

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

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ МИШЕНИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

УДК 621.793.7:621.374

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ51	Спатаев К.А		

Руководитель

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

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менед. ИСГТ	Рыжакина Т.Г.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

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

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
Р1	Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-2). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р2	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий	Требования ФГОС (ОПК-1). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р3	Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты	Требования ФГОС (ОПК-5, ПК-5, ПК-8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р4	Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ПК-6, 7). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р5	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учетом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.	Требования ФГОС (ПК-12,13,14). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р6	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии.	Требования ФГОС (ПК-15,16). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р8	Заниматься организационно-управленческой деятельностью, владеть приемами и методами работы с персоналом,	Требования ФГОС (ПК-17,18, 19). Критерий 5 АИОР,

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Осуществлять научно-инновационную деятельность, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоемкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.	Требования ФГОС (ПК-1, 2, 3, 4). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<i>Универсальные компетенции</i>		
P10	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять свое научное мировоззрение.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК - 4). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОК-4, 5, ОПК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

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

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

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ЭФ
Кривобоков В.П.

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группы	ФИО
ОДМ51	Спатаев К.А

Тема работы:

Исследование процесса распыления алюминиевой мишени при воздействии импульсов постоянного тока

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1. Установка магнетронного напыления 2. Прибор для измерения толщины плёнок и покрытий (CALOTEST CAT-S-0000) 3. Системы измерения электрических параметров разряда
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Методы осаждения тонких плёнок металлов 2. Осаждение плёнок алюминия с помощью МРС с комбинированным источником питания
Перечень графического материала	1. Исследование процесса распыления алюминиевой мишени при воздействии импульсов постоянного тока 2. Investigation of the sputtering process of an aluminum target by DC pulses 3. Актуальность 4. Цель и задачи 5. Экспериментальное оборудование ч.1 6. Экспериментальное оборудование ч.2

	7.Электрические параметры разряда ч.1 8.Электрические параметры разряда ч.2 9.Расчёт длительности задержки выхода в высокомогущный режим ч.1 10.Расчёт длительности задержки выхода в высокомогущный режим ч.2 11.Оптико-эмиссионный анализ спектра плазмы МРС 12.Расчёт коэффициентов распыления 13.Скорость осаждения Al покрытий 14.Основные положения, выносимые на защиту 15.Заключение
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение»	к.э.н., доцент каф. Менеджмента, Рыжакина Т.Г.
«Социальная ответственность»	к.ф.-м.н., ассистент каф. ПФ, Гоголева Т.С.
«Раздел на английском языке»	ст. преподаватель каф. ИЯ ФТИ, Зяблова Н.Н.

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

- 1.Методы осаждения тонких плёнок металлов
- 2.Экспериментальное оборудование
- 3.Осаждения плёнок алюминия с помощью МРС с комбинированным источником питания
- 4.Investigation of the sputtering process of an aluminum target under the action of DC pulses

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ51	Спатаев К.А		

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ51	Спатаев К.А.

Институт	ФТИ	Кафедра	Экспериментальной физики
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	16.04.01 «Техническая физика»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение»	
<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость сырья и материалов Размер окладов и выплат исполнителям проекта
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Согласно проектной документации
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке	
<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Разработка анализа конкурентоспособности
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	Планирование работ; построение иерархической структуры ВКР
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	График проведения ВКР – диаграмма Ганта
<i>4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Оценка сравнительной и финансовой эффективности
Перечень графического материала	
<i>1. Оценка конкурентоспособности технических решений</i> <i>2. Матрица SWOT</i> <i>3. График проведения и бюджет НТИ</i> <i>4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i> <i>5. Сравнительная эффективность разработки</i>	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	Рыжакина Т.Г.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ51	Спатаев Казкел Айтбекулы		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ51	Спатаев К.А.

Институт	ФТИ	Кафедра	Экспериментальной физики
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	16.04.01 «Техническая физика»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны,) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – возможных вредных факторов: отклонение показателей микроклимата в помещении, превышение уровней шума, превышение уровней вибрации, электромагнитные поля и ионизирующее излучение от ЭВМ, работа с газ. баллона – опасные факторов: вероятность поражения электрическим током
2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ и установке МРС;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм; – предлагаемые средства защиты.
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ51	Спатаев Казкел Айтбекулы		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 113 с., 39 рис., 43 табл., 70 источников, 36 формул, 1 приложение.

Ключевые слова: распыление, магнетронные распылительные системы (МРС), сильноточное магнетронное распыление, комбинированный источник питания.

Объектом исследования является магнетронная распылительная система с комбинированным источником питания

Цель работы – получить данные о влиянии параметров комбинированной системы МРС на процесс осаждения плёнок металлов (на примере алюминия).

В ходе выполнения научной работы проводились экспериментальные исследования по осаждению алюминиевых покрытий с помощью магнетронной распылительной системы с комбинированным источником питания. Изучено влияние предварительной ионизации разрядного промежутка среднечастотными импульсами на параметры процесса сильноточного магнетронного распыления алюминиевого катода. Проведены расчеты величины задержки переходы работы магнетрона в высокомощный режим в зависимости от параметров импульса и наличия/отсутствия внешней системы предварительной ионизации. Определена эволюция состав плазмы в зависимости от параметров экспериментальной системы и получены данные о влиянии параметров сильноточного источника питания на скорость осаждения алюминиевых покрытий.

В результате исследования выявлены технологические возможности магнетронной распылительной системы с комбинированным источником питания для осаждения металлических покрытий (на примере алюминия). Получено, что предварительная ионизация разрядного промежутка перед сильноточными импульсами приводит к снижению разрядного напряжения и существенному (в 1,5 и более раз) уменьшению величины задержки выхода работы магнетрона в высокомощный режим. Экспериментальные данные по скорости осаждения алюминиевых покрытий показали, что снижение скорости осаждения обусловлено возрастанием пикового тока разряда в течение сильноточного импульса, а использование комбинированного источника питания позволяет повысить скорость осаждения.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	11
1. МЕТОДЫ ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК МЕТАЛЛОВ	14
1.1 Термическое испарение металлов в вакууме	14
1.2 Магнетронное распыление.....	17
1.3 Пути развития современной техники магнетронного распыления.....	24
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	32
2.1 Вакуумная установка для магнетронного распыления	32
2.2 Магнетронная распылительная система и системы электрического питания.....	33
2.3 Система измерений напряжения и тока разряда.....	34
2.4 Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов.....	35
2.5 Система Калотест (Calotest CAT-S-0000).....	36
3 РЕЖИМЫ ОСАЖДЕНИЯ ПЛЁНОК АЛЮМИНИЯ С ПОМОЩЬЮ МРС С КОМБИНИРОВАННЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ	38
3.1 Режимы распыления алюминиевого катода сильноточными импульсами	38
3.2 Расчёт длительности задержки переход режима работы МРС в сильноточный режим	38
3.3 Оптико-эмиссионный анализ спектра плазмы МРС	38
3.4 Скорости осаждения плёнок алюминия, получаемых с помощью МРС с комбинированным источником питания	38
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	38
4.1 Предпроектный анализ.....	38
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	38
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения	38
4.1.3. SWOT-анализ	40
4.2. Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	43
4.3. Методы коммерциализации результатов научно-технического следования.....	44
4.4. Инициация проекта.....	45
4.4.1. Ограничения и допущения проекта	47
4.5. Планирование управления научно-техническим проектом.....	47
4.5.1. План проекта	47
4.6. Бюджет научного исследования.....	49
4.6.1. Основная заработная плата.....	50
4.6.2 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	51
4.6.3. Отчисления на социальные нужды	52
4.6.4. Организационная структура проекта.....	52

4.7.	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	53
4.7.1.	Динамические методы экономической оценки инвестиций.....	53
4.7.2.	Чистая текущая стоимость (NPV).....	54
4.7.3.	Дисконтированный срок окупаемости	55
4.7.4.	Внутренняя ставка доходности (IRR).....	56
4.8.	Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (<i>PI</i>).....	57
4.8.1.	Оценка сравнительной эффективности исследования.....	57
5.	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	60
5.1.	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	60
5.2.	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их при работе на ПЭВМ и вакуумном установке	61
5.2.1.	Организационные мероприятия	61
5.2.2.	Технические мероприятия	62
5.3.	Условия безопасной работы	63
5.4.	Электробезопасность.....	67
5.5.	Пожарная и взрывная безопасность.....	68
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	71
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ.....	73

ВВЕДЕНИЕ

Технологии магнетронного осаждения тонкоплёночных покрытий широко применяются в различных отраслях промышленности. Одним из важных параметров техники магнетронного распыления является скорость осаждения покрытий, которая пропорциональна плотности мощности, поступающей на мишень. Однако немаловажным фактором является и управление микроструктурой и свойствами осаждаемых покрытий. В этой связи эффективно использовать сильноточные магнетронные распылительные системы (в зарубежной литературе - HiPIMS). Метод HiPIMS был разработан в конце 1990-х годов и с тех пор эта технология активно внедряется в современных отраслях производства по осаждению тонких плёнок [1-3]. Основными причинами, которые обеспечивают преимущество сильноточных систем перед классическим магнетронным распылением, являются: более высокая ионизация плазмы в разрядном промежутке, что приводит к ионизации распылённых атомов мишени, эффект самораспыления и интенсивный поток высокоэнергичных частиц на подложку. Однако, несмотря на преимущества и перспективы данного метода, широкого внедрения техники и технологий сильноточного магнетронного распыления в промышленности пока не произошло. Это обусловлено одним из главных недостатков HiPIMS – существенное уменьшение скорости осаждения покрытий в сравнении с классическим магнетронным распылением на постоянном токе. Степень снижения скорости напыления покрытий зависит от распыляемого материала катода, условий осаждения и может быть в диапазоне от 10% до 70%. Уменьшение скорости осаждения покрытий обусловлено эффектом «возвращения» распылённых атомов мишени обратно к катоду ввиду их ионизации в разрядном промежутке [4]. Решение данной проблемы зачастую заключается в поиске компромисса между качеством покрытия и скоростью осаждения. В ряде случаев показано, что снижение скорости осаждения покрытий может быть устранено путём оптимизации частоты и длительности импульсов источника питания [5-8] или изменения величины напряженности магнитного поля в области катода [9]. Но при этом неизбежно изменяются параметры потока падающих частиц на подложку и, соответственно, функциональные свойства осаждаемых покрытий. Одним из возможных путей решения низкой производительности сильноточных MPC может быть использование комбинированных систем электропитания, совмещающих как сильноточное импульсное магнетронное распыление, так и классическое распыление на постоянном токе или в импульсном режиме в области средних частот (20...300 кГц). Кроме этого, на практике необходимо обеспечить высокую повторяемость и стабильность электрических параметров

сильноточного разряда, от характеристик которого зависят скорость осаждения покрытий и функциональные свойства покрытий. Для получения стабильных режимов осаждения покрытий может быть использована предварительная ионизация плазмы (фоновый разряд). Фоновый разряд может поддерживаться источником постоянного тока, микроволновым источником или используется индуктивно-связанная плазма. Предварительная ионизация гарантирует создание маломощного (слаботочного) разряда, чтобы при подаче напряжения от сильноточного источника питания мгновенно перейти в высокомогущный (сильноточный) режим [15]. Для этого обычно используется дополнительный встроенный блок питания, обеспечивающий в момент паузы между сильноточными импульсами ток разряда на уровне 0,1...0,5 А. Таким образом, важным представляется исследовать процесс распыления металлических катодов в магнетронных распылительных при использовании импульсов с различными характеристиками.

Поэтому **цель данной работы** - получить данные о влиянии параметров комбинированной системы МРС на процесс осаждения плёнок металлов (на примере алюминия).

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. изучить поведение вольт-амперной характеристики разряда при использовании комбинированного источника питания МРС;
2. исследовать влияние параметров комбинированного источника питания на время задержки перехода работы магнетрона в высокомогущный режим;
3. исследовать состав плазмы с помощью оптико-эмиссионной спектроскопии;
4. определить зависимость производительности процесса осаждения плёнок алюминия от параметров комбинированного источника питания МРС.

В настоящей работе будет рассмотрено изменение параметров разряда при распылении алюминиевого катода. Алюминий выбран в качестве модельного материала.

Объект исследования – магнетронная распылительная система с комбинированным источником питания.

Предмет исследования – производительность МРС с комбинированным источником питания с алюминиевым катодом.

Научная новизна работы заключается в использовании комбинации импульсов постоянного тока (в слаботочном и сильноточном диапазоне) с соизмеримой усреднённой мощностью при распылении металлических катодов.

Практическая значимость работы:

1. Изучено влияние параметров среднечастотных импульсов на электрические характеристики разряда в сильноточном режиме.

2.Получены режимы осаждения плёнок алюминия с помощью МРС с комбинированным источником питания.

Научные положения, выносимые на защиту:

1.Экспериментально показано, что величина задержки выхода магнетрона в высокомогный режим зависит от мощности среднечастотных импульсов, используемых для предварительной ионизации.

1. МЕТОДЫ ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК МЕТАЛЛОВ

1.1 Термическое испарение металлов в вакууме

Наиболее простым методом получения тонких плёнок является термическое испарение в вакууме, схема установки, где может быть реализован данный метод представлен на рис. 1.1. Небольшое количество металла с точно определенной массой («навеска»), плёнку которого необходимо осадить, помещается в испаритель. Через испаритель, закреплённый в водоохлаждаемых медных токовводах, пропускается электрический ток в несколько десятков или даже сотен ампер, в зависимости от конструкции испарителя. Поскольку сопротивление материала испарителя превышает сопротивление медных токовводов, на испарителе происходит выделение электрической мощности, которое вызывает его интенсивный разогрев. Выделившаяся энергия идёт на разогрев металла и при достижении температуры плавления – на дальнейшее его испарение. Испарённое вещество конденсируется на поверхности подложки, расположенной над испарителем. Обычно навеску испаряют полностью, что гарантирует хорошую воспроизводимость толщины плёнки от процесса к процессу без использования средств контроля толщины.

