранирование источника;

5 защита рабочего места от излучения.

СИЗ

1. Очки и специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера.

2. Ежедневная защита обслуживающего персонала должна обеспечиваться другими средствами.

3. Вместо обычных стекол используют стекла, покрытые тонким слоем золота или диоксида олова (SnO₂).

5.2.4 Освещенность

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 300 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 не должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения $A = 7$ м, ширина $B = 6$ м, высота = 3,5 м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1,0$ м.

Согласно СП 52.13330.2016 необходимо создать освещенность не ниже 300 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь помещения:

$$S = A \cdot B. \quad (5.1)$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c=50\%$, свежепобеленного потолка $\rho_{п}=70\%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_z = 1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$.

Выбираем лампу дневного света ЛД-30, световой поток которой равен $\Phi_{лд} = 1650$ лм. К ней выберем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 30 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина – 265 мм.

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

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p, \quad (5.2)$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса, h_p – высота рабочей поверхности над полом. Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3500 \text{ мм} - 300 \text{ мм} = 3200 \text{ мм}.$$

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

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{pp} = 3200 \text{ мм} - 800 \text{ мм} = 2400 \text{ мм} = 2,4 \text{ м}.$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,4 \text{ м} = 2,64 \text{ м}.$$

Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{6}{2,64} = 2,27.$$

Число светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{7}{2,64} = 2,65.$$

Общее число светильников:

$$N = Na \cdot Nb = 2,27 \cdot 2,65 = 6.$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,64}{3} = 0,88.$$

Размещаем светильники в три ряда. На рис. 5.2 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

Однако необходимо провести дополнительные расчеты:

$$7000 = L_2 + \frac{2}{3}L_3 + 3 \cdot 265,$$

$$L_2 = \frac{3(7000 - 795)}{8} = 2326,$$

$$I = \frac{L_2}{3} = \frac{2326}{3} = 775.$$

Аналогичные расчеты проводим для длины комнаты:

$$6000 = L_1 + \frac{2}{3}L_1 + 2 \cdot 1227,$$

$$L_1 = \frac{3(6000 - 2454)}{5} = 2127,$$

$$I = \frac{L_2}{3} = \frac{2127}{3} = 709.$$

Индекс помещения:

$$i = \frac{A \cdot B}{h(A + B)} = \frac{7 \cdot 6}{2,4(7 + 6)} = 1,35.$$

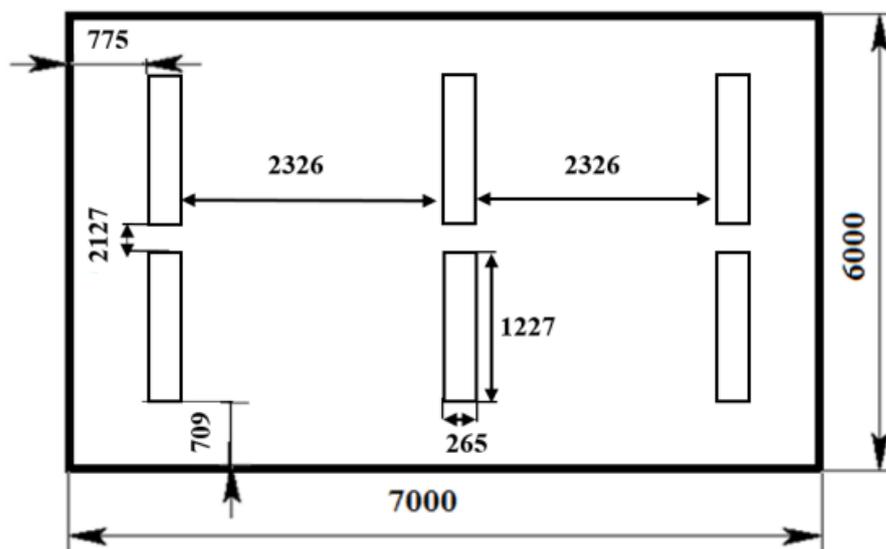


Рисунок 5.2 – Схема размещения светильников в помещении

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

Потребный световой поток одной люминесцентной лампы светильника:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{6 \cdot 0,53} = 3168,86 \text{ лм.}$$

