

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 03.03.02 Физика
 Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики (ОЭФ)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование закономерностей модификации стали 12Х18Н10Т высокоинтенсивной имплантацией ионов азота

УДК 539.2:539.1:669.15'7-194

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Бунин Алексей Иванович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий лабораторией НЛВИИ ИШФВП ТПУ	Рябчиков А. И.	Д. ф.-м. н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Л.Ю.	К.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Склярова Е.А.	к.п.н., доцент		

Запланированные результаты освоения ООП

Код	Результат освоения ООП
P1	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности
P2	Уметь работать в коллективе, быть готовым к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.
P3	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.
P4	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.
P5	Применять организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.
P6	Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.
P7	Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.
P8	Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 03.03.02 «Физика»
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б71	Бунин Алексей Иванович

Тема работы:

Исследование закономерностей модификации стали 12Х18Н10Т высокоинтенсивной имплантацией ионов азота
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования являются высокоинтенсивных пучков ионов титана и азота в условиях низкой энергии (до 1.4 кэВ) с плотностью тока несколько десятков мА/см². Рассмотреть возможности модификации стали 12Х18Н10Т высокоинтенсивными пучками ионов азота в условиях регулируемой энергии ионов.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературы в области формирования высокоинтенсивных ионных пучков и их применения для модификации материалов; – формирование высокоинтенсивных пучков ионов азота и титана; – модификация стали 12Х18Н10Т высокоинтенсивными пучками ионов азота с различными энергиями ионов; – исследование закономерности модификации стали в условиях компенсации распыления; – исследование распределение легируемой примеси в ионно-модифицированных образцах; – Анализ полученных результатов; – Социальная ответственность; – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.
--	---

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Мезенцева И.Л., ассистент ООД</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Спицына Л.Ю., доцент ОСГН ШБИП ТПУ</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p> </p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p> </p>
--	----------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Заведующий лабораторией НЛВИИ ИШФВП ТПУ</p>	<p>Рябчиков А. И.</p>	<p>Д. ф.-м. н., профессор</p>	<p> </p>	<p> </p>

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>0Б71</p>	<p>Бунин А.И.</p>	<p> </p>	<p> </p>

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

Студенту:

Группа	ФИО
0Б71	Бунину Алексею Ивановичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02 «Физика»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Затраты на научное исследование – не более 200 тыс. Затраты на заработную плату сотрудникам – не более 100 тыс.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Согласно проектной документации. Районный коэффициент 1.3
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Анализ и оценка конкурентоспособности НИ; SWOT-анализ
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки: определение структуры работ; определение трудоёмкости работ; разработка графика Гантта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: материальные затраты; заработная плата; отчисления во внебюджетные фонды; затраты на электроэнергию; амортизационные расходы.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Расчет и оценка сравнительной и финансовой эффективности

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. График проведения НИ (диаграмма Гантта)
4. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Спицына Любовь Юрьевна	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Бунин Алексей Иванович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0Б71	Бунин А.И.

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	03.03.02 «Физика»

Тема ВКР:

Исследование закономерностей модификации стали 12X18H10T высокоинтенсивной имплантацией ионов азота	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования – модифицированный приповерхностный слой стали марки 12X18H10T</p> <p>Рабочее место – лаборатория высокоинтенсивной имплантации.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> - ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ - ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ - ГОСТ 22614-77 - ГОСТ 22902-78
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<p>Вредные: отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, недостаточная освещённость рабочей зоны</p> <p>Опасные: опасность поражения током, опасность возгорания и взрыва газовых баллонов.</p>
3. Экологическая безопасность:	В процессе работы форвакуумного насоса образуются масляные пары, загрязняющие атмосферу.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> - к возможным ЧС относятся угроза возникновения пожара и взрыв газовых баллонов - к типичным относится возникновение пожара

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева Ирина Леонидовна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б71	Бунин Алексей Иванович		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа – Инженерная школа ядерных технологий

Уровень образования Магистратура

Направление подготовки – Физика конденсированного состояния

Отделение школы (НОЦ) – Отделение экспериментальной физики

Период выполнения _____

Форма представления работы:

Бакалаврская работа
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы: _____

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
18.02.2021	Разработка выданного задания	5
25.02.2021	Аналитический обзор литературы	15
3.03.2021	Подготовка к проведению экспериментов по формированию пучков ионов азота и взаимодействию их с образцом стали 12X18H10T	10
12.03.2021	Проведение экспериментов	10
04.04.2021	Анализ полученных результатов	15
01.05.2021	Социальная ответственность	10
01.05.2021	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
05.06.2021	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий лабораторией НЛВИИ ИШФВП ТПУ	Рябчиков А.И.	Д. ф.-м. н., профессор		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Склярова Е.А.	Доцент, кандидат пед. наук		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 101 страницы, 32 рисунков, 20 таблиц, 37 литературных источника, 0 приложений.