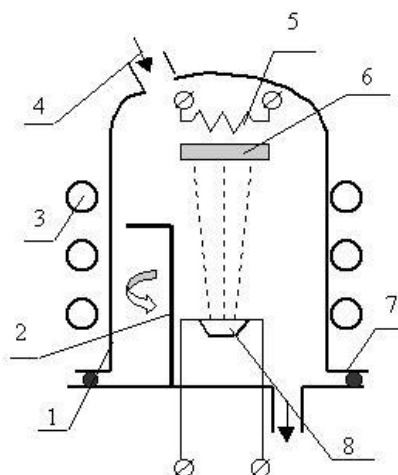


Рисунок 1.1 – Схема установки термического испарения: 1 - вакуумный колпак из нержавеющей стали; 2 - заслонка; 3 - трубопровод для водяного нагрева или охлаждения колпака; 4 - игольчатый натекатель для подачи атмосферного воздуха в камеру; 5 - нагреватель подложки; 6 - подложкодержатель с подложкой, на которой может быть размещен трафарет; 7 - герметизирующая прокладка из вакуумной резины; 8 - испаритель с размещённым в нём веществом и нагревателем (резистивным или электронно-лучевым).

Скорость испарения вещества возрастает с увеличением температуры испаряемого материала. Некоторые вещества переходят в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Такой процесс называется сублимацией. Температуру, при которой давление паров вещества над его поверхностью составляет 10^{-2} мм. рт. ст.,

называют температурой испарения вещества. Скорость испарения вещества определяется количеством вещества, испаряемого с единицы площади в t сек, и выражается формулой:

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

где $V_{исп}$ - скорость испарения, г/(см²·сек); p_s - давление насыщенного пара (10⁻² мм рт. ст.); M - молекулярный вес испаряемого вещества, г/моль; T - температура испарения вещества, К. В таблице 1.1 приведены значения температуры плавления, кипения и испарения, а также давления паров и скорости испарения некоторых материалов. Условной, практически установленной температурой испарения считается температура, при которой давление насыщенного пара вещества составляет приблизительно 1,3 Па.

Таблица 1.1 Температуры плавления металлов

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

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

Резистивным нагревом называют нагрев электропроводящего тела, обладающего высоким электрическим сопротивлением при прохождении через него электрического тока. Достоинства резистивного нагрева - высокий КПД, низкая стоимость оборудования, безопасность в работе и малые габаритные размеры. Факторы ограничивающими применение испарителей с резистивным нагревом являются возможность загрязнения наносимой пленки материалом нагревателя, а также малый ресурс работы из-за старения (разрушения) нагревателя, что требует его периодической замены.

Ленточные испарители применяются для испарения металлов, плохо удерживающихся на проволочных испарителях, а также диэлектриков и изготавливаются с углублениями в виде полусфер, желобков, коробочек или лодочек. Наиболее распространенными материалами для таких испарителей является фольга толщиной 0,1 - 0,3 мм из вольфрама, молибдена и тантала. Испаритель с углублением в виде полусферы, предназначенный для испарения относительно малых количеств вещества, показан на рис.1.2.а. Испарители лодочного типа (рис. 1.2.б) предназначены для испарения относительно больших количеств вещества.

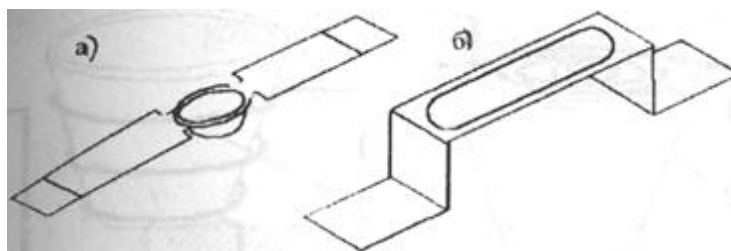


Рисунок 1.2 - Ленточные испарители косвенного нагрева: а) с углублением в виде полусферы, б) лодочного типа.

Материалы, используемые для изготовления испарителей, должны отвечать следующим требованиям:

- испарение материала испарителя при температуре навески должна быть пренебрежимо малой;
- для хорошего теплового контакта материал испарителя должен хорошо смачиваться расплавленным испаряемым веществом;
- между материалом испарителя и испаряемым веществом не должны происходить никакие химические реакции, так как это приводит к загрязнению наносимых пленок и разрушению испарителей;
- электропроводность.

В испарителях с непосредственным нагревом ток в несколько десятков ампер проходит непосредственно через испаряемый материал. Такой метод испарения может быть применен только для сублимирующихся материалов, т.е. металлов, температура плавления которых выше температуры испарения. Основное достоинство этих испарителей - отсутствие теплового контакта между их нагретыми элементами и испаряемым металлом, что обеспечивает высокую чистоту наносимой пленки. Однако они обеспечивают низкую скорость испарения, дают возможность испарять малое количество материала, который может быть использован только в виде ленты или проволоки, а также не позволяет испарять диэлектрики и большинство металлов. Данным методом получают

тонкие пленки легкоплавких материалов, в частности металлов с температурами плавления примерно до 1773 К, таких как: золото, серебро, медь, алюминий, индий, олово и т.д. Материал испарителя выбирается в зависимости от испаряемого материала, так, что избежать или минимизировать взаимодействие между ними. Например, если для нанесения плёнок меди можно использовать испарители из любого указанного тугоплавкого металла, то золото из-за химического взаимодействия невозможно испарить с танталового испарителя, поэтому для этой цели используют только вольфрамовые или молибденовые испарители. Ещё сложнее дело обстоит с алюминием, поскольку в расплавленном состоянии он является чрезвычайно активным металлом и образует интерметаллические соединения со всеми указанными тугоплавкими металлами. Для испарения алюминия чаще всего используют вольфрам, поскольку алюминий взаимодействует с ним не столь интенсивно, однако все равно испаритель достаточно быстро разрушается.

При наличии таких достоинств, как простота конструктивного исполнения и хорошая воспроизводимость толщины пленки от процесса к процессу, метод резистивного испарения имеет и ряд недостатков:

- небольшой перечень материалов наносимых пленок;
- ограниченные возможности нанесения толстых покрыти¹ из-за ограниченности массы навески испаряемого материала;
- возможное загрязнение атомами материала испарителя.

1.2 Магнетронное распыление

Магнетронные системы относятся к устройствам диодного типа, в которых распыление материала происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда. Данные системы отличаются высокой скоростью распыления, что достигается увеличением плотности ионного тока за счет локализации плазмы у распыляемой поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля по сравнению с классическими катодными системами. Принцип действия МРС показан на рис.1.3. Основными элементами устройства являются мишень (катод) 1, анод 3 и магнитная система 2. Силовые линии магнитного поля 7 замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени (катада) интенсивно распыляется. Область эрозии мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, имеет

вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно там, в области перед мишенью.

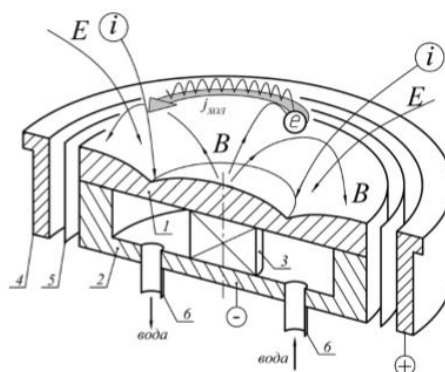


Рисунок 1.3 - Схема магнетронной распылительной системы и движение заряженных частиц в разрядном промежутке: 1 - катод-мишень; 2 - магнитопровод; 3 - магнит; 4 - анод; 5 - электростатический экран; 6 - штуцер подачи воды.

Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем, и им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям вдоль поверхности мишени. Электроны оказываются в «ловушке», создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой стороны поверхностью мишени, отталкивающей электроны. Электроны циркулируют в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод или стенки камеры, используется на ионизацию и возбуждение атомов рабочего газа, что значительно увеличивает эффективность ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени по сравнению с классическими диодными системами. Это, в свою очередь, обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости распыления, и, следовательно, скорости осаждения пленки. Величина ионного тока при магнетронном распылении составляет по меньшей мере несколько ампер при ускоряющем напряжении до 1 кВ. Скорость нанесения пленки при этом может составлять несколько десятков нанометров в секунду.

Траектория движения электронов в плазме магнетронных распылительных систем очень сложная, и описать ее аналитически с учетом всех составляющих движения практически невозможно. Количественный учет сложного движения заряженных частиц в газе обычно проводится разложением его на две составляющие: беспорядочное (диффузионное) и направленное движение. Преобладание того или иного вида движения зависит от давления газа p и напряженности электрического поля E , действующего в области разряда. Критерием оценки характера движения частиц является отношение E/p . Если значение этого отношения велико, то преобладающим является направленное движение под действием электрического поля. В магнетронных распылительных системах, работающих при сравнительно низких давлениях, существуют объёмные заряды и узкие области катодного и анодного падения потенциала, для которых характерны высокие напряженности электрического поля, где значение E/p велико [превышает 10^5 В/(м · Па)], что позволяет считать движение электронов и ионов в плазме магнетронных систем направленным.

Основным типом движения частицы в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, является циклотронное вращение со следующими параметрами:

$$r_l = \frac{v_{\perp}}{\omega}, \omega = \frac{ezB}{m}, \quad (2)$$

где r_l - радиус вращения частицы (ларморовский радиус), м; v_{\perp} - скорость движения частицы в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, м/с; ω - циклотронная частота, s^{-1} ; e - заряд электрона, Кл; z - кратность заряда частицы; B - индукция магнитного поля, Тл; m - масса частицы, кг.

Совместное действие электрического и магнитного полей вызывает дрейф заряженной частицы в направлении, перпендикулярном как электрическому, так и магнитному полям со скоростью:

$$v_{\perp} = \frac{E}{B}. \quad (3)$$

При движении в однородных электрическом и магнитном полях без начальной скорости траектория частицы представляет циклоиду, высота которой равна двум ларморовским радиусам:

$$h_{\perp} = 2r_l = \frac{2mE}{ezB^2}. \quad (4)$$

В скрещенных электрическом и магнитном полях могут существовать и другие типы дрейфовых движений, например: градиентный и центробежный дрейфы, вызываемые неоднородностью магнитного поля и искривлением его силовых линий. Скорости, характерные для этих движений, зависят от массы и заряда частицы, что приводит к разделению зарядов и появлению токов. Суммарная скорость дрейфа

заряженной частицы в магнитном поле с изогнутыми силовыми линиями складывается из скоростей градиентного и центробежного дрейфов:

$$v_{\text{др}} = \frac{m}{2ezB^2} (v^2 \perp + v^2 \parallel), \quad (5)$$

где n - единичный вектор в направлении B ; v^{\parallel} - скорость движения частицы в направлении, параллельном B , м/с. В магнетронных системах неоднородными являются как электрическое, так и магнитное поля, и поэтому в плазме разряда существуют все вышеперечисленные типы дрейфовых движений заряженных частиц.

Разряд поддерживается в основном за счет вторичных электронов, эмитируемых с катода под действием ионной бомбардировки. Выбитые из катода электроны ускоряются в область катодного пространства, где совершают ионизирующие столкновения с атомами рабочего газа до тех пор, пока не потеряют энергию и не попадут на анод.

Оценки по формуле(2) показывают, что у ионов более чем на два порядка больше, чем у электронов. Таким образом, при используемых в магнетронных распылительных системах расстояниях мишень-подложка магнитное поле практически не оказывает влияния на траекторию движения ионов, т.е. они прямолинейно двигаются. Электроны же, перемещаясь по сложным траекториям в области магнитной ловушки, совершают многократные столкновения с атомами рабочего газа.

Из-за неоднородности электрического и магнитного полей траектория электронов, эмитированных с катода, не является циклоидальной. Однако для удобства аналитического описания в первом приближении можно считать ее близкой к циклоиде. Как показано на рис. 1.4, электрон 3, ускоряясь в области темного катодного пространства (ТКП) шириной d_k по траектории, близкой к циклоидальной, удаляется от катода на расстояние d , и попадает в область плазмы. В общем случае $d_i > d_k$.

Если считать величины d_i и d_k близкими по значению, а электрическое поле в области ТКП достаточно однородным, то $d_i = h_y$ см. формулу (4), т.е. электрон удаляется от катода на расстояние двух ларморовских радиусов со скоростью v_{\perp} . Если $d_i \gg d_k$, то электрон, получив энергию в ТКП, будет дальше двигаться по ларморовской окружности, и в этом случае d_i близко к ларморовскому радиусу, причем

$$v_{\perp} = \left(\frac{2eU_k}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} = 5,9 \cdot 10^5 \sqrt{U_k}, \text{ м/с} \quad (6)$$

где U_k – падение напряжения в области ТКП, m_e – масса электрона, кг.

Ширина ТКП для случая $d_i = h_y = d_k$ определяется по формуле

$$d_k = 3,37 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{U_k}}{B_k}, \text{ м} \quad (7)$$

где B_k - индукция магнитного поля в области темного катодного пространства, Тл. ширину ТКП, вычисленную по выражению (формула7), можно считать максимально возможной, поскольку в этом случае практически все электроны с катода движутся в области ТКП и не выходят в область катодного (отрицательного) свечения плазмы, где они должны эффективно ионизировать газ.

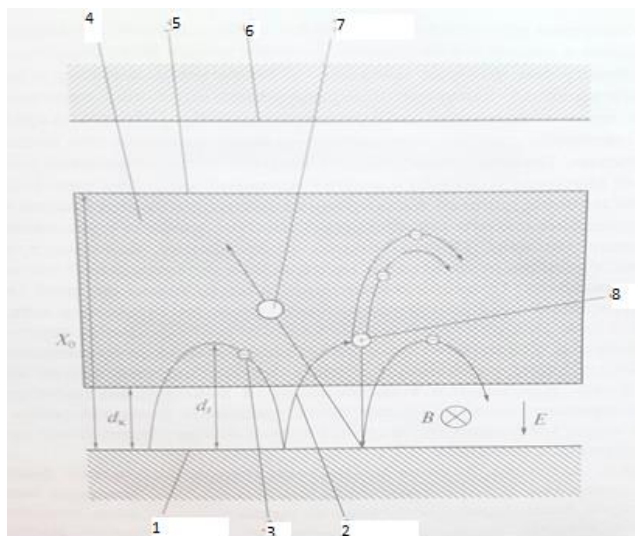


Рисунок 1.4 - Схема разрядного промежутка магнетронной распылительной системы: 1- катод-мишень; 2- траектория вторичного электрона; 3- электрон; 4- плазма; 5- условный анод; 6- анод; 7- распыленный атом; 8 – ион.

Реальную ширину ТКП можно приближенно выразить через плотность ионного тока по известной формуле Чайлда-Ленгмюра:

$$d_k = 4,7 \cdot 10^{-11} \frac{U_k^{3/4}}{m_i^{1/4} J_i^{1/2}}, \quad (8)$$

где m_i – масса иона, кг; J_i - плотность ионного тока на катоде, А/м².