Делаем проверку выполнения условия:

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

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{3200 \text{ лм} - 3168,86 \text{ лм}}{3200 \text{ лм}} \cdot 100\% = 0,97\%.$$

Таким образом: $-10\% \leq 0,97\% \leq 20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Теперь рассчитаем мощность осветительной установки:

$$P = 6 \cdot 30 \cdot 2 = 360 \text{ Вт.}$$

5.2.5 Пожарная безопасность

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории В –горючие и трудно горючие жидкости, твердые горючие и трудно горючие вещества и материалы, вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых находится, не относятся к категории наиболее опасных А или Б. Также в данном помещении расположены баллоны с инертными газами (азот, аргон), которые не относятся к категории А, Б или В. Наличие деревянных столов, стульев с горючим материалом относят помещение к категории В.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудносгораемым материалам).

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причина возникновения пожара неэлектрического характера: халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня).

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т.п.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например, ОП-5.

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

Для предупреждения пожара и взрыва необходимо предусмотреть:

1) специальные изолированные помещения для хранения и разлива легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении - соответствии с ГОСТ 12.4.021-75 и СНиП 2.04.05-86;

2) специальные помещения (для хранения в таре пылеобразной канифоли), изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;

3) первичные средства пожаротушения на производственных участках (передвижные углекислые огнетушители ГОСТ 9230-77, пенные огнетушители ТУ 22-4720-80, ящики с песком, войлок, кошма или асбестовое полотно);

4) автоматические сигнализаторы (типа СВК-3 М 1) для сигнализации о присутствии в воздухе помещений предвзрывных концентраций горючих паров растворителей и их смесей.

Лаборатория полностью соответствует требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, изображенного на рис. 5.3, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.



Рисунок 5.3 – План эвакуации

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

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

2. Баллоны с газом, устанавливаемые в помещении, находятся от радиаторов отопления и других отопительных приборов на расстоянии не менее

1 метра и от печей и других источников тепла с открытым огнем не менее 5 метров. При невозможности выдержать необходимое расстояние, необходимо применять защитные экраны, предохраняющие баллоны от местного разогрева, располагая баллон не ближе 0.1 м от экрана. Установленные баллоны также необходимо предохранять от действия солнечных лучей.

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

5.2.6 Электробезопасность

В производственном помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены.

Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений (кожухов, крышек, сеток и т.д.), расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

Каждому работнику необходимо знать основы медицинской помощи при поражении электрическим током. В любом рабочем помещении необходимо иметь медицинскую аптечку для оказания первой медицинской помощи.

Поражение электрическим током чаще всего происходит при небрежном обращении с приборами, при неисправности электроустановок.

Для освобождения, пострадавшего от токоведущих частей необходимо использовать непроводящие материалы. После освобождения пострадавшего изпод напряжения необходимо вызвать бригаду скорой медицинской помощи и оказать пострадавшему доврачебную медицинскую помощь:

- обеспечить доступ свежего воздуха (снять с пострадавшего стесняющую одежду, расстегнуть ворот);
- очистить дыхательные пути;

– при отсутствии дыхания приступить к искусственной вентиляции легких (искусственное дыхание);

– в случае необходимости приступить к непрямому массажу сердца.

Любой электроприбор должен быть немедленно обесточен в случае:

– появления запаха, характерного для горячей изоляции или пластмассы; - появления дыма или огня;

– появления искрения;

– обнаружения видимого повреждения силовых кабелей или коммутационных устройств.

Для защиты от поражения электрическим током используют средства индивидуальной защиты (диэлектрические перчатки, изолирующие инструменты, калоши, коврики) и средства коллективной защиты (заземление источников электрического тока, использование щитов, барьеров, специальных знаков и плакатов).

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

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

Помещения разделяются на три класса опасности.