Ключевые слова: высокоинтенсивная ионная имплантация, сталь 12X18H10T, формирование пучков ионов азота, баллистическая фокусировка, CALOTEST, компенсация распыления.

Объектом исследований являлись пучки ионов азота низкой энергии и взаимодействие их с поверхностью материала, стали марки 12X18H10T.

Целью работы: целью работы являлось исследовать особенности модификации стали 12X18H10T высокоинтенсивной имплантацией пучков ионов азота в условиях компенсации распыления, а также изучить особенности формирования пучков ионов титана низкой энергии. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

Необходимо провести сбор необходимых данных по положению дел в данной сфере

Проведение экспериментов по получению модифицированных слоев азота в условиях компенсации заряда и без

3. Анализ полученных результатов и подведение итогов

ОГЛАВЛЕНИЕ

РЕФЕРАТ	9
ВВЕДЕНИЕ	12
1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ.....	15
1.1. Получение высокоинтенсивных пучков металлов.	15
1.2 Получение высокоинтенсивных пучков ионов газа	24
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ	30
2.1 Экспериментальная установка.....	30
2.2. Источник газовой плазмы	33
2.3 Система формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота	34
2.4 Подготовка образцов	35
2.5 Методики исследований ионно-легированных образцов	37
2.6 Методика определения толщин ионно-модифицированного слоя прибором CALOTEST.....	40
3 ВЫСОКОИНТЕНСИВНАЯ ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ИОНОВ ТИТАНА И АЗОТА	42
3.1 Формирование пучка ионов металлов	42
3.2 Воздействие пучка на поверхность сложной формы	47
3.3 Исследование возможности изучения приповерхностного, имплантированного ионами азота, слоя образца стали (12X18H10T) при помощи оборудования CALOTEST.	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	58
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСООБЕСПЕЧЕНИЕ	60
4.1 Техничко-экономическое обоснование научно-исследовательской работы	60
4.2 Потенциальные потребители результатов исследования	61
4.3 Анализ конкурентных технических решений	63
4.4 SWOT – анализ	65
4.5 Организация и планирование работ	68
4.6 Продолжительность этапов работ	70

4.7 Бюджет научного исследования	74
4.7.1 Расчёт материальных затрат	74
4.7.2 Расчет затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ	74
4.7.3 Расчёт заработной платы	76
4.7.4 Отчисления во внебюджетные фонды	77
4.7.5 Расчёт затрат на электроэнергию	77
4.7.6 Расчёт амортизационных расходов	78
4.8 Определение сравнительной эффективности исследования	79
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	81
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	83
ВВЕДЕНИЕ	83
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	83
5.2 Производственная безопасность	85
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.	87
5.3 Экологическая безопасность	94
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	94
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	95
ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	96
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	98

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует множество различных методов модификации поверхности материалов. К одним из таких методов относится высокоинтенсивная ионная имплантация.

Ионная имплантация – это метод, основанный на внедрении ионов как металлов, так и газов, включая инертные, в поверхностный слой твердого тела. Ионная имплантация является важным инструментом для модификации поверхностей широкого круга материалов для применения в областях, связанных с фундаментальными исследованиями и прикладными технологиями [13-17]. Метод ионной имплантации обладает уникальными свойствами и обеспечивает возможность управляемого изменения элементного состава, микроструктуры и свойств различных материалов, включая полупроводники, металлические и диэлектрические материалы. В отличие от других методов, таких как лазерная обработка или за счёт сильнофокусированных электронных пучков и других, модификация материала в ионной имплантации происходит за счёт изменения элементного и фазового состава в поверхностном слое [13, 16, 17].

Разрушение поверхностных слоев материалов сегодня является основным фактором ограничения ресурса работы сложных наукоемких изделий, работающих в экстремальных условиях. Разработки последних двух десятилетий в области создания пучковых и плазменных технологий модификации поверхностных слоев материалов и формирования различных функциональных покрытий позволили существенно повысить эксплуатационные характеристики и ресурс работы различных узлов и изделий. В тоже время анализ существующих технологий выявил ряд серьезных проблем в их эффективном применении в реальных секторах производства наукоемкой продукции. Главный недостаток метода ионной имплантации связан с ограниченной глубиной ионно-модифицированного слоя, в большинстве случаев, не превышающего единиц микрометров.