Если электрон не столкнется на своем пути с другой частицей, то он возвращается к катоду и в некоторых случаях может быть обратно захвачен им. Электроны, которые попадают в магнитную ловушку и не возвращаются на катод, начинают совершать ионизирующие столкновения в плазме, теряют энергию и диффундируют к аноду. Область, в пределах которой электрон теряет свою энергию, является областью существования платы. Граница этой области разряда в магнетронной системе по своему потенциалу близка к аноду (условный анод 5 на рис.1.4).

Одной из особенностей магнетронных распылительных систем является локализация плазмы аномального тлеющего разряда у распыляемой поверхности мишени. Причем плазма имеет форму, близкую к тороидальной, и степень ее ионизации максимальна в центральной части над зоной распыления. Причина локализации плазмы около средней линии зоны распыления объясняется неоднородностью магнитного и

электрического поля. Это приводит неоднородному распылению поверхности мишени-катода, в отличие от методов катодного и триодного распыления. При магнетронном распылении область эрозии мишени всегда имеет форму кольца или эллипса в зависимости от конструкции магнетрона. По этой причине, если подложка будет находиться в неподвижном состоянии перед магнетроном, сформированная тонкая пленка будет иметь большой разброс толщины.

Прежде всего локализация плазмы происходит вследствие фокусировки электронов в магнитном поле, силовые линии которого имеют форму дуги. Рассмотрим это явление на примере электронов начальные скорости, которых направлены по нормали к поверхности мишени. Из рис. 1.5 а, видно, что электроны, эмитированные с краев зоны распыления, движутся вдоль силовой линии магнитного поля к середине зоны распыления под действием составляющей скорости v_{\parallel} , в то время как движение в направлении v_{\perp} ограничено сильным поперечным магнитным полем. Концентрация электронов над средней частью зоны распыления приводит к увеличению интенсивности ионизирующих столкновений и, следовательно, росту плотности плазмы в этой области. В результате этого плотность ионного тока в зоне распыления неоднородна: больше в центре и меньше у границ. Поскольку ширина ТКП обратно пропорциональна плотности ионного тока (формула 8), то границы области искажаются, что влечет за собой появление неоднородности электрического поля (рис. 1.5 б). Эквипотенциальная поверхность на границе ТКП вогнутая, и электроны, ускоряющиеся в области ТКП, под действием электрического поля смещаются по направлению к центру зоны распыления.

Дальнейший анализ движения электронов в магнетронной системе показывает, что при рассмотренной геометрии магнитного поля они совершают также градиентный и центробежный дрейфы со скоростью, определяемой по формуле (5), причём в условиях, когда имеет место как поперечный (∇B_{\perp}), так и продольный (∇B_{\parallel}) градиент индукции.

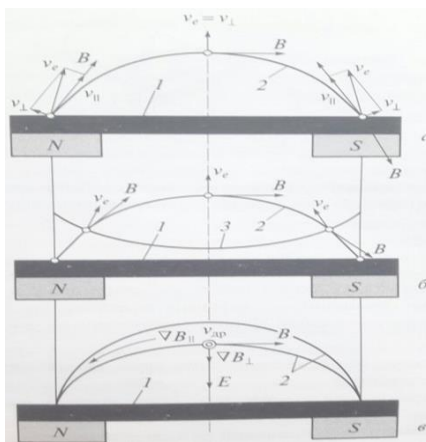


Рисунок 1.5 - Движение электронов в магнетронной распылительной системе: а-под воздействием магнитного поля; б- под воздействием электрического поля; в- дрейфовое движение;

1- катод-мишень; 2- силовая линия магнитного поля; 3- эквипотенциальная поверхность на границе ТКП

При изображенных на рисунке 1.5.в направлениях E , B и $(\nabla B \perp)$, электроны будут дрейфовать перпендикулярно плоскости рисунка вверх. За счёт продольного градиента индукции электроны, имеющие составляющую скорости в его направлении, будут тормозиться и отражаться магнитным полем к центру плазменного кольца прежде, чем они достигнут поверхности катода, поскольку каждый электрон стремится к сохранению своего магнитного момента:

$$\mu M = \frac{m_e v_{\perp}^2}{B}. \quad (9)$$

Метод магнетронного распыления из-за неоднородности электрического и магнитного полей имеет как очевидные достоинства, так и недостатки по сравнению с другими описанными выше методами ионно-плазменного нанесения. К числу несомненных достоинств можно отнести:

- относительно высокая скорость осаждения, что обеспечивает высокую чистоту плёнок;

- широкий диапазон варьирования режимов осаждения.

К тому же сохраняются практически все достоинства триодной системы:

- распыление диэлектрических материалов с использованием высокочастотного напряжения;

- реактивное нанесение соединений;

- возможность применения сопутствующей ионной бомбардировки поверхности осаждения.

Недостатками магнетронных распылительных систем являются:

- сильная неоднородность распыления поверхности (выработки) мишени и, как следствие, низкий коэффициент использования материала мишени;

- неравномерность осаждения плёнки по поверхности подложки;

- сложность распыления магнитных материалов.

Проблема неравномерности осаждения плёнки по площади, как правило, решается либо применением системы планетарного вращения подложек, либо использованием магнетронов вытянутой овальной формы. Такой магнетрон должен иметь длину больше диаметра подложки. Подложки поступательно движутся, например конвейерным способом, мимо магнетрона, что обеспечивает разброс по толщине плёнки не более 2-3%.

1.3 Пути развития современной техники магнетронного распыления

Основная зависимость, описывающая процессы, происходящие в плазме – вольт-амперная характеристика (ВАХ). На рис.1.6 представлены вольт-амперные характеристики сильноточного и классического магнетронного разряда при распылении хрома в атмосфере аргона при давлении 3 мТорр [10]. Зависимость между напряжением и током разряда при магнетронном распылении магнетрона хорошо изучена и известна:

$$I=kU^n. \quad (10)$$

Показатель степени n как правило находится в диапазоне от 5 до 15, достигая минимальных значений при низком давлении рабочего газа и слабом магнитном поле. Показатель n рассчитывается по наклону графика и для классического магнетронного разряда имеет значение 8. Для импульсного магнетронного распыления характерны два участка с различными показателями n . При малых плотностях тока ($<600 \text{ mA/cm}^2$) показатель $n=7$, что не сильно отличается от предыдущего режима, но при увеличении плотности тока наблюдается резкое увеличение напряжения (до 1,6 кВ), при слабом изменении тока. Авторы объясняют это явления тем, что при увеличении напряжения вторичные электроны приобретают достаточную энергию, которой хватает для преодоления магнитной «ловушки». Это приводит к уменьшению актов ионизации. Но при этом, отмечается зафиксированная высокая плотность ионов на уровне 10^{13} м^{-3} .

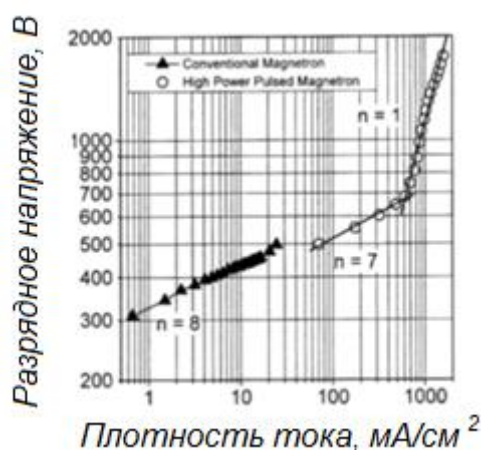


Рисунок 1.6 - ВАХ разряда прямоугольного магнетрона с мишенью из хрома в среде аргона [10].

В работе [11] также приводится похожая вольт-амперная характеристика, которая изображена на рисунке 1.7. Авторы отмечают аналогичную степенную зависимость тока и напряжения. При определённом (критическом) значении плотности тока поведение кривой становится другим. По этому признаку классифицируется переход в режим высокоомощного распыления. Красная черта (напряжение 650 В) на рисунке 1.7 указывает

на начало процесса снижения концентрации электронов в магнитной ловушке. Необходимо отметить тот факт, что при высоких плотностях тока на мишени, помимо процесса физического распыления возникает поток испарённого вещества, который также участвует в формировании покрытий. Также, высокая мощность источника питания способствует повышению доли ионизированного вещества в потоке. В ряде работ [11-13] отмечается, что степень ионизированных частиц достигает более 70 %. В публикации [14] указывается на увеличение этого параметра до 90 %.

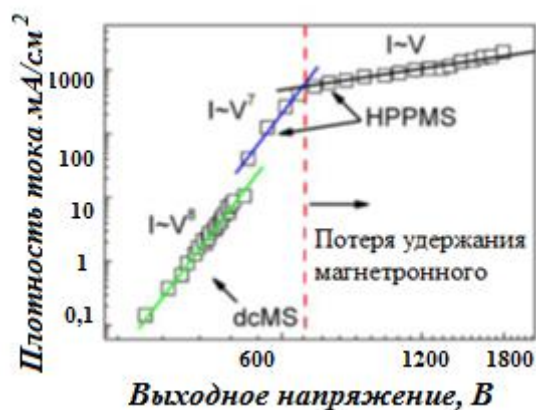


Рисунок 1.7- Типичная ВАХ разряда магнетрона с металлической мишенью в среде инертного газа [11].

Для обеспечения стабильности горения разряда при высокомоном распылении, а также для того, чтобы уменьшить инерционность процесса поджига разряда применяется предварительная ионизация. Её источник может быть как дополнительным (внешним), так и встроенным в высокомоном блок питания. Предварительная ионизация гарантирует горение маломощного разряда для генерации ионов, чтобы при подаче высоковольтного импульса мгновенно перейти в высокомоном режим [15]. Фоновый разряд может поддерживаться источником постоянного тока, микроволновым источником, используется индуктивно-связанная плазма. Также можно использовать метод подачи длительных импульсов (несколько миллисекунд). В этом случае импульс состоит из двух (или более) частей. На первой стадии происходит перевод газовой среды в слабоионизированное состояние. Далее, вторая часть импульса переводит тлеющий разряд в высоко ионизированное состояние. Слабо ионизированный режим позволяет стабилизировать переход в сильно ионизированное состояние, а также способствует подавлению дуги в режиме высокой мощности.

Известен ряд публикаций, в которых поток вещества создаётся за счёт самораспыления мишени ионами металла, а не рабочего газа [16-28]. В этом режиме из-за высокой степени ионизации плазмы атомы распыляемого вещества материала мишени

могут быть ионизованы и участвовать в процессе распыления материала мишени. При этом ввиду термализации атомов рабочего газа в области разрядного промежутка происходит замещение атомов инертного газа распылёнными атомами. Однако переход магнетронного разряда в режим самораспыления (рис.1.8), при котором в качестве рабочего газа выступают атомы материала мишени, возможен лишь при достаточно высоких плотностях мощности разряда.

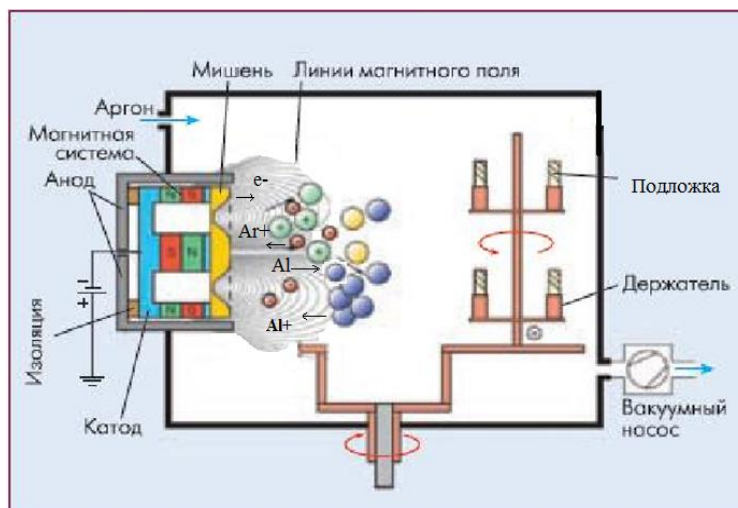


Рисунок 1.8 -Схема магнетронной распылительной системы и режим самораспыления.

Схема процесса самораспыления может быть представлена следующим образом:

- 1) свободные электроны в области мишени и электроны, полученные за счёт автоэлектронной эмиссии, ускоряются в сторону анода электрическим полем, сталкиваются с атомами рабочего газа и ионизируют их;
- 2) положительные ионы рабочего газа ускоряются в сторону мишени, бомбардируют её и распыляют;
- 3) распылённые атома материала мишени, направленные в область подложки, могут сталкиваться с атомами аргона, вымещая их из разрядного промежутка, и ионизоваться за счёт столкновений с электронами плазмы;
- 4) положительно заряженные ионы материала мишени ускоряются в сторону мишени и бомбардируют её, реализуется процесс самораспыления.

Сильноточное магнетронное распыление реализуется при следующих параметрах электрического импульса источника питания.

- разрядное напряжение 500...2000 В;
- длительность импульса 10...400 мкс;
- частота следования импульсов 0,1...10 кГц.

Рассмотрим динамику процессов при сильноточном магнетронном распылении:

$-t_{имп} < 30$ мкс: ионы аргона доминируют в распылении катода. Имеется тенденция к увеличению скорости напыления при уменьшении длительности импульсов. Так, например, для случая осаждения титана: уменьшение длины импульса от 20 мкс до 5 мкс (при неизменных параметрах тока и напряжения) приводило к увеличению скорости осаждения от 20% до 70% в сравнении с среднечастотным магнетронным распылением при той же мощности;

$-t_{имп} = 30-200$ мкс: часто используется диапазон 80–100 мкс, который приводит к появлению в потоке большого количества ионизированных атомов материала мишени. При увеличении длины импульса повышается количество этих ионов и они, притягиваясь к катоду, принимают активное участие в самораспылении, что существенно снижает скорость осаждения покрытий;

$-t_{имп} = 200-500$ мкс: нагрев газа в области мишени приводит к снижению его концентрации, что серьёзно влияет на параметры разряда. Если этот процесс не компенсируется генерацией ионов за счёт самораспыления, то резко снижается ток разряда;

$-t_{имп} > 500$ мкс: более длительные импульсные режимы, где разряд поддерживается в течение нескольких миллисекунд реализуются в режиме высокоомощного импульсного распыления, при котором коэффициент заполнения импульса достигает 30 % (по сравнению с 1–10 % при HiPIMS). Это приводит к уменьшению предельного для магнетрона значения тока, после которого он может выйти из строя ввиду перегрева. Из-за этого снижается доля ионизированных атомов металла в потоке.