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

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

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

Используемое помещение относится к классу с повышенной опасностью, так как в данном помещении возможно одновременное прикосновения человека к имеющей соединение с землей металлоконструкцией здания с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования, с другой стороны.

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

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

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

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

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

Безопасным для организма человека можно считать переменный ток силой не выше 0,1 А. Безопасными номиналами являются: $R_{\text{зазем}} < 4 \text{ Ом}$. Безопасным напряжением для человека считается напряжение 42 В в нормальных условиях и 12 В в условиях повышенной опасности (сырость, высокая температура, металлические полы и др.) в соответствии с ГОСТ 12.1.038-82* ССБТ.

5.3 Экологическая безопасность

В компьютерах огромное количество компонентов, которые содержат токсичные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся:

- свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- ртуть (поражает мозг и нервную систему);
- никель и цинк (могут вызывать дерматит);
- щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу).

Поэтому компьютер требует специальных комплексных методов утилизации. В этот комплекс мероприятий входят:

- отделение металлических частей от неметаллических;

- металлические части переплавляются для последующего производства;

- неметаллические части компьютера подвергаются специально переработке.

Исходя из сказанного выше перед планированием покупки компьютера необходимо:

- побеспокоится заранее о том, каким образом будет утилизирована имеющаяся техника, перед покупкой новой;

- узнать насколько новая техника соответствует современным эко-стандартам и примут ее на утилизацию после окончания срока службы.

Утилизировать оргтехнику, а не просто выбрасывать на «свалку» необходимо по следующим причинам.

Во-первых, в любой компьютерной и организационной технике содержится некоторое количество драгоценных металлов. Российским законодательством предусмотрен пункт, согласно которому все организации обязаны вести учет и движение драгоценных металлов, в том числе тех, которые входят в состав основных средств. За несоблюдение правил учета, организация может быть оштрафована на сумму от 20000 до 30000 руб. (согласно ст. 19.14. КоАП РФ).

Во-вторых, предприятие также может быть оштрафовано за несанкционированный вывоз техники или оборудования на «свалку».

Стадия утилизации, утилизируя технику мы заботимся об экологии: количество не перерабатываемых отходов минимизируется, а такие отходы, как пластик, пластмассы, лом черных и цветных металлов, используются во вторичном производстве. Электронные платы, в которых содержатся драгметаллы, после переработки отправляются на аффинажный завод, после чего чистые металлы сдаются в Госфонд, а не оседают на свалках.

Таким образом утилизацию компьютера можно провести следующим образом:

- отделить металлические детали от неметаллов;

- разделить углеродистые металлы от цветмета;
- пластмассовые изделия (крупногабаритные) измельчить для уменьшения объема;
- копир-порошок упаковать в отдельную упаковку, точно также, как и все проклассифицированные и измельченные компоненты оргтехники, и после накопления на складе транспортных количеств отправить предприятиям и фирмам, специализирующимся по переработке отдельных видов материалов.

Люминесцентные лампы утилизируют следующим образом. Не работающие лампы немедленно после удаления из светильника должны быть упакованы в картонную коробку, бумагу или тонкий мягкий картон, предохраняющий лампы от взаимного соприкосновения и случайного механического повреждения. После накопления ламп объемом в 1 транспортную единицу их сдают на переработку на соответствующее предприятие. Недопустимо выбрасывать отработанные энергосберегающие лампы вместе с обычным мусором, превращая его в ртутьсодержащие отходы, которые загрязняют ртутными парами.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При подготовке к зиме следует предусмотреть:

- а) газобаллонные калориферы (запасные обогреватели),
- б) дизель- или бензоэлектродгенераторы;
- в) запасы питьевой и технической воды на складе (не менее 30 л на 1 человека);
- г) теплый транспорт для доставки работников на работу и с работы домой в случае отказа муниципального транспорта.

Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

К техногенной ЧС относится несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место.