Обычная ионная имплантация реализуется при облучении поверхности образцов металлическими или газовыми ионами с энергией ионов в диапазоне 10–100 кэВ и при плотностях токов от 1–100 мкА/см² [13, 15]. Это обеспечивает формирование ионно-легированного приповерхностного слоя материала с измененным элементным составом на глубинах, не превышающих несколько долей микрометра. Для решения задач по формированию глубоко легированных слоев в полупроводниковых материалах разрабатывались методы имплантации ионов с высокой (несколько МэВ) и сверхвысокой (несколько сотен МэВ) энергией ионов [17]. Однако для модификации свойств и структуры металлов и сплавов аналогичный подход оказался экономически нецелесообразен. Поэтому увеличение энергии ионов до десятков и сотен МэВ привело бы к необходимости увеличения дозы облучения материалов и металлов до запредельных значений, а стоимость ионной обработки многократно превышала бы стоимость самих изделий.

Для наиболее эффективного проникновения атомов примеси в сплавы наиболее перспективным подходом, с точки зрения глубоких ионно-легированных слоев считается метод, основанный на радиационно-стимулированной диффузии атомов примеси в поверхность твёрдого тела. Такие методы получили название «сильноточной» [9] и «высокоинтенсивной» ионной имплантации.

Основой данных методов является нагрев поверхности материала до температуры, при которой происходит ускоренное проникновение атомов при диффузионных процессах. Это увеличивает толщину модифицированного слоя на большие порядки.

В работе [9] были показаны важные результаты по формированию глубоко легированных слоёв различных сталей и сплавов при обработке низкоэнергетическим пучком ионов азота с энергией 1 кэВ и при плотностях тока 1–5 мА/см². Использование сильноточной имплантации ионов азота при повышенных температурах для получения имплантированных слоев в нержавеющей сталях позволило достигнуть толщин порядка 10 мкм за счет

диффузионных процессов. Двухчасовая имплантация ионов азота с энергией 1 кэВ, при плотностях тока от 1 до 2 мА/см² в мартенситную сталь обеспечивала возможность формирования ионно-модифицированного слоя толщиной 18–20 мкм. Детальные исследования процессов сильноточной имплантации ионов азота позволили сделать вывод, что на глубокое проникновение имплантируемых атомов преимущественное влияние оказывает плотность ионного тока. Как показали исследования, энергия ионам нужна только для очистки поверхности имплантируемых образцов от формирующихся оксидов и карбидов, которые негативно влияют на диффузионные процессы.

После появления систем формирования пучков на основе плазменно-иммерсионной экстракции ионов, их ускорения в слое разделения зарядов и последующей баллистической фокусировкой пучка плотность тока ионов увеличилась до нескольких десятков и сотен мА/см² при энергии ионов в 1 кэВ. Очень высокие плотности ионного тока открывают перспективы реализации сверх высоко-дозовой имплантации и формирования глубоко ионно-легированных слоев за короткие времена.

В Научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов впервые в мире была показана возможность получения ионно-легированных слоёв в различных материалах в десятки и сотни микрометров. Разработанный новый метод показал значительное улучшение как эксплуатационных, так и физико-химических свойств материалов. Также, в свою очередь, появился ряд научных проблем, связанных с получением модифицированных слоёв, которые необходимо решить для обеспечения значительных перспектив практического применения метода высокоинтенсивной имплантации ионов низкой энергии.

Одна из базовых проблем связана с ионным распылением поверхности при экстремально высокодозовой имплантации на глубины в десятки и сотни микрометров, что негативно влияет на морфологию облучаемой поверхности, ее шероховатость. В рамках данной работы предполагается решение вышеуказанной проблемы.

1 ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

1.1. Получение высокоинтенсивных пучков металлов.

В настоящее время существует множество методов модификации поверхности материалов для получения необходимых свойств и характеристик. Данные методы играют важную роль в улучшении физико-химических и эксплуатационных свойств различных материалов. Одним из таких методов является высокоинтенсивная ионная имплантация, которая является отличным решением в улучшении поверхностных свойств материала.

В 2017 году в Научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации Томского Политехнического Университета впервые был предложен и описан метод плазменно-иммерсионного формирования высокоинтенсивных ионных пучков в условиях баллистической фокусировки ионов [1]. В данной работе впервые были применены основные принципы формирования высокоинтенсивных пучков металлов на основе титана.