В дополнении, можно отметить, что плотность тока HiPIMS разряда является основным показателем состояния степени ионизации атомов материала мишени. Увеличение плотности тока разряда приводит к увеличению доли однозарядных и многозарядных ионов в потоке. Приложенное к катоду отрицательное напряжение определяет энергию ионов и, следовательно, коэффициент распыления материала мишени. Увеличение этого напряжения повышает энергию ионов и тем самым возрастает количество выбиваемых из мишени частиц (коэффициент распыления $\sim (Ud)^{1/2}$, где Ud – напряжение разряда). Также для увеличения скорости осаждения покрытий можно увеличивать частоту импульсов.

Высокая степень ионизированных атомов материала мишени (свыше 60%) в потоке резко снижает скорость осаждения покрытий [29,30], но при этом становятся шире возможности для управления свойствами плёнок.

В ряде статей при распылении различных материалов, таких как Cu [11,14,21-23,25,31], Al [19,32], Ag, Pb, Cd, Ti [18], W [20], Cr[33], отмечается возможность перехода в режим самораспыления.

В таблице 1.2 сравниваются коэффициенты распыления материалов ионами аргона и ионами материала мишени. Из представленных данных видно, что в большинстве случаев коэффициент самораспыления незначительно ниже коэффициента распыления ионами аргона. Но в целом, имеет схожее значение и можно говорить о возможности реализации режима, когда металлические плёнки будут осаждаться при отключении рабочего газа.

Таблица 1.2 Коэффициенты распыления металлов [11]

Мишень	$\gamma(\text{Ar}^+)$	$\gamma(\text{Me}^+)$
Al	0,306	0,462
Ti	0,634	0,519
Cr	1,407	1,154
Cu	2,443	2,046
C	0,032	0,090
Ta	1,002	1,714

Авторы [11] находят границу раздела между двумя режимами распыления. Начальная стадия распыления происходит в среде аргона при давлении 4 мТорр. Минимальный ток разряда, при котором возможен режим самораспыления, составил для медной мишени 12,5А, а для никелевой мишени равнялся 15,6А. При этом плотность мощности газового разряда составила 370 Вт/см² (Cu) и 490 Вт/см² (Ni). Дальнейшие эксперименты дали возможность понять то, что для устойчивого горения разряда магнетрона с медной и никелевой в режиме самораспыления плотность мощности должна быть равна 410 Вт/см² (ток 14А) и 510 Вт/см² (ток 16А) соответственно. Также отмечается заметное отличие электрических плёнок твердого раствора меди и никеля при сравнении структур, изготовленных в атмосфере аргона и без него. Это связано со снижением концентрации примесей, источником которых служит рабочий газ, в синтезируемых покрытиях.

В работе [12] имеется графическая зависимость (см. рис.1.9), определяющая долю ионизированных атомов мишени после воздействия импульса. Можно заметить, что самый длительный эффект сохранения высокого уровня ионизированных атомов металла свойственен титану, а наименьший углероду. Эту зависимость необходимо учитывать при выборе параметров импульса тока на источнике питания.

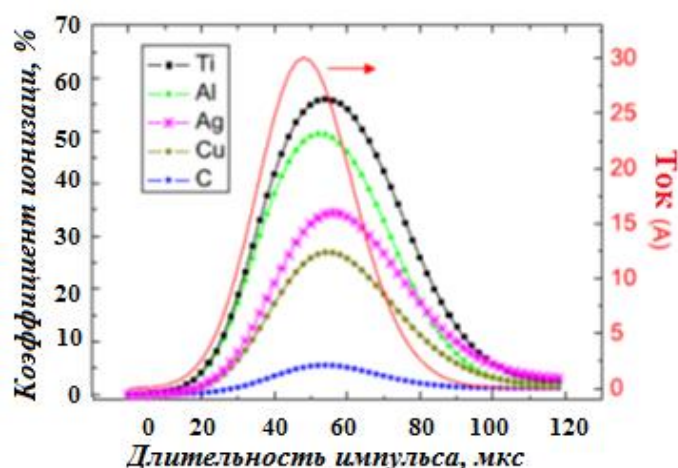


Рисунок 1.9 - Зависимость доли ионизированных атомов мишени от времени после воздействия импульса [12]

Известен ряд публикаций, в которых поток вещества создаётся за счёт самораспыления мишени ионами металла, а не рабочего газа [16-28]. В этом режиме из-за высокой степени ионизации атомов распыляемого вещества создаются условия для того, чтобы в случае прекращения потока аргона в камеру, ионы (однозарядные и двухзарядные) распыляемого металла бомбардировали поверхность мишени, выбивая из неё атомы. Высокая степень ионизированных атомов материала мишени (свыше 60%) в потоке резко снижает скорость осаждения покрытий [29], [30], но при этом становятся шире возможности для управления свойствами плёнок.

В таблице 1.3 представлено отношение скоростей осаждения с помощью высокомогущного и классического магнетронного распыления для различных металлов и соединений.

Таблица 1.3 Отношение скоростей осаждения пленок

Покрытие	Ti	Cr	Cu	Al	Ta	Zr
$V(HPPMS)/V(DC)$, %	15-75	29	37-80	35	22-40	15
Покрытие	TiSiC	TiO ₂	ZrO ₂	Ta ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	TiAlN
$V(HPPMS)/V(DC)$, %	60	30-120	40	106	25-31	100

Из вышеперечисленных материалов медь обладает максимальным коэффициентом распыления и самораспыления. Это значит, что переход в режим работы без рабочего газа будет менее затруднительным, чем в случае использования других материалов. Это подтверждается большой долей работ исследования самораспыления, в которых в качестве материала мишени используется медь. В одной из таких публикаций [23] рассматривается установка с двумя магнетронами, на одном из которых установлена медная мишень, а на другой - никелевая. В результатах работы приводятся вольт-

амперные характеристики (см. рис. 1.10), на которых указаны режимы распыления под действием потока ионов аргона и ионов металла.

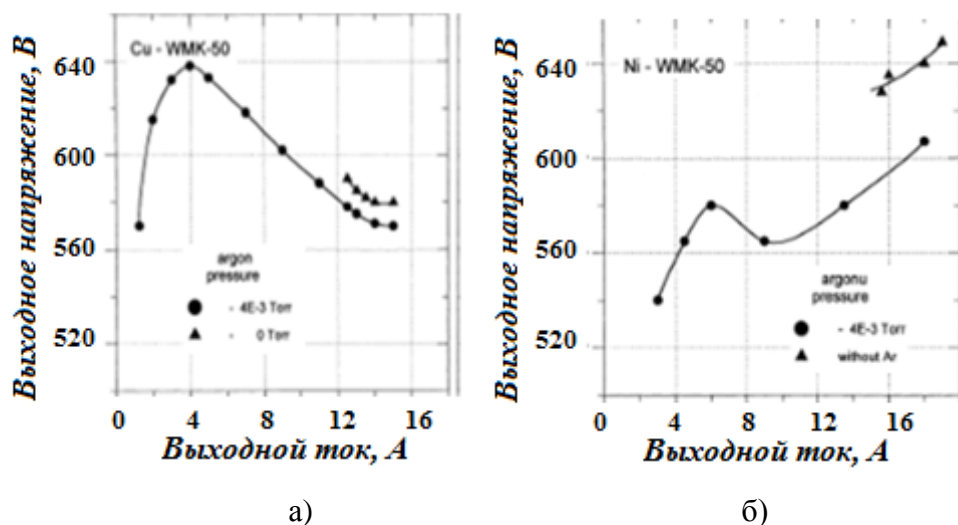


Рисунок 1.10 -Вольтамперная характеристика разряда при распылении и самораспылении медной (а) и никелевой (б) мишеней [23].

Для получения тонких пленок и покрытий сложного состава с использованием простых исходных веществ применяются технологии распыления в среде реакционных газов. В последнее время для этих целей обычно используются импульсные магнетронные разряды.

Импульсные режимы питания магнетронов позволяют снизить тепловые нагрузки на подложку и мишень, за счет увеличения скважности импульсов, а также наносить многокомпонентные покрытия путем поочередного распыления нескольких мишеней, в результате чего получаются покрытия практически однородного состава. Кроме того, в импульсном режиме можно увеличить плотность разрядного тока и повысить степень ионизации распыленного вещества до 40% и выше.

В работе импульсной МРС можно выделить три основных этапа [35-37]:

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

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

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

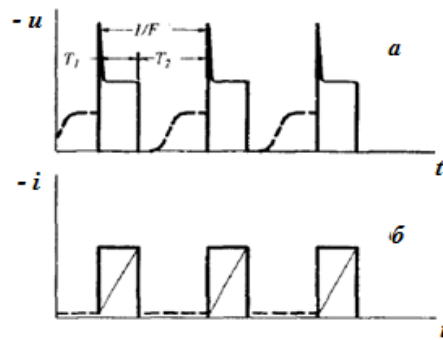


Рисунок 1.11 - Диаграммы униполярных импульсов напряжения (а) и тока (б) МРС с одним магнетроном.

Развитие импульсных МРС в целом соответствует общемировой тенденции все более широкого применения импульсных методов в технологии обработки поверхности, так как эти методы имеют ряд важных преимуществ перед обработкой в стационарных условиях. К импульсным ионно-плазменным методам обращаются всякий раз, как только возникают проблемы при обычной обработке.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

2.1 Вакуумная установка для магнетронного распыления

В эксперименте была использована установка для магнетронного напыления покрытий, собранная на базе безмасляной вакуумной системы. Установка и расположение плазменного оборудования показаны на рис. 2.1 и 2.2.

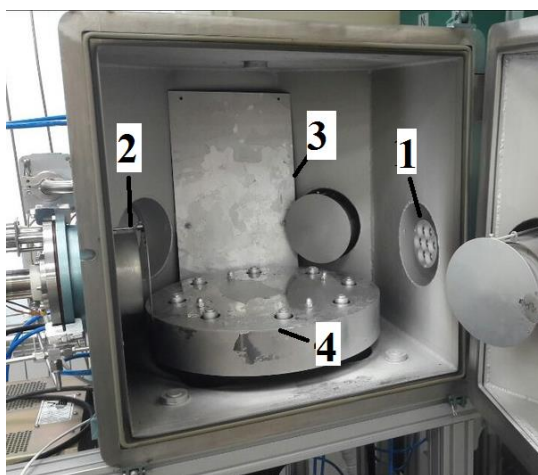


Рисунок 2.1 - Установка магнетронного напыления: 1 – ионный источник; 2 – магнетронный источник; 3 – к турбомолекулярному насосу; 4 – подложкодержатель.



Рисунок 2.2- Общий вид экспериментальной установки.

Безмасляная вакуумная система служит для создания необходимого разрежения в рабочей камере для осуществления процесса плазменной обработки подложек. Остаточное давление в рабочей камере - 3×10^{-3} Па. В вакуумной камере расположены: магнетронный источник (с возможностью установки до 6 МРС в камере одновременно); вращающийся подложкодержатель; ионный источник с замкнутым дрейфом электронов.

Управление работой установки осуществляется в полуавтоматическом режиме. Установка оборудована системой движения подложкодержателя для обеспечения перемещения подложек внутри вакуумной камеры.

2.2 Магнетронная распылительная система и системы электрического питания

В работе была использована несбалансированная дисковая МРС с алюминиевым (99,95%) катодом диаметром 90 мм (рис. 2.3).



Рисунок 2.3– Несбалансированная МРС

В качестве высокоточного источника питания МРС использовался источник питания серия APeI-M-5HiPIMS производства ООО «Прикладная электроника». Комбинированный источник питания был собран на базе вышеупомянутого высокоточного источника питания и среднечастотного источника питания APeL-M-5PDC из этой же серии. Для обеспечения их согласованной работы использовался блок согласования, построенный на базе диодов. Источники питания имеют общий канал связи, по которому осуществляется синхронизация выходных импульсов напряжения. Принципиальная электрическая схема показана на рис. 2.4. Для стабильной работы и предотвращения выхода среднечастотного источника питания в режим подавления дуги после высокоточного импульса принудительно формировалась задержка с заданной длительностью от 10 до 100 мкс.

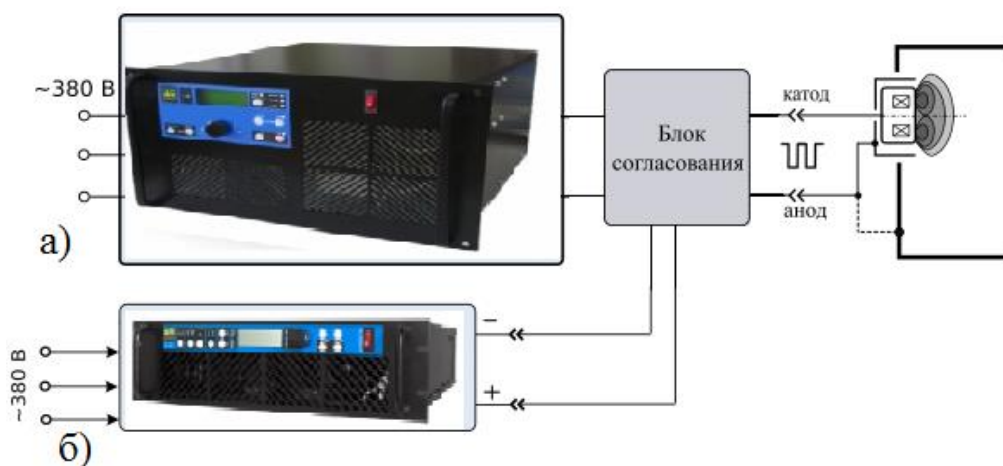


Рисунок 2.4 -Схема комбинированной системы электропитания: (а) высоковольтный ИП серии APEL-M-5HIPIMS; (б) среднечастотный ИП серии APEL-M-5PDC.

Ниже приведены характеристики источников питания, на базе которых был собран комбинированный источник питания:

1) Среднечастотный источник питания APEL-M-5PDC:

- рабочие параметры импульса: 1...100 кГц,
- коэффициент заполнения импульсов от 10 до 80%;
- средний ток в импульсе - не превышает 10 А;
- средняя мощность не более 5 кВт.

2) Высоковольтный источник питания APEL-M-5HIPIMS:

- формируют униполярные импульсы тока (до 1 кА);
- частоты следования импульсов 0,1...15 кГц;
- длительность импульса 1...250 мкс;
- малый коэффициент заполнения импульсов – до 25% (при средней мощности источника питания в 2-5 кВт импульсная мощность может достигать сотен кВт);

2.3 Система измерений напряжения и тока разряда

Для измерения и контроля выходных параметров была собрана система измерения тока и напряжения разряда на базе осциллографа TDS2022B (рис. 2.5). Для контроля напряжения разряда был использован щуп HP9258 (100х) с делителем напряжения (коэффициент деления - 4). Для измерения тока разряда был использован промышленный датчик тока LEM LT 200-S/SP 48 с коэффициентом преобразования 1:2000 (измерения проводились в диапазоне ±300 А).