Для недопущения несанкционированного проникновения на рабочее место на предприятии следует применять систему контроля и управления доступом, каждый сотрудник должен иметь ключ – карту для прохода через пропускной пункт. На лицевой стороне такой карты размещается фотография и ФИО сотрудника, на задней стороне ключ – карты должен быть указан номер пропуска.

Пропускные пункты следует располагать на входе и внутри предприятия. Контроль на них следует осуществлять, помимо прочего, визуально на соответствие фотографии. Для попадания в искомое помещение нужно преодолеть не менее 2-х пропускных пунктов, что практически исключает несанкционированный доступ.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие должно быть оборудовано системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи. Кроме того, требуется исключить распространение информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве.

5.5 Выводы по разделу «Социальная ответственность»

В данной главе рассмотрены условия работы с установкой, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы.

Заключение

Основные выводы по работе представлены ниже.

1. При $Q_{уст.нпт.} > 1200$ Вт наблюдается заметный вклад сублимации хромовой мишени в увеличение скорости формирования покрытия.
2. Расчетная методика адекватно описывает процессы осаждения.
3. При планетарном вращении формируется слоистая структура покрытий: вблизи мишени осаждается слой хрома с незначительным содержанием азота, при удалении подложки от мишени появляются нитриды хрома.
4. Обнаружена корреляция между отношением «ионный ток/осажденный атом хрома» и твердостью получаемых покрытий. Т.е. этот критерий можно использовать для оценки условий осаждения покрытий с высокой твердостью.
5. Зависимость плотности тока смещения на подложках от потока азота имеет максимум при потоке азота равном $10 \text{ см}^3/\text{мин}$.
6. При объединении нескольких факторов, таких как сильное несбалансированное магнитное поле, DOMS источник питания, мощность ассистирующего ВЧ-источника не ниже 1000 Вт, напряжение смещения не ниже -100 В, то величина ионного тока смещения на подложку окажется значительной, что должно положительно повлиять на функциональные свойства получаемых покрытий.

Список литературы

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. – P.208-218.
3. Гугля А. Г., Неклюдов И. М. Покрытия на базе нитрида хрома. Опыт создания и исследования // Х.: НИЦ «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. – P.62-69.
5. G.A. Bleykher, A.V. Yuryeva, A.S. Shabunin, D.V. Sidelev, V.A. Grudinin, Yu.N. Yuryev, The properties of Cu films deposited by high rate magnetron sputtering from a liquid target // Vacuum. – 169. – 2019. – P.228-234.
6. Дунюшкина Л.А. введение в методы получения пленочных электролитов для твердооксидных топливных элементов: монография. – Е: УРОРАН, 2015 г. – 126 с.
7. 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.
8. Magnetron Sputtering Solutions. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.dentonvacuum.com/products-technologies/magnetron-sputtering/>
9. F. Shi, Introductory Chapter: Basic Theory of Magnetron Sputtering, Magnetron Sputtering [Working Title], 2018.

10. Магнетронная распылительная система для размещения внутри вакуумной камеры: руководство пользователя. – Т.: ООО прикладная электроника, 2013 г.
11. M. Ohring, *Materials Science of Thin Films // Depositions & Structure 2nd Edition*. – San Diego. – USA. – Academic Press. – 2002.
12. Сейдман Л. А., Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением/ Л. А. Сейдман, Е. В. Берлин, мир материалов и технологий, М.: техносфера, 2014 – 26 с.
13. S. Swann *Magnetron sputtering // Phys Technol*. – 19. – 1988. – P.67-75.
14. J. Musil, V. Satava, P. Baroch, *High-rate reactive deposition of transparent SiO₂ films containing low amount of Zr from molten magnetron target // Thin Solid Films*. – 519(2). – 2010. – P.775-777.
15. J.M. Schneider, W.D. Sproul, R.W.J. Chia, M.S. Wong, A. Matthews // *Surf. Coat. Technol*. – 96. – 1997. – P.262.
16. 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. – P.699.
17. 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.
18. Духопельников Д.В., Магнетронные распылительные системы. Часть 1: Устройство принципы работы применение/ Д.В. Духопельников, М.:Издательство МГТУ им. Баумана, 2014 – 55 с.
19. 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.