Для получения высокоинтенсивных пучков ионов титана использовался вакуумный дуговой разряд постоянного тока. Схема ионного источника приведена на рисунке 1.1. Ток дугового разряда составлял 160 А. Все эксперименты проводились при давлении 10^{-3} Па. Сетчатый электрод был электрически соединен с цилиндрическим электродом, тем самым образуя эквипотенциальное дрейфовое пространство для баллистической фокусировки ионного пучка. Внутри системы был установлен коллектор ионного тока. Коллектор и сеточный электрод были электрически соединены с генератором импульсно-периодического отрицательного смещения.

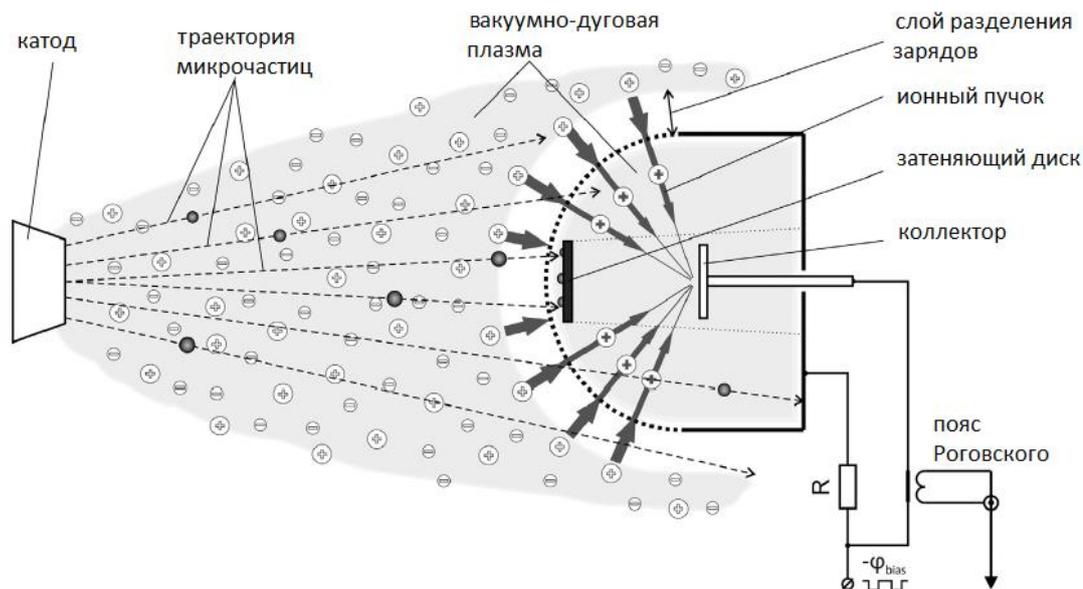


Рисунок 1.1 – Схема формирования высокоинтенсивного пучка ионов металлов

Система формирования пучков основана на принципах плазменно-иммерсионной экстракции, ускорении ионов в слое разделения зарядов и баллистической фокусировки ионного пучка при его транспортировке в эквипотенциальном пространстве дрейфа, предварительно заполненном плазмой. Экстракция и фокусировка пучка осуществлялась сеточным электродом, выполненным в виде части сферы с радиусом 5 см (размер ячейки 1.0 x 1.0 мм) или 7,5 и 10,5 см с размером ячейки 1,8 x 1,8 мм, с прозрачностью 70%. Монтировался сетчатый электрод по оси источника плазмы на расстоянии 40 см от катода вакуумно-дугового испарителя. Для данного электрода фокус находится в геометрическом центре сферы. Его установка проводилась на одном из оснований сплошного металлического цилиндра. При такой конструкции выделяется объем, который ограничивает эквипотенциальное пространство для переноса ионного пучка. Коллектор с датчиками были установлены у основания данного цилиндра. Ускорение и транспортировка ионов в эквипотенциальном пространстве дрейфа осуществлялись с помощью импульсного потенциала смещения, который одновременно подавался на сеточный электрод, сплошной цилиндрический электрод и на коллектор.