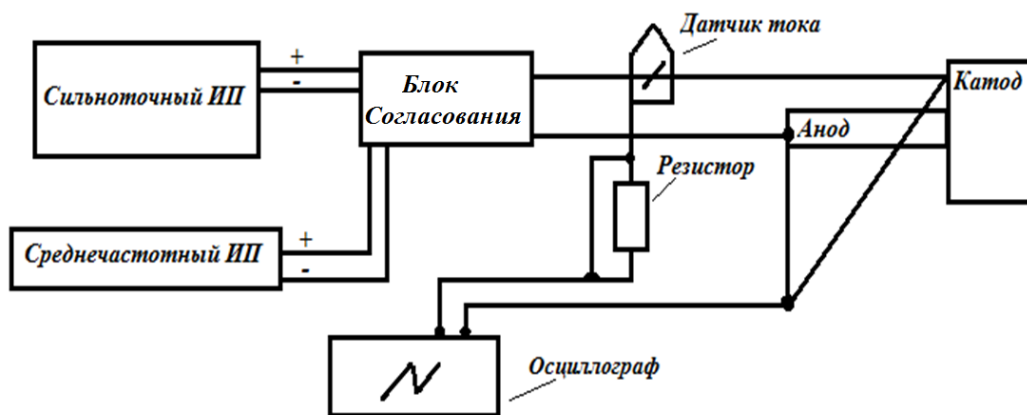


Рисунок 2.5 - Схема системы измерения тока и напряжения разряда.

2.4 Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов

Ионный источник APEL-IS-7 CELL с замкнутым дрейфом электронов (рис. 2.6) использовался для очистки поверхности подложки непосредственно перед осаждением тонкопленочных структур. Главная особенность такого рода устройств заключается в близости рабочих давлений с областью работы магнетронных источников плазмы и наличии электронной ловушки для формирования разряда плазмы. Образование «ловушки» для электронов, аналогично MPC, происходит за счет наличия скрещенных электрического и магнитного полей.

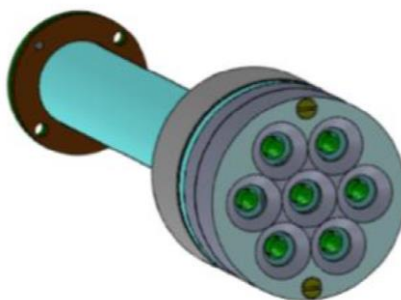


Рисунок 2.6 – Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов APEL-IS-7CELL.

При подаче положительного потенциала на анод, возникает разряд между электродами, катод имеет отрицательный потенциал. Ионы газа ускоряются в межэлектродном промежутке, образуя ионный поток на подложку. Характерные энергии ускоренных ионов находятся в диапазоне 0,3-3 кэВ, а плотность ионного тока на подложку может достигать $0,5 \text{ мкА/см}^2$. В качестве источника питания ионного тока использовался источник постоянного тока со следующими рабочими характеристиками:
 -максимальное ускоряющее напряжение - 3 кВ;

-максимальный ток - 1А;

-максимальная мощность - 3 кВт.

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

2.5 Система Калотест (Calotest CAT-S-0000)

Прибор для измерения толщины пленок и покрытий (Calotest CAT-S-0000) предназначен для измерения толщины металлических, диэлектрических, полимерных пленок, в том числе и многослойных в диапазоне 0,1-50 микрон. Могут быть исследованы образцы с плоской, цилиндрической и сферической поверхностью.

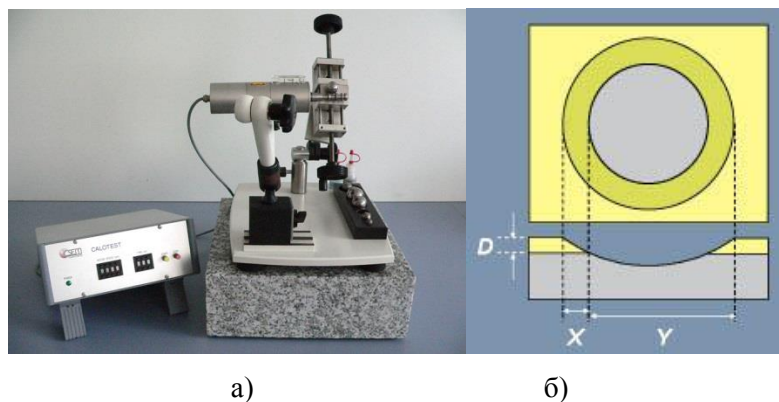


Рисунок 2.7– (а) Прибор для измерения толщины пленок и покрытий (Calotest CAT-S-0000). (б) изображение сферического отпечатка.

Принцип измерения толщины следующий:

1. Необходимо подготовить сферический шлиф на покрытии. Валик с электроприводом, предназначенным для вращения шара, удерживается регулируемым рычагом, обеспечивающим большое количество вариантов размещения шара относительно образца. Вращающийся шар с известным диаметром прижимается к поверхности образца при помощи выбранной нагрузки. Положение шара относительно образца и контактная нагрузка являются постоянными. Добавления абразивной пасты к контактному участку обеспечивает быстрое формирование на поверхности образца сферического отпечатка.

2. При помощи микроскопа рассчитываются размеры шлифа, и производится расчёт толщины покрытия. Расчет толщины плёнки методом сферического шлифа реализуется простыми формулами. Если «S» толщина покрытий, то его можно рассчитать формулой ниже:

$$S = T - t, \quad (11)$$

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

$$T = R - \left(\frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - D^2} \right) \quad (12)$$

$$t = R - \left(\frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - d^2} \right) \quad (13)$$

Тогда уравнение (11) примет вид:

$$S = \frac{1}{2} (\sqrt{4R^2 - d^2} - \sqrt{4R^2 - D^2}) \quad (14)$$

Если $d \ll R$, то

$$S = \frac{X \times Y}{2R}. \quad (15)$$

Схема для расчета толщины покрытий по модели шар – плоскость показана на рис.2.8.

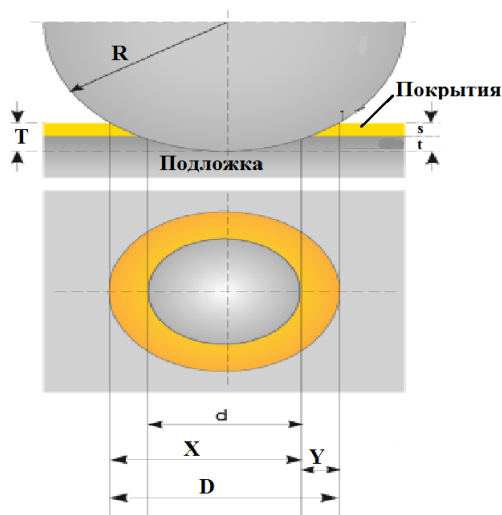


Рисунок 2.8 – Схема расчета толщины покрытий по модели шар – плоскость.

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

4.1 Предпроектный анализ

Алюминиевая покрытия представляют собой нано размерную тонкопленочную структуру, полученную с использованием магнетронной распылительной системы (МРС) с комбинированном источникам. Основное преимущество такого метода нанесения пленок является включение двух механизмов эрозии катода – распыление и самораспыление. Преимущества данного метода, во-первых среднечастотный источник создает предварительную ионизацию для сильноточного источника питания.

Физическими причинами, которые обеспечивают преимущество HiPIMS перед методами классического магнетронного распыления, являются; участие ионизированных распыленных атомов в самораспылении мишени, более низкая зависимость коэффициента распыления от увеличения энергии ионов, изменение коэффициента распыления в связи с изменением видов частиц, участвующих в процессе распыления, увеличение плотности упаковки атомов пленки; самораспыление на подложке и изменения условий удержания заряженных частиц вблизи мишени при большом токе.

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Данная методика нанесение пленок в первую очередь интересно для промышленного применения так, как энергоэффективность и производительность МРС всегда были актуальны для них.

В России этот производственный сегмент практически не развит, в то время как спрос на такой товар находится на достаточном уровне. Поэтому на рынке превалирует продукция зарубежных производителей, что делает перспективным направление по созданию недорогой конкурентной технологии осаждения тонкий хорошо отражавший покрытий и внедрению ее в России.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить каковы будут дальнейшее усовершенствование и направленность для ее будущего повышения параметров и характеристик.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, пример которой приведен в таблице 4.1. Для этого необходимо отобрать не менее трех-четырех конкурентных товаров и разработок.

Таблица 4.1. Оценочная карта.

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. Длительность процессов напыление	0,2	5	2	4	1	0,4	0,8
2. Источники питания	0,05	5	3	4	0,2	0,15	0,2
3. Энергоэкономичность	0,05	4	2	3	0,2	0,1	0,15
4. Надежность	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
5. Безопасность	0,05	5	1	1	0,25	0,05	0,05
6. Потребность в расходных материалах	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
7. Простота эксплуатации	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	2	2	0,5	0,2	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	4	3	3	0,2	0,15	0,15
3. Цена	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
5. Послепродажное обслуживание	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Финансирование научной разработки	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
7. Срок выхода на рынок	0,05	5	3	2	0,25	0,15	0,1
Итого	1	66	43	45	4,7	2,85	3,25

К1 – первый конкурент, МРС жидко фазном мишенью.

К2 – второй конкурент, это установки МИС.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным

путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Формула анализа конкурентных технических решений (1).

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (28)$$

Где: K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Основываясь на информации о конкурентах, следует объяснить: чем выражена слабость позиции и возможно найти свою нишу и увеличить определенную долю рынка; и в чём преимущество разработки.

В конце такого анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка собственных преимуществ перед конкурентами, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, отличающихся либо высоким уровнем качества при обычном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

4.1.3. SWOT-анализ

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

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в табличной форме (таблица 4.1).

Таблица 4.2 Результаты первого этапа SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Технология более энергоэффективна при ее реализации</p> <p>С2. Не требует создание новых установок, т.е. менее затратная</p> <p>С3. Более низкая стоимость</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Нестабильность параметров источника может принести к трудностям при проведении эксперимента</p> <p>Сл2. Использование для катода только сублимирующий материала</p>
--	---	---

	<p>производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Сл3. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования</p> <p>Сл4. Возможность появления трещин на поверхности мишени</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Развитая конкуренция технологий производства</p> <p>У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства</p>		

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. В рамках данного этапа строится интерактивная матрица проекта (таблица 4.3). Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Каждый фактор помечаем либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 4.3 Интерактивная матрица проекта

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

Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл.1	Сл.2	Сл.3	Сл.4
	В1	-	-	+	-
	В2	-	+	0	+
	В3	-	0	-	+

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		С1	С2	С3	С4	С5
	У1	0	+	+	-	0
	У2	-	0	0	0	-

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

В рамках третьего этапа составлена итоговая матрица SWOT-анализа (таблица 4.4).

Таблица 4.4 Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Технология более энергоэффективна при ее реализации</p> <p>С2. Не требует создание новых установок, т.е. менее затратная</p> <p>С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Нестабильность параметров источника может принести к трудностям при проведении эксперимента</p> <p>Сл2. Использование для катода только сублимирующий материала</p> <p>Сл3. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования</p> <p>Сл4. Возможность появления трещин на поверхности мишени</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>	<p>При использовании инновационной инфраструктуры ТПУ упрощается проведения процессов модифицирования хромовых пленок, с помощью магнетронной распылительной системы. При реализации данной технологии может повыситься стоимость конкурентных разработок, т.е. технология более</p>	<p>Появление спроса на новый продукт может быть увеличен за счет ее технологических возможностей.</p> <p>Для проведения научного исследования используются различные комплектующие и материалы, что возможно при использовании инновационной инфраструктуры ТПУ.</p>

	энергоэффективна и менее затратная.	
Угрозы: У1. Развитая конкуренция технологий производства У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	На сегодняшний день существует широкий спектр различных методов модифицирования нового материала, производство могут возникнуть проблемы с спросом на рынке данной технологии.	Отсутствие спроса на новые технологии, могут ограничить поступление финансовых средств.

4.2. Оценка готовности проекта к коммерциализации

Таблица 4.5 Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации.

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

	коммерциализации научной разработки.		
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки.	3	3
15.	Проработан механизм реализации научного проекта.	4	4
	ИТОГО БАЛЛОВ	65	63

Суммарная оценка степени проработанности научного проекта составляет 65 баллов, а уровня имеющихся знаний у разработчика 63 балла. Данные оценки является показателем того, что такая разработка считается перспективной, а знания разработчика достаточными для успешной коммерциализации научного проекта.

4.3. Методы коммерциализации результатов научно-технического следования

При коммерциализации научно-технических разработок продавец (а это, как правило, владелец соответствующих объектов интеллектуальной собственности), преследует вполне определенную цель, которая во многом зависит от того, куда в последующем он намерен направить (использовать, вложить) полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств для продолжения своих научных исследований и разработок (получение финансирования, оборудования, уникальных материалов, других научно-технических разработок и т.д.), одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или для накопления, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания.

При этом время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Задача данного раздела магистерской диссертации – это выбор метода коммерциализации объекта исследования и обоснование его целесообразности. Для того чтобы это сделать необходимо ориентироваться в возможных вариантах.

Выделяют следующие методы коммерциализации научных разработок.

1. *Торговля патентными лицензиями*, т.е. передача третьим лицам права использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе. При этом в патентном законодательстве выделяющие виды лицензий: исключительные (простые), исключительные, полные лицензии, сублицензии, опционы.

2. *Передача ноу-хау*, т.е. предоставление владельцем ноу-хау возможности его использовать другим лицом, осуществляемое путем раскрытия ноу-хау.

3. *Инжиниринг* как самостоятельный вид коммерческих операций предполагает, предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом. Другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика, усовершенствованием имеющихся производственных процессов вплоть до внедрения изделия в производство и даже сбыта продукции.

4. *Франчайзинг*, т.е. передача или переуступка (на коммерческих условиях) разрешения продавать чьи-либо товары или оказывать услуги в некоторых областях.

5. *Организация собственного предприятия.*

6. *Передача интеллектуальной собственности* в уставной капитал предприятия.

7. *Организация совместного предприятия*, т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия.

8. *Организация совместных предприятий*, работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».