20. Сиделёв Д.В. Осаждение покрытий из хрома и никеля с помощью магнетронного диода с «горячей» мишенью: дис. канд. тех. наук: 01.04.07. - Томск, 2018. - 138 с.
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 РФФИ. 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. – V.205. – 2011. – S1–S9.
27. D. Depla, Magnetrons, Reactive Gases and Sputtering // Ghent University. – Belgium, 2015.
28. Грудинин В.А. Высокоскоростное осаждение покрытий на основе соединений хрома и азота с использованием плазмы магнетронных распылительных систем: дис. канд. тех. наук: 1.3.8. - Томск, 2022. - 164 с.

Приложение А

Investigation of the deposition conditions of CrN_x coatings during magnetron sputtering of a hot chromium target in an atmosphere of argon and nitrogen

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ11	Дербин А.Ю.		

Консультант НОЦ Б.П. Вейнберга ИЯТШ:

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

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОИЯ	Матвеев И.А.	д.фил.н.		

Contents

Introduction	119
1 Experimental part	121
1.1 Description of experimental equipment	121
1.2 Determination of the densities of chromium fluxes forming the coating, depending on the power of the magnetron	122
1.3 Influence of the substrate position on the value of the flux density of deposited particles and the formation of the elemental composition of CrN_x coatings	125
1.4 Description of the relationship of the "ion current/deposited Cr atom" ratios with the mechanical characteristics of deposited CrN_x coatings	126
1.5 Influence of various control parameters on the ion current density	126
References	127

Introduction

We know that it is possible to improve the properties of the material, apply various coatings. Such complex films as nitrides, in particular chromium nitride, are widely in demand in industry because these substances have a high melting point, corrosion resistance, increased hardness, etc.

Using the method of thermal evaporation in vacuum (quite simple to implement), it was possible to obtain films up to several microns thick. However, this method has serious drawbacks, such as the impossibility of applying complex coatings, the lack of the possibility of evaporation of refractory materials, as well as the possibility of surface defects on the film due to the departure of large particles during evaporation from the surface of the material.

Further, spraying methods based on the spraying of special targets, which are devoid of the disadvantages listed above, became popular. One of these methods is cathode sputtering. In contrast to the high deposition rate and good adhesion of the resulting coatings, the deposition rate and heating of the substrate were set.

With the advent of magnetron sputtering systems (which partially overcome the disadvantages of the cathode sputtering method), the method of reactive magnetron deposition began to be used more often. This method allows obtaining dense coatings with good adhesion and high hardness.

Chromium nitride coatings are usually obtained by the method of reactive magnetron deposition, the disadvantage of which is the deposition rate.

The relevance of the work is the need to develop a new technology for high-speed deposition of coatings based on chromium nitride.

The purpose of this work is to identify the deposition conditions of protective coatings based on chromium nitride, which contribute to ensuring not only high growth rates, but also advanced characteristics of mechanical properties.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. To obtain data on particle flows entering the growing coating and compare calculations with experimental data.

2. To perform experiments to create accelerated ion flows onto the substrate using various techniques in the organization of deposition.

3. To construct the ratio "ion current /deposited Cr atom" depending on the operating parameters for different schemes of deposition modes; to establish a relationship with the characteristics of the mechanical properties of deposited CrN_x coatings; to analyze the role of the spatial factor.

1 Experimental part

1.1 Description of experimental equipment

In this work, several experiments were carried out on the magnetic deposition of chromium coatings by spraying a hot chromium target.

The structural and technological features of the chromium coating deposition experiment are described below.

Fig. 1.1 shows a diagram of a vacuum-plasma installation on which chromium coatings were deposited.

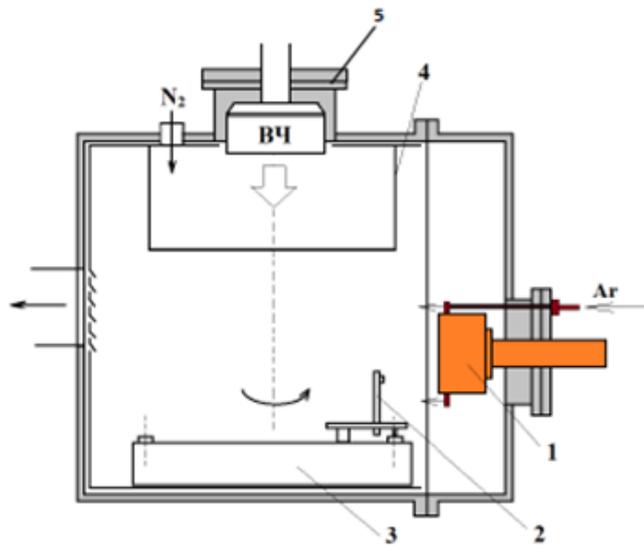


Figure 1.1 – Installation diagram: 1 – magnetron spray system; 2 – substrate holder; 3 – rotating table; 4 – screen; 5 – RF plasma source

So, what do we have in classical reactive magnetron deposition? Nitrogen is supplied along with argon. In the resulting magnetron discharge, nitrogen dissociates and interacts with the chromium target, forming chromium nitrides. And then these nitrides are sprayed and deposited on the substrate. And this has a bad effect on the erosion coefficient of the target.

The first fundamental difference of this installation is the separate supply of nitrogen and argon.

We have a nitrogen nozzle separately, there is also an RF plasma source. What do we get? Electrons produce ionization and excitation of nitrogen molecules, and already these dissociated atoms or ions arrive at the surface of the growing coating. Why is it necessary to organize the dissociation of nitrogen atoms? Because molecular nitrogen will not interact with chromium.

By these actions, we achieve an increase in the chemisorption coefficient of this nitrogen on the surface of the growing film and increase the erosion coefficient of the target by eliminating the etching process of the target.

And the second fundamental difference of this installation is the cathode node. We limit the heat sink from the target so that the target heats up and begins to sublime.

1.2 Determination of the densities of chromium fluxes forming the coating, depending on the power of the magnetron

An effective way to study the role of target sublimation in enhancing the erosive flow of atoms from the surface of a heated chromium target is mathematical modeling. Software codes developed at the B.P. Weinberg TPU ("Hot target", "HIPIMS", "Planet Rotation") were used for calculations.

One of the input data for the calculation is the distribution of the ion current density along the target surface. The authors of the article [1] have shown that this distribution is proportional to the distribution of the longitudinal component of the magnetic induction vector along the target surface. Fig. 1.2 shows the measured profile before and after a series of experiments.

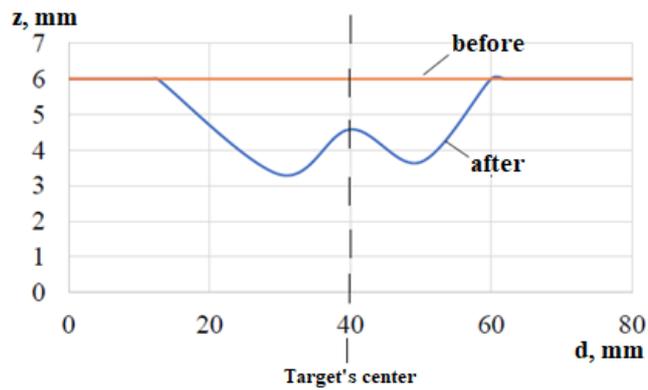


Figure 1.2 – Chromium target profile before and after a series of coating deposition experiments: z – target thickness, d – target diameter

Also, important coefficients for calculations were established by the authors of articles [2-3]. They showed that when transferring energy to the discharge, it is necessary to use the experimentally measured values of current and voltage in the electric circuit of the magnetron with correction coefficients of 0.9 for ion current and 0.75 for ion energy.