Перспективность данного научного исследования выше среднего, поэтому не все аспекты рассмотрены и изучены. Таким образом, для организации предприятия этого не достаточно (пункт 4 – 8 не подходят). Но так как основной научно-технический задел определен, этого достаточно для коммерциализации для следующих методов (пункты 1 - 3): Торговля патентной лицензией; передача ноу-хау и инжиниринг. Степени проработанности научного проекта и уровень знаний разработчика достаточно для реализации пунктов, которые были выбраны.

4.4. Инициация проекта

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

Таблица 4.6. Заинтересованные стороны проекта.

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
1. Опытное производство ФТИ НИТПУ.	Новые заказы на изготовление нестандартных деталей.

2. Молодые сотрудники и студенты.	Получение квалифицированного опыта.
3. Поставщики комплектующих.	Новые заказы на материалы и оборудование.
4. Сотрудники организации.	Привлечение новых средств, развитие организации путём решения нестандартных задач.
5. Потребители	Улучшение характеристик и увеличения срока службы изделий

В таблице 4.7 представлена информация об иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Таблица 4.7 Цели и результаты проекта.

Цели проекта:	Проведение экспериментов по процессам характеристика алюминиевая пленок с комбинированным источникам.
Ожидаемые результаты проекта:	Создание источника питания с достаточными параметрами для работ увеличение скорости. Повышение срока эксплуатации деталей, экономия ресурсов, сокращения ремонтных мероприятий в связи с выходом из строя деталей.
Критерии приёмки результата проекта:	Уменьшение себестоимости продукции в связи с внедрением технологий распыление поверхностей, увеличение срока службы деталей.
Требования к результату проекта:	Требование: Надежность, качество, цена.
	Высокая скорость обработки изделий.
	Востребованность на рынке
	Длительный срок эксплуатации

На этапе организационной структуры работы проекта решались следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эту информацию представить в табличной форме (табл.4.8)

Таблица 4.8 Организационная структура проекта.

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
1	Сидёлев Д.В	Руководитель	Ответственен за	1712

		проекта	реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта.	
2	Токжанов Б.А.	Заказчик проекта	Контроль расходов, финансирование.	-
3	Спатаев К.А.	Магистрант	Исполнитель проекта.	1292
ИТОГО:				3004

В данном разделе были выделены заинтересованные в проекте предприятия, установлены цели и ожидаемые результаты. Была определена рабочая группа проекта, что в дальнейшем необходимо для расчета бюджета.

4.4.1. Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта

Таблица 4.9. Ограничения проекта.

Фактор	Ограничения/допущения
3.1. Бюджет проекта	374658,27
3.1.1. Источник финансирования	Предоплата заказчика
3.2. Сроки проекта:	
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	15 июня 2016г.
3.2.2. Дата завершения проекта	31 января 2017 г.

4.5. Планирование управления научно-техническим проектом

4.5.1. План проекта

В рамках планирования научного проекта построен календарный и сетевой график проекта. Линейный график представлен в виде таблицы 4.10.

Таблица 4.10 Календарный план проекта

Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
----------	-------------------	-------------------	----------------------	-------------------

Изучение литературы, составление литературного обзора	36	10.01	28.02	Спатаев Казкел Айтбекулы
Расчет на математической модели	21	03.03	24.03	Спатаев Казкел Айтбекулы
Обсуждение полученных результатов	14	27.03	10.04	Сиделёв Дмитрий Владимирович Спатаев Казкел Айтбекулы
Оформление выводов	14	13.04	27.04	Спатаев Казкел Айтбекулы
Оформление пояснительной записки	21	10.05	31.05	Спатаев Казкел Айтбекулы
Итого:	106	10.01	31.05	

Диаграмма Ганта - это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График построен и представлен в виде таблицы 4.11, с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта.

Вид работ	Исполнители	Т _к , кал ,дн.	Продолжительность выполнения работ														
			январь			февраль			март			апрель			май		
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Изучение литературы, составление литературного обзора	Магистрант	36	■														
Расчет на математической модели	Магистрант	20						■									
Обсуждение полученных результатов	Магистрант, руководитель	10									■						
Оформление выводов	Магистрант	13											■				
Оформление пояснительной записки	Магистрант	19													■		



- руководитель НИР,



- магистрант.

4.6. Бюджет научного исследования

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

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

Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

Расчет стоимости материальных затрат производился по действующим прейскурантам (Таблица 4). В стоимость материальных затрат включены транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 4.12 Сырье и материалы

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

Специальное оборудование для научных работ

В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения экспериментальных работ. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам и по договорным ценам (Таблица 4.13).

Таблица 4.13 Расчет затрат по статье «Специальное оборудование для научных работ»

№	Наименование оборудования	Кол-	Цена за ед. оборудования,	Общая стоимость,
---	---------------------------	------	---------------------------	------------------

		во	тыс. руб.	тыс. руб.
1	Ионный источник APEL-IS-7CELL	1	100 000	100 000
	Всего за оборудование			100 000
	Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)			5 000
Итого по статье				1050

4.6.1. Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы. Баланс рабочего времени и расчет основной заработной платы представлены в Таблице 4.14 и 4.15, соответственно.

Таблица 4.14 Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	114	114
Количество нерабочих дней	17	17
Действительный годовой фонд рабочего времени	97	97

Месячный должностной оклад работника (Z_m) равен:

$$Z_m = (Z_b + Z_b * (k_{np} + k_d)) * k_p, \quad (29)$$

который в свою очередь складывается из базового оклада (Z_b , руб.) и различных коэффициентов:

k_{np} – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

k_d – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска). В ТПУ система премирования и начисления доплат и надбавок работает при выполнении договорного плана. По результатам нашего исследования премирования предусмотрено не было.

Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 рабочих дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 рабочих дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно- технического персонала, рабочих дней (таблица 4.6).

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} * T_{раб} \quad (30)$$

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

$T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, рабочие дни;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, рассчитываемая по формуле 10, руб.

Таблица 4.15. Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_b , руб.	$K_{пр}$	K_d	K_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	25 923,1	-	-	1,3	33 700	1 528,1	97	148 255,7
Дипломник	2275	-	-				97	11375

4.6.2 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы (Таблица 4.15). Таким образом, сумма основной заработной платы участников проекта и дополнительной будет составлять статью затрат расходов на зарплату:

$$C_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (31)$$

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

$$Z_{доп} = k_{доп} * Z_{осн} \quad (32)$$

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

Таблица 16 Зарплата исполнителей НТИ

Исполнители	Руководитель	Дипломник
Основная зарплата, руб.	148 255,7	11375
Дополнительная зарплата, руб.	22 238,36	
Зарплата исполнителя, руб.	170 494,06	11375
Итого по статье $C_{зн}$, руб.	181869,06	

4.6.3. Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды и рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{внебруководитель}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (33)$$

Таблица 4.17 Отчисления на социальные нужды

	Руководитель	Дипломник
Зарплата	148255,7	11375
Отчисления на социальные нужды	44476,71	3412,5

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 30% (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и фонд социального страхования).

Таблица 4.18. Бюджет научного исследования

Статья расходов	Сумма, руб.
Сырье, материалы	39 900
Зарплата	181869,06
Отчисления на социальные нужды	47889,21
Специальное оборудование	105 000
Итого	374658,27

Общий бюджет, включая все вышеперечисленные статьи расходов, составил 374658,27 руб.

4.6.4. Организационная структура проекта

Таблица 4.19 Выбор организационной структуры научного проекта

Критерии выбора	Функциональная	Матричная	Проектная
Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от	Высокая	Средняя	Низкая

организаций более высокого уровня			
--	--	--	--

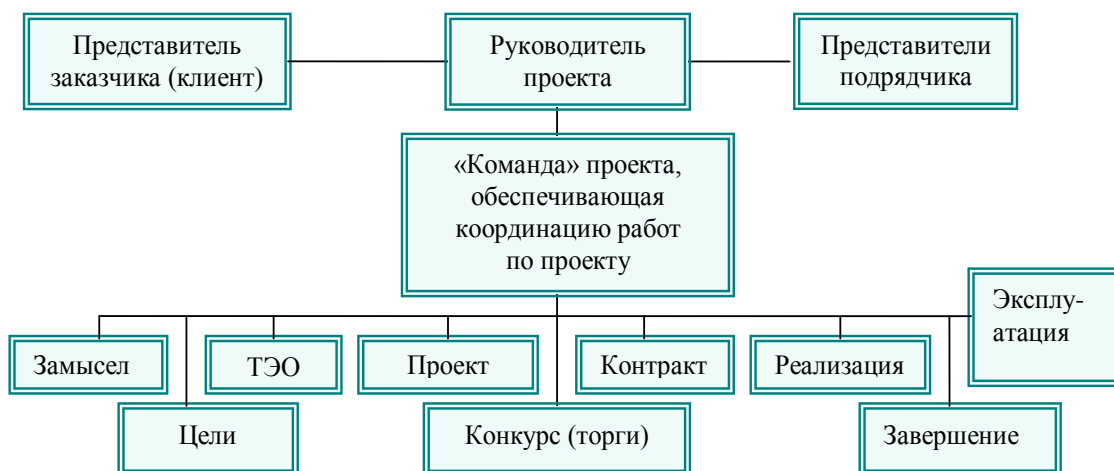


Рисунок 4.1 - Проектная структура проекта

Вывод: на основе проведенного анализа выбора организационной структуры научного проекта, было выявлено, что наиболее выгодной является проектная структура.

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

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты, и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения.

Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

4.7.1. Динамические методы экономической оценки инвестиций

Динамические методы оценки инвестиций базируются на применении показателей:

- чистая текущая стоимость (**NPV**);
- срок окупаемости (**DPP**);
- внутренняя ставка доходности (**IRR**);
- индекс доходности (**PI**).

Все перечисленные показатели основываются на сопоставлении чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности, и их приведении к определенному моменту времени. Теоретически чистые денежные поступления можно приводить к любому моменту времени (к будущему либо текущему периоду). Но для практических целей оценку инвестиции удобнее осуществлять на момент принятия решений об инвестировании средств.

4.7.2. Чистая текущая стоимость (NPV)

Данный метод основан на сопоставлении дисконтированных чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности.

Если инвестиции носят разовый характер, то **NPV** определяется по формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+i)^t} - I_0 \quad (34)$$

где $ЧДП_{опt}$ – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета ($t=0, 1, 2 \dots n$);

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Чистая текущая стоимость является абсолютным показателем. Условием экономичности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение следующего неравенства: **NPV** > 0.

Чем больше **NPV**, тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.

Таким образом, инвестиционный проект считается выгодным, если **NPV** является положительной.

Таблица 4.18 Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Выручка от реализации, тыс.руб	0	449,58	449,58	449,58	449,58
2.	Итого приток	0	449,58	449,58	449,58	449,58
3.	Инвестиционные издержки, тыс.руб.	-374,65	0	0	0	0
4.	Операционные затраты, тыс. руб С+Ам+ФОТ	0	58,06	58,06	58,06	58,06
	Налогооб прибыль=1-4		391,52	391,52	391,52	391,52
5.	Налоги Выр-опер=донал.приб*20%	0	78,3	78,3	78,3	78,3
6.	Итого отток Опер.затр+налоги	-374,65	136,36	136,36	136,36	136,36
7.	Чистый денежный поток ЧДП=Пчист+Ам Пчист=Пдонал.-налог	-374,65	238,3	238,3	238,3	238,3
8.	Коэффициент дисконтирования (приведения при $i = 0,20$)	1,0	0,833	0,694	0,578	0,482
9.	Дисконтированный чистый денежный поток ($c7*c8$)	-374,65	198,5	165,38	137,7	114,8
10.	То же нарастающим итогом (NPV =241,73)	-374,65	-176,15	-10,77	126,93	241,73

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 241,73д. ед., что позволяет судить о его эффективности.

4.7.3. Дисконтированный срок окупаемости

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости.

Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (см. табл. 4.19).

Таблица 4.19 Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Дисконтированный чистый денежный поток ($i=0,20$)	-374,65	198,5	165,38	137,7	114,8
2.	То же нарастающим итогом	-374,65	-176,15	-10,77	126,93	241,73
3.	Дисконтированный срок окупаемости	$PP_{диск} = 2 + 10,77/137,7 = 2,07$ года				

4.7.4. Внутренняя ставка доходности (IRR)

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому, чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности инвестиций на практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR).

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования

(i) существует обратная зависимость. Эта зависимость следует из таблицы 4.20 и графика, представленного на рисунке 2.

Таблица 4.20 Зависимость **NPV** от ставки дисконтирования

№ п/п	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV
1	Чистые денежные потоки	-374,65	238,3	238,3	238,3	238,3	
2	коэффициент дисконтирования						
	$i=0,1$	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	$i=0,2$	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	$i=0,4$	1	0,714	0,51	0,364	0,26	
	$i=0,5$	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	$i=0,6$	1	0,625	0,390	0,244	0,095	
	$i=0,7$	1	0,588	0,335	0,203	0,070	
3	Дисконтированный денежный поток						
	$i=0,1$	--374,65	216,6147	196,8358	178,9633	162,7589	380,5227
	$i=0,2$	--374,65	198,5039	165,3802	137,7374	114,8606	241,8321
	$i=0,4$	--374,65	170,1462	121,533	86,7412	61,958	65,7284
	$i=0,5$	--374,65	158,9461	105,8052	70,2985	47,1834	7,5832

	i=0,6	--374,65	148,9375	92,937	58,1452	22,6385	-51,9918
	i=0,7	--374,65	140,1204	79,8305	48,3749	16,681	-89,6432

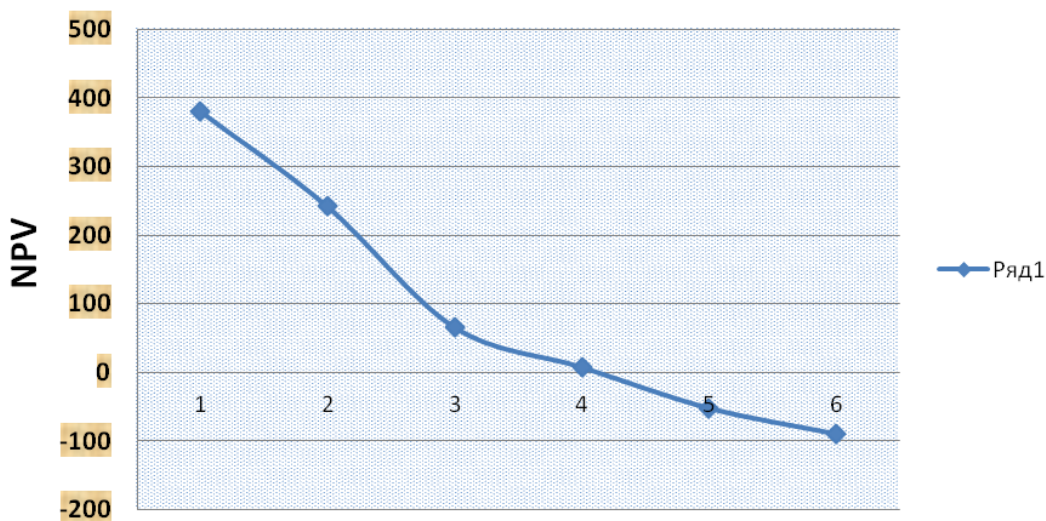


Рисунок 4.2 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,4.