Fig. 1.3 shows the calculated values of the fluxes of sprayed and sublimated particles, the total erosive flow (for a chromium target with a diameter of 90 mm).

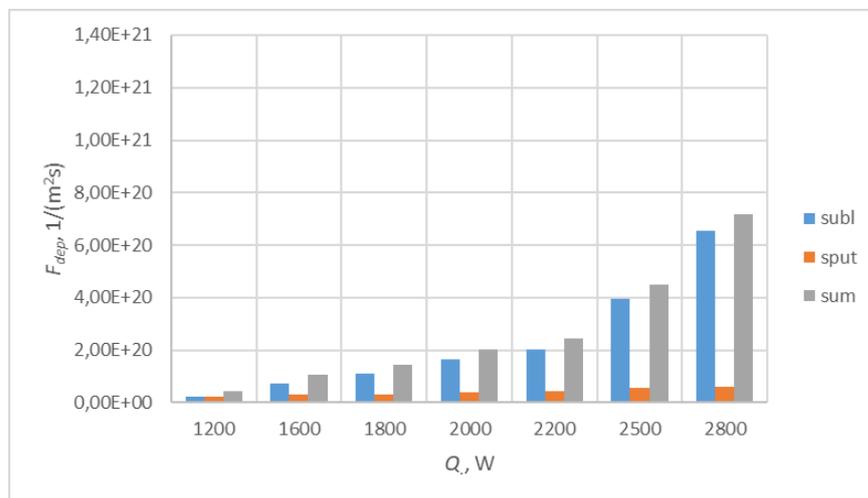


Figure 1.3 – The contribution of sublimation and sputtering to the density of particle flows

It can be seen how much the flow of sublimated particles increases and how many times exceeds the flow of atomized atoms with an increase in the power of the power source.

In the following calculations, to simplify, the area in which the coating is deposited during one period of rotation of the carousel was divided into 8 sectors.

The change in the density of the flow of chromium particles falling on the growing coating during one revolution of the carousel is shown in fig.1.4.

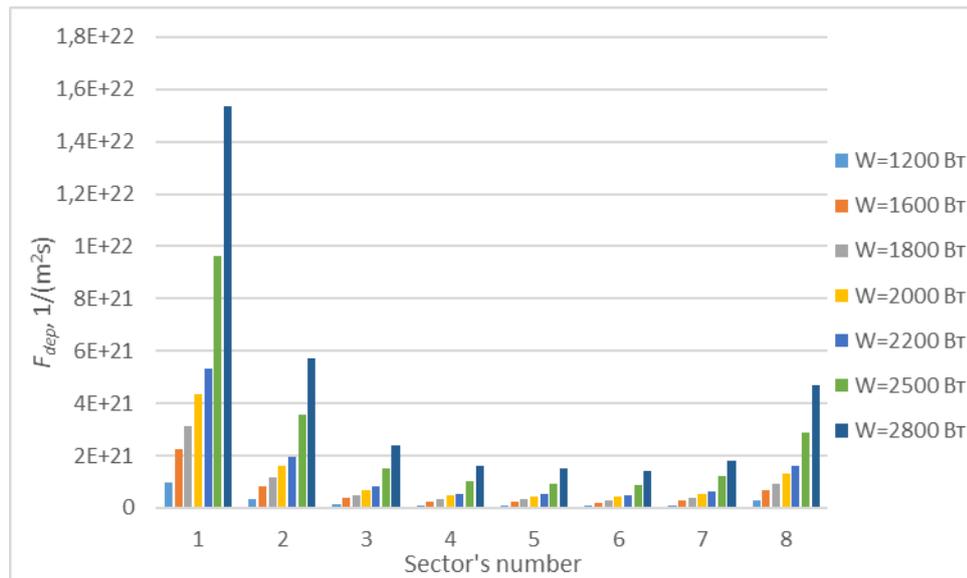


Figure 1.4 – The variation of the flux density of chromium particles falling on the growing coating during one revolution of the carousel for different magnetron power

The flow is very different in different sectors when the substrate moves along the carousel. The unevenness of the deposited coating may affect the formation of the phase composition of the chromium nitride coating. To test this factor, the following experiment on magnetron deposition of chromium coatings using a hot chromium target was conducted.

1.3 Influence of the substrate position on the value of the flux density of deposited particles and the formation of the elemental composition of CrN_x coatings

In order to conduct this experiment, a special holder was made. The positions of the substrates followed the trajectory of the substrate near the magnetron.

After deposition, an X-ray structural analysis of the obtained coatings was carried out (fig. 1.5).

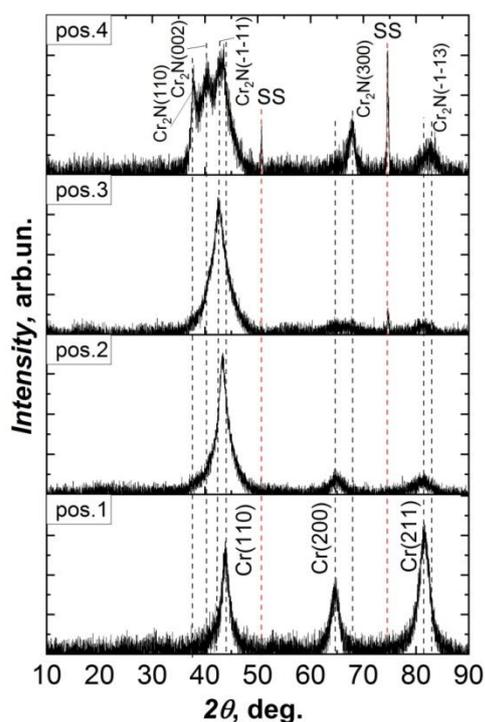


Figure 1.5 – Diffractograms of the obtained coatings

Now we see that the coating at position 1 consists of well-oriented chromium. In the coatings at positions 2 and 3, there is a broadening in the area of the $\text{Cr}(110)$ peak, which indicates the formation of a small number of phases other than chromium with a low nitrogen content. The coating at position 4 has many reflexes, the analysis of which allows us to attribute this coating to the composition of Cr_2N .

We conclude that during planetary rotation, a layered coating structure is formed: one chromium is deposited near the target, and chromium nitrides appear when the substrate is removed from the target.

1.4 Description of the relationship of the "ion current/deposited Cr atom" ratios with the mechanical characteristics of deposited CrN_x coatings

Next, an experiment was conducted on magnetron deposition of chromium coatings by spraying a hot chromium target in an atmosphere of argon and nitrogen. The ratio of the flow of sublimated particles to the flow of sprayed particles for this case was 3.38. The nitrogen intake into the chamber was changed and the density of the ion current on the substrate was measured.

The results of comparison of experimental data and calculations showed that there is a correlation between the ratio "ion current/deposited chromium atom" and the hardness of the coatings obtained.

1.5 Influence of various control parameters on the ion current density

Experiments were carried out on magnetron deposition of chromium coatings using a hot chromium target. Deposition was carried out on the surface of the substrates, fixed motionlessly opposite the target. The displacement current densities on the substrates were measured depending on the position of the substrate and various control parameters.

The following was found out:

- with an increase in the power of the power supply, the magnitude of the bias current on the substrates increases;
- with a change in the magnitude of the nitrogen flow, the kinetics of the formation of the particle flow to the substrate itself changes. Nitrogen is added, it also participates in emission processes and the current value changes. At first, there is an increase to some peak value, and then a decrease.

References

1. Bleykher, G. A., Borduleva, A. O., Krivobokov, V. P., Sidelev, D. V., Evaporation factor in productivity increase of hot target magnetron sputtering systems // Vacuum. – V.132. – 2016. – P.62-69.
2. A. Anders, Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering // Surf. Coat. Technol. – V.205. – 2011. – S1–S9.
3. D. Depla, Magnetrons, Reactive Gases and Sputtering // Ghent University. – Belgium. – 2015.