4.8. Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (PI)

Индекс доходности показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций.

Расчет этого показателя осуществляется по формуле

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧПД_t}{(1+i)^t} / I_0, \quad (35)$$

где I_0 – первоначальные инвестиции.

$PI=1,65 > 1$, следовательно, проект эффективен при $i=0,2$; $NPV=241,7$

4.8.1. Оценка сравнительной эффективности исследования

Таблица 4.21 – Группировка затрат по статьям аналогов разработки

Вариант исполнения	Сырье, материалы (за вычетом)	Специальное оборудование для научных	Основная заработная плата	Отчисления на социальные	Итого плановая себестоим

аналога №	возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	(экспериментальных) работ		нужды	ость
1	50000	200000	240000	72000	562000
2	100000	300000	364000	109200	873200

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

где I_{ϕ}^p - интегральный финансовый показатель разработки;

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

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

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p \quad (36)$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов; a_i – весовой коэффициент i-го параметра;

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

n – число параметров сравнения.

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

Таблица 4.22 Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	5	4	4

2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	4	4	4
3. Помехоустойчивость	0,15	4	4	3
4. Энергосбережение	0,20	4	4	3
5. Надежность	0,25	5	4	4
6. Материалоемкость	0,15	4	3	3
ИТОГО	1	4,3	3,8	3,5

$$I_m^P = 5 * 0.1 + 4 * 0.15 + 4 * 0.15 + 4 * 0.20 + 5 * 0.25 + 4 * 0.15 = 4.35$$

$$I_1^A = 4 * 0.1 + 4 * 0.15 + 4 * 0.15 + 4 * 0.20 + 4 * 0.25 + 3 * 0.15 = 3.85$$

$$I_1^A = 4 * 0.1 + 4 * 0.15 + 3 * 0.15 + 3 * 0.20 + 4 * 0.25 + 3 * 0.15 = 3.5$$

Таблица 4.23 Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,42	1	0,64
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,85	3,5	4,35
3	Интегральный показатель эффективности	10,35	6,01	3,5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,72		2,95

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В ходе проведения анализа показателей эффективности инвестиций была получена чистая текущая стоимость (NPV) – 241,73 тыс. руб. Таким образом, данный инвестиционный проект можно считать выгодным, NPV является положительной величиной. Дисконтированный срок окупаемости проекта (**PP_{дск}**) составляет 2,07 года.

Внутренняя ставка доходности (IRR) – 0,4 что позволяет признать инвестиционный проект экономически оправданным, так как выполняется условие неравенства $IRR > i$. Индекс доходности (PI) – 1,65и, основываясь на том, что данная величина превышает единицу, можно утверждать, что данная инвестиция приемлема.

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Термин «Социальная ответственность» можно понять как ответственность отдельного ученого и научного сообщества перед обществом [61]. Данное понятие подразумевает безопасность применения технологий, которые созданы на основе достижений науки, а также минимализация или предотвращение возможных негативных последствий при их применении. Она должна обеспечивать безопасность испытуемых людей, окружающей среды и населения при проведении исследований.

Для обеспечения безопасности, сохранения жизни и здоровья работающих граждан Российской Федерации, установлены основные принципы федерационной политики в области безопасности и охраны труда.

Охрана труда – это система обеспечивающая безопасность, сохранение работоспособности и здоровья работника в процессе трудовой деятельности, которая включает в себя законодательные, социально-экономические, организационные, технологические, гигиенические и лечебно-профилактические мероприятия и средства [62].

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

Условия труда это совокупность факторов производственной среды и трудового процесса, оказывающие влияние на работоспособность и здоровье работника [62].

В процессе трудовой деятельности работник подвергается опасностям, негативно действующих на жизнедеятельность человека. Такие вредители называются вредные и опасные факторы.

Опасный производственный фактор - это производственный фактор, воздействия которого приводят к внезапному, резкому ухудшению здоровья или травме работника.

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

5.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов

В таблице 5.1 приведены основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Кафедра экспериментальной физики ФТИ Осаждение пленок алюминия с помощью МРС НИТПУ «Лаборатория №23»	1. Отклонение показателей микроклимата в помещении 2. Превышение уровней шума 3. Превышение уровней вибрации 4. Превышение уровней электромагнитных излучений 6. Недостаточная освещенность рабочей зоны	1. Электрический ток 2. пожарная опасность 3 вероятность взрыва	1. ГОСТ 12.0.003-74 [61] 2.ГОСТ 12.1.002-84 [62] 3.ГОСТ12.1.003-83[63] 4. <u>ГОСТ Р МЭК 61140</u> [64] 5.ГОСТ Р 12.1.019-2009[65] 6.ГОСТ12.0.004-2015[66] 7.СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96[67] 8.СанПиН2.2.4.548-96[68]

В ходе работы на студента воздействуют физические факторы: повышенные уровни шума и вибрации, электромагнитные и ионизирующие излучения, недостаточная освещенность, повышенный уровень статического электричества и др.

К психофизиологическим факторам относятся физические и нервно психические перегрузки (умственное перенапряжение, перенапряжение анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

5.2. Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их при работе на ПЭВМ и вакуумном установке

5.2.1. Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается

соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальное удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

5.2.2 Технические мероприятия

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 (рис. 5.1).

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне «а» (в центре); клавиатура в зоне «г»/«д»; системный блок размещается в зоне «б» (слева); принтер находится в зоне «а» (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони «в» (слева) - литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола - литература, не используемая постоянно.

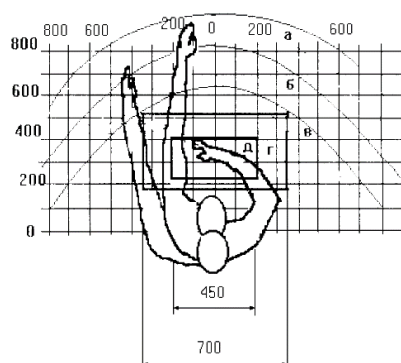


Рисунок 5.1 - Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а - зона максимальной досягаемости рук; б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в - зона легкой досягаемости ладони; г - оптимальное пространство для грубой ручной работы; д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500

мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм.

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

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

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

5.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

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. Оптимальные и допустимые параметры микроклимата представлены в таблице 5.2.

Неблагоприятные условия могут вызывать перенапряжение механизма терморегуляции, что ведет к перегреву или переохлаждению организма. Высокая температура приводит к быстрой утомляемости работника, может привести к перегреву организма, тепловому удару. А низкая температура может вызвать местное или общее охлаждение организма, и привести к простудному заболеванию либо обморожению. Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи. Низкая влажность вызывает неприятные ощущения в виде сухости слизистых оболочек дыхательных путей работающего.

Вычислительная техника является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещении. В помещениях, где установлены компьютеры, должны соблюдаться определенные параметры микроклимата. В санитарных нормах СН-245-71 установлены величины параметров микроклимата, создающие комфортные условия. Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения[63].

Таблица 5.2 - Оптимальные и допустимые параметры микроклимата.

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Параметр микроклимата	Величина
Холодный	Iб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	21-23°C 40-60% до 0,1м/с
Теплый	Iб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	22-24°C 40-60% 0,1-0,2м/с

Научно-исследовательская работа выполнялась с помощью персональных компьютеров. При этом основным вредным фактором для инженера-исследователя является электромагнитное излучение, которое влияет на костные ткани, ухудшает зрение,

повышает утомляемость, а также может вызвать ослабление памяти и возникновение онкологических заболеваний.

Таблица 5.3 - Временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах.

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Безопасные уровни излучений регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 и представлены в таблице 5.3. Для того, чтобы снизить вредное влияние электромагнитного излучения при работе с ПК необходимо соблюдать следующие общие гигиенические требования:

1. Продолжительность непрерывной работы взрослого пользователя не должны превышать 2 часов в зависимости от возраста. В процессе работы желательно менять тип и содержание деятельности, например, чередовать редактирование и ввод данных и их считывание. Санитарными нормами предусматриваются обязательные перерывы в работе на ПК, во время которых рекомендуется делать простейшие упражнения для глаз, рук и опорно-двигательного аппарата.

2. Рабочее место с ПК должно располагаться по отношению к оконным проемам так, чтобы свет падал сбоку, предпочтительнее слева. При наличии нескольких компьютеров расстояние между экраном одного монитора и задней стенкой другого должно быть не менее 2 м, а расстояние между боковыми стенками соседних мониторов – 1,2 м. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 60÷70 см, но не ближе 50 см

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [64] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц - 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц - 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц - 250нТл;

- в диапазоне частот 2кГц-400кГц - 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);

- применение при экранных фильтрах, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50мкР/час. По нормам [65] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Шум – совокупность аperiodических звуков различной интенсивности и частоты. С физиологической точки зрения шум – это всякий неблагоприятный воспринимаемый звук [6]. Шум ухудшает условия труда оказывая вредное действие на организм человека. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Такие нарушения в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека вплоть до стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация.

Шум от установки

Уровень шума на рабочем месте инженеров, работающих с компьютером не должен превышать 50дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах - 65дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами. Уровень вибрации в помещениях вычислительных центров (ВЦ) может быть снижен путем установки оборудования на специальные виброизоляторы [67].

Важное место в комплексе мероприятий по созданию условий труда, работающих с ПЭВМ, занимает создание оптимальной световой среды, т.е. рациональная организация естественного и искусственного освещения помещения и рабочих мест.

Правильно спроектированное и выполненное производственное освещение улучшает условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует повышению производительности труда, благотворно влияет на производственную среду, оказывая положительное психологическое воздействие на работающего, повышает безопасность труда и снижает травматизм.

Недостаточность освещения приводит к напряжению зрения, ослабляет внимание, приводит к наступлению преждевременной утомленности. Чрезмерно яркое освещение вызывает ослепление, раздражение и резь в глазах. Неправильное направление света на рабочем месте может создавать резкие тени, блики, дезориентировать работающего.

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры:

- при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300лк, а комбинированная - 750лк; аналогичные;
- при выполнении работ средней точности - 200 и 300лк соответственно.

Кроме того, все поле зрения должно быть освещено достаточно равномерно – это основное гигиеническое требование. Иными словами, степень освещения помещения и яркость экрана компьютера должны быть примерно одинаковыми, т.к. яркий свет в районе периферийного зрения значительно увеличивает напряженность глаз и, как следствие, приводит к их быстрой утомляемости.

5.4 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электроустановками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);

- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Прохождение электрического тока через тело человека оказывает комплексное воздействие: термическое (нагрев), электролитическое и биологическое. Все это может привести к серьезным нарушениям в организме или смерти согласно данным из [67].

Наиболее часто встречаются две электротравмы: электрический удар и электрический ожог. Ожог также может возникнуть при нахождении пострадавшего вблизи места короткого замыкания, если оно сопровождается электрической дугой.

Ток, проходя через тело пострадавшего, вызывает биологическое действие, обычно поражая при этом сердечно-сосудистую и нервную системы.

Возникает судорожное сокращение мышц, которое «приковывает» пострадавшего к источнику тока. «Приковывающий» эффект делает невозможным самостоятельное освобождение от источника тока, что значительно увеличивает время его действия и отягощает травму. Поражение нервной и сердечно-сосудистой системы приводит к остановке дыхания и сердца или к нарушению ритма их работы. Для спасения пострадавшего необходимо как можно быстрее освободить его от действия электрического тока, а затем оказать ему первую медицинскую помощь.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- защитное заземление всех металлических нетоковедущих частей электрооборудования $R_3 \leq 4$ Ом;
- раздельное размещение аппаратуры с напряжением до 1000 В и свыше 1000 В;
- ограждение электронного источника, исключающее возможность прикосновения к токоведущим частям;
- полное ограждение от прикосновения к аппаратуре с напряжением выше 1000 В;
- отключение всех источников питания установки общим рубильником.

5.5 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий [68].

Возможные причины загорания и взрыва: неисправность токоведущих частей установок; работа с открытой электроаппаратурой; короткие замыкания в блоке питания; несоблюдение правил пожарной безопасности; наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей; работа с газовыми баллонами.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации показано на рис.5.2

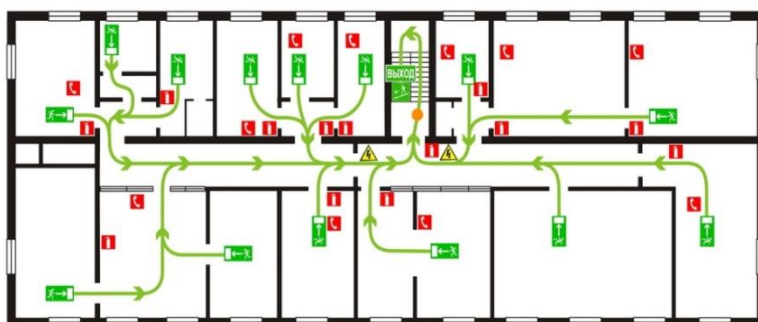


Рисунок 5.2 - План эвакуации из рабочего помещения

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;

- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

Во время эксплуатации вакуумной установки причиной взрыва являются газовые баллоны. Баллоны с газом находятся под высоким давлением (несколько десятков атмосфер), в связи с этим эксплуатация такого оборудования должны производиться с большой осторожностью и выполнением ряда технических требований, манометры должны проходить поверку. Газовый сосуд в случае утечку или разрушения может стать причиной взрыва. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны в [69-70]. В целях безопасности необходимо выполнение общих правил эксплуатации баллонов:

- баллоны должны быть установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, цепью, тросом и так далее, а также защищены от падения на них сверху каких либо предметов;

- баллоны с газом, устанавливаемые в помещениях должны находиться 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;

- выпуск газов из баллона должен производиться через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет. Камера низкого давления редуктора должна иметь манометр и пружинный предохранительный клапан, отрегулированный на соответствующее давление в емкости;

- во всех случаях открывать и закрывать вентиль баллона необходимо медленно.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

Сообщить руководству (дежурному).

Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС–тел.112.

Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Заключение

В результате выполнения магистерской диссертации был рассмотрен процесс распыления алюминиевого катода с помощью комбинации слабotoчных (в среднечастотном диапазоне) и сильноточных импульсов, а также определено влияние предварительной ионизации разрядного промежутка на параметры разряда в течении сильноточного импульса.

Получено, что:

-использование комбинации слабotoчных (в среднечастотном диапазоне) и сильноточных импульсов приводит к снижению разрядного напряжения разряда и повышению среднего тока. Это фактор обусловлен созданием предварительной концентрации носителей заряда в области перед катодом в момент подачи напряжения от сильноточного источника питания. Однако при этом наблюдается снижение пикового тока разряда;

-комбинированное питание магнетронной распылительной системы приводит к существенному (в 1,5 и более раз) снижению величины задержки выхода разряда в высокомошнй режим. Комбинация слабotoчных (в среднечастотном диапазоне) и сильноточных импульсов значительно уменьшает зависимость величины задержки от коэффициента заполнения сильноточных импульсов, частоты их следования и рабочего давления в камере. Также показано, что при повышении мошности разряда в течении предварительной ионизации от 0,1 до 3,1 кВт длительность задержки линейно снижается до 8,5 мкс;

-методом оптико-эмиссионной спектроскопии показано, что в плазме превалирует доля однократно заряженных ионов алюминия. Причём, оптический сигнал данной компоненты коррелирует со значением пикового тока разряда и обратно пропорционален сигналу от нейтральной компоненты алюминия в плазме, что свидетельствует о повышении интенсивности распыления алюминиевого катода;

-расчёты коэффициентов распыления и самораспыления алюминия в программе TRIM показали незначительные изменения скоростей распыления алюминиевого катода при использовании сильноточного и комбинированного источников питания. Данный аспект не оказывает существенного влияния на скорость осаждения алюминиевых покрытий;

-скорость осаждения алюминиевых покрытий практически в 2 раза выше при распылении алюминиевого катода с помощью комбинированного источника питания, что обусловлено ⁽¹⁾увеличением суммарной усреднённой мошности с 2 до 2,6 кВт,

⁽²⁾снижением пикового тока разряда и, как следствие, уменьшением интенсивности эффекта самораспыления, приводящего к снижению скорости осаждения.

Список использованных источников и литературы

1. Kouznetsov, V.; Macák, K.; Schneider, J. M.; Helmersson, U.; Petrov, I. *Surf. Coat. Technol.* 1999, 122, 290.
2. Christie, D. J.; Tomasel, F.; Sproul, W. D.; Carter, D. C. *J. Vac. Sci. Technol. A* 2004, 22 (4), 1415.
3. DeKoeven, B. M.; Ward, P. R.; Weiss, R. E.; Scholl, R. A.; Sproul, W. D.; Tomasel, F.; Anders, A. 46th SVC Annual TechCon Proceedings; 2003, 158.
4. U. Helmersson, M. Lattemann, J. Bohlmark, A.P. Ehiasarian, J.T. *Gudmundsson, Thin Solid Films* 513 (2006) 1.
5. R. Chistyakov, B. Abraham, and W.D. Sproul, *Proceedings of the 49th Annual SVC Technical Conference* (Washington, DC, April 23–27, 2006), pp. 88–91.
6. R. Chistyakov, B. Abraham, W. Sproul, J. Moore, and J. Lin, *Proceedings of the 50th Annual SVC Technical Conference*(Louisville, KY, April 30–May 3, 2007), pp. 139–143.
7. W.D. Sproul, D.J. Christie, and D.C. Carter, *Proceedings of the 47th Annual SVC Technical Conference* (Dallas, Texas, April 25–29, 2004), pp. 96–100.
8. W.D. Sproul, R. Chistyakov, and B. Abraham, *Society of Vacuum Coaters News Bulletin* (Summer 2006), pp.35–37.
9. Raman P, Shchelkanov IA, McLain J, Ruzic DN. High power pulsed magnetron sputtering: A method to increase deposition rate. *J VacSciTechnol A Vacuum, Surfaces, Film.* 2015;33(3):031304. doi:10.1116/1.4916108.
10. Influence of high power densities on the composition of pulsed magnetron plasmas / A.P. Ehiasariana, R. Newa, W.-D. Munza et al. // *Vacuum.* 2002, vol. (№) 65. P. 147–154.
11. K. Sarakinos , J. Alami , S. Konstantinidis High power pulsed magnetron sputtering: A review on scientific and engineering state of the art // *Surface & Coatings Technology.* 2010, vol. (№) 204. P. 1661–1684.
12. D. Lundin, K. Sarakinos An introduction to thin film processing using high-power impulse magnetron sputtering // *J. Mater. Res.* 2012, vol. (№) 27. P. 780–792.
13. J. Alami, S. Bolz, K. Sarakinos High power pulsed magnetron sputtering: Fundamentals and applications // *Journal of Alloys and Compounds.* 2009, vol. (№) 483. P. 530–534.
14. А.В. Тумаркин, Г.В. Ходаченко, Т.В. Степанова, И.А. Щелканов / Магнетронный разряд с расплавленным катодом // *Успехи прикладной физики.* 2013, вып. (№) 3. С. 276–282.
15. Experimental study of a pre-ionized high power pulsed magnetron discharge / P. Vasina, M. Mesko, J. C. Imbert et al. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2007, vol. (№) 16. P. 501–510.

16. Д.В. Духопельников// Магнетронные распылительные системы// устройство, принципы работы, применение//Москва 2009,10 ст
17. Д.В. Духопельников// Магнетронные распылительные системы// устройство, принципы работы, применение//Москва 2009,13 ст
18. Understanding the discharge current behavior in reactive high power impulse magnetron sputtering of oxides / M. Aiempnakit, A. Aijaz, D. Lundin et al. // J. Appl. Phys. 2013, vol. (№) 113. P. 133302–133310.
19. On sheath energization and Ohmic heating in sputtering magnetrons / C. Huo¹, D. Lundin, M. A. Raadu et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2013, vol. (№) 22. P. 45005–45012.
20. A. Anders Fundamentals of pulsed plasmas for materials processing // Surface and Coatings Technology. 2004, vol. (№) 183. P. 301–311.
21. D. Horwat, A. Anders Compression and strong rarefaction in high power impulse magnetron sputtering discharges // J. Appl. Phys. 2010, vol. (№) 108. P. 123306–123311.
22. W. M. Posadowski Sustained self sputtering of different materials using dc magnetron // Vacuum. 1995, vol. (№) 46. P. 1017–1020.
23. W. M. Posadowski Self-sustained magnetron co-sputtering of Cu and Ni // Thin Solid Films. 2004, vol. (№) 459. P. 258–261.
24. S. Kadlec, J. Musil Low pressure magnetron sputtering and selfsputtering discharges // Vacuum. 1996, vol. (№) 47. P. 307–311.
25. A. Wiatrowski, W. M. Posadowski, Z. J. Radzimski Pulsed-DC selfsputtering of copper // Journal of Physics: Conference Series. 2008, vol. (№) 100. P. 62004–62007.
26. G. Greczynski, J. Jensen, L. HultmanCrNx Films Prepared by DC Magnetron Sputtering and High-Power Pulsed Magnetron Sputtering: A Comparative Study // IEEE transactions on plasma science. 2010, vol. (№) 38. P. 3046–3056.
27. Enhanced ionization sputtering: A concept for superior industrial coatings / J. Alami, Z. Maric, H. Busch et al. // Surface & Coatings Technology. 2013, vol. (№) 19034. P. 1–35.
28. D. J. Christie Target material pathways model for high power pulsed magnetron sputtering // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2005, vol. (№) 23. P. 330–335.
29. Enhanced ionization sputtering: A concept for superior industrial coatings / J. Alami, Z. Maric, H. Busch et al. // Surface & Coatings Technology. 2013, vol. (№) 19034.P.1–35
30. D. J. Christie Target material pathways model for high power pulsed magnetron sputtering // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2005, vol. (№) 23. P. 330–335.
31. Wasa K., Hayakawa Sh. Some features of magnetron sputtering //Thin Solid Films. – 1978. –V.52. –P.31-43.

32. P. Raman, I. A. Shchelkanov, J. McLain, D. N. Ruzic / High power pulsed magnetron sputtering: A method to increase deposition rate // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2015, vol. (№) 33. P. 31304–31313.
33. Кесаев И.Г., Пашкова В.В. электромагнитная фиксация катодного пятна // *Журн. техн. физики*. –1959. -Т.29, №3. -С.287-298.
34. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радиоисвязь, 1982. –72 с.
35. Kuzmichev A., Sidorenko S., Steffen H., Hippler R., Kulikovskiy V. Investigation of a pulsed magnetron sputtering discharge with a vacuum pentode modulator power supply // *Vacuum*. 2004. Vol. 72. No.1. P. 59-69.
36. Денбновецкий С.В., Хипплер Р., Кузьмичев А.И., Куликовский В.Ю. и др. Запаздывание возникновения разряда в импульсных магнетронных распылительных устройствах// *Электроника и связь (Киев)*. 2000. № 8 (2). С.195-198.
37. Кузьмичев А.И., Куликовский В.Ю., Сидоренко С.Б. Динамические характеристики импульсной магнетронной распылительной системы// *Изв. АН (Москва). Сер. Физическая*. 2000. Т. 64 № 7. С. 1317-1321.
38. Кузьмичев А.И., Мельник Ю.И., Куликовский В.Ю., Богач П., Ястрабик Л. Характеристики импульсного магнетронного разряда при питании от емкостного накопителя энергии // *Изв. АН (Москва). Сер. Физическая*. 2003. Т. 67. №9. С.1272-1278.
39. Kukla R. Magnetron sputtering on large scale substrates: an overview on the state of the art // *Suif. Coat. Technol*. 1997. Vol. 93. P. 1-6.
40. . Bugaev S.P., Koval N.N., Sochugov N.S., Zakharov A.N. Investigation of high-current pulsed magnetron discharge initiated in the low-pressure diffuse arc plasma. – In Proc. Symp. On Discharges and Electr. Insulation in Vacuum. Berkley N.S. et al. Ion-assisted pulsed magnetron sputtering deposition of ta- C films // *Thin Solid Films*. 2001. Vol. 389. P.16-26.
41. Posadowski W.M. Pulsed magnetron sputtering of reactive compounds // *Thin Solid Films*. 1999. Vol. 343/344. P.85-89.
42. Kuzmichev A., Sidorenko S., Steffen H., Hippler R., Kulikovskiy V. Investigation of a pulsed magnetron sputtering discharge with a vacuum pentode modulator power supply // *Vacuum*. 2004. Vol. 72. No. 1. P. 59-69.
43. Colligon J.S. Energetic condensation: Processes, properties, and products // *J. Vac. Sci. Technol. A*/ 1995/ Vol. 13. No. 3. P. 1649-1657.

44. Kirchhoff V., Kopte T., Winkler. Et. Al. Dual magnetron sputtering (DMS) system with sine-wave power supply for large area coating // Surf. Coat. Technol. 1998. Vol. 98. P. 828-833.
45. Scherer M., Schmitt J., Latz R., Schanz M. Reactive alternating current magnetron sputtering of dielectric layers // J. Vac. Sci. Technol. 1992. Vol. A10. No.4. P. 1772-1776.
46. Enhanced ionization sputtering: A concept for superior industrial coatings / J. Alami, Z. Maric, H. Busch et al. // Surface & Coatings Technology. 2013, vol. (№) 19034. P. 1–35.
47. V. Kouznetsov, K. Macak, J. M. Schneider, U. Helmersson, and I. Petrov, “A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 122, no. 2/3, pp. 290–293, Dec. 1999
48. J. S. Townsend, *Electricity in Gases*. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 1914.
49. J. M. Meek and J. D. Craggs, *Electrical Breakdown of Gases*. Oxford, U.K.: Clarendon, 1953.
50. F. F. Chen, *Plasma Physics and Controlled Fusion*. New York: Plenum, 1984.
51. TRIM (the Transport of Ions in Matter) by J. Ziegler, J.P. Biersack, M.D. Ziegler. www.srim.org, 2016.7
52. Peak amplitude of target current determines deposition rate loss during high power pulsed magnetron sputtering
53. J.A. Davis, W.D. Sproul, D.J. Christie, M. Geisler / In Proceedings of the 47th Annual SVC Technical Conference (2004), p. 215 Dallas (TX)
54. D.A. Glocker, M.M. Romach, D.J. Christie, W.D. Sproul / In Proceedings of the 47th Annual SVC Technical Conference (2004) Dallas (TX)
55. W.D. Sproul, D.J. Christie, D.C. Carter / In Proceedings of the 47th Annual SVC Technical Conference (2004) Dallas (TX)
56. M. Samuelsson, D. Lundin, J. Jensen, M.A. Raadu, J.T. Gudmundsson, U. Helmersson / *Surf. Coat. Technol.*, 205 (2010), p. 591
57. D.J. Christie *J. Vac. Sci. Technol. A*, 23 (2005), p. 330
58. J. Vlcek, P. Kudlacek, K. Burcalova, J. Musil / *J. Vac. Sci. Technol. A*, 25 (2007), p. 42
59. D. Lundin, P. Larsson, E. Wallin, M. Lattemann, N. Brenning, U. Helmersson / *Plasma Sources Sci. Technol.*, 17 (2008), p. 035021
60. J. Emmerlich, S. Mraz, R. Snyders, K. Jiang, J.M. Schneider / *Vacuum*, 82 (2008), p. 867
61. ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

62. ГОСТ 12.2.085-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.-.:Стандартинформ,2007.-15с.
63. ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
64. Безопасность жизнедеятельности: Учебник/Под ред. проф. Э.А. Арустамова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2006.
65. Безопасность жизнедеятельности. /Под ред. Н.А. Белова - М.: Знание, 2000 - 364с.
66. СНиП 23 – 05 –95. Нормы проектирования. Естественное и искусственное освещение. М.: Минстрой России, 1995.
67. Справочная книга для проектирования электрического освещения. / Под ред. Г.Б. Кнорринга. – Л.: Энергия, 1976.
68. ГОСТ 12.3.002-75. Процессы производственные. Общие требования безопасности
69. Федеральный Закон №214-ФЗ от 24.07.2007: «О драгоценных металлах и драгоценных камнях» (п. 2, ст. 20)
70. СанПиН: 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным вычислительным машинам и организации работы".