В работе [1] для формирования плазмы использовался вакуумно-дуговой разряди одним из минусов данного формирования в результате взрывных эмиссионных процессов на титановом катоде генерируется значительный поток макрочастиц (капель или твердых осколков с размерами от долей микрометров до десятков микрометров). Макрочастицы существенно влияют на технологические возможности системы формирования ионных пучков так как приводят к загрязнению как сетчатого электрода, так и обрабатываемых поверхностей [2] продуктами катода. Для очистки ионного пучка от макрочастиц вакуумно-дугового разряда без значительного уменьшения ионного тока был применен эффект «solar eclipse». На сеточном электроде по оси симметрии системы формирования пучков устанавливался затеняющий диск (рисунок 1.1). В таком положении экран позволяет преградить путь эмитирующим катодным каплям, имеющим прямолинейную траекторию от эмиттера до поверхности образца. Часть ионов также встречают преграду на пути транспортировки к мишени, однако в связи с баллистической фокусировкой при помощи сферического сетчатого электрода, они беспрепятственно попадают на поверхность коллектора. Экспериментальные результаты, полученным в работе, указывают на практически полное отсутствие макрочастиц на поверхности образца. На рисунке 1.2 показаны поверхности двух образцов с затеняющим диском и без, и его влияние на устранение микрокапель из ионного потока.

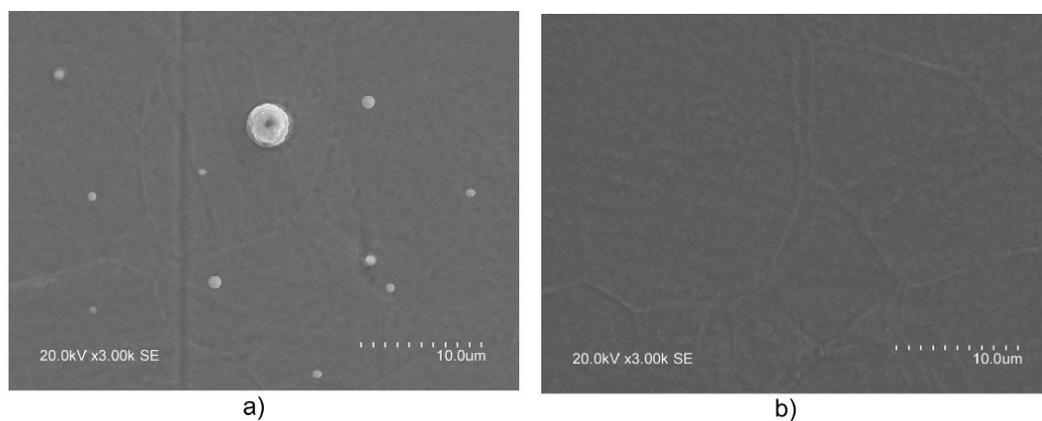


Рисунок 1.2 – СЭМ-изображения поверхности подложки после воздействия ионного пучка без (а) и с (b) системой разделения макрочастиц

По рисунку 1.2 можно сказать, что препятствие затеняющего диска на пути у микрокапель, образующихся в результате процесса взрывной эмиссии катода, полностью очищает поверхность коллектора от катодных пятен. Однако, если рассматривать поверхность образца целиком, то на нём все-таки можно найти следы макрочастиц, но в малом количестве.

По проведённым экспериментам в работе [1] на выявление особенностей формирования высокоинтенсивных пучков ионов титана в зависимости от различных параметров, таких как: длительность импульса потенциалов смещения, подаваемая на сеточный электрод; расстояние между образцом и сеточным электродом; амплитуда потенциалов смещения. По результатам, полученным в ходе эксперимента по формированию сфокусированных пучков ионов титана, можно сделать вывод, что к наилучшим условиям по получению данного пучка относится расположение коллектора в фокусе системы. В данном случае при максимальном ускоряющем напряжении на сеточном электроде, достигалась максимальная амплитуда тока.

Одним из важных факторов в работе с ионной имплантацией является эффект нейтрализации заряда пучка внутри пространства дрейфа. В работе [1] было показано формирование пучков ионов титана с низкой энергией и высокой плотностью тока до 1 А/см^2 . Изменение радиуса сеточного электрода с 7.5 см до 10.5 см показало, что амплитуда ионного тока в зависимости от продолжительности импульсов потенциала смещения уменьшилась. Данное изменение говорит о том, что оно может быть связано с транспортировкой ионного пучка внутри пространства дрейфа на большие расстояния. Исследования [14] показывают, что в условиях компенсации электронов внутри пространства дрейфа, формирование и транспортировка ионного пучка улучшается, в связи с нейтрализацией данного пучка. Данные процессы переноса и создания потока невозможны при невыполнении условия нейтрализации пространственного заряда в области дрейфа. Если плазма не полностью заполняет пространство, то не происходит эффективной транспортировки пучка, которая ограничивается возникновением в вакуумном

зависимости от провисания потенциала, вплоть до образования виртуального анода. В связи с этим, исследования показали существование вероятности развития пучковой неустойчивости при длительности импульса более 15 мкс, рисунок 1.3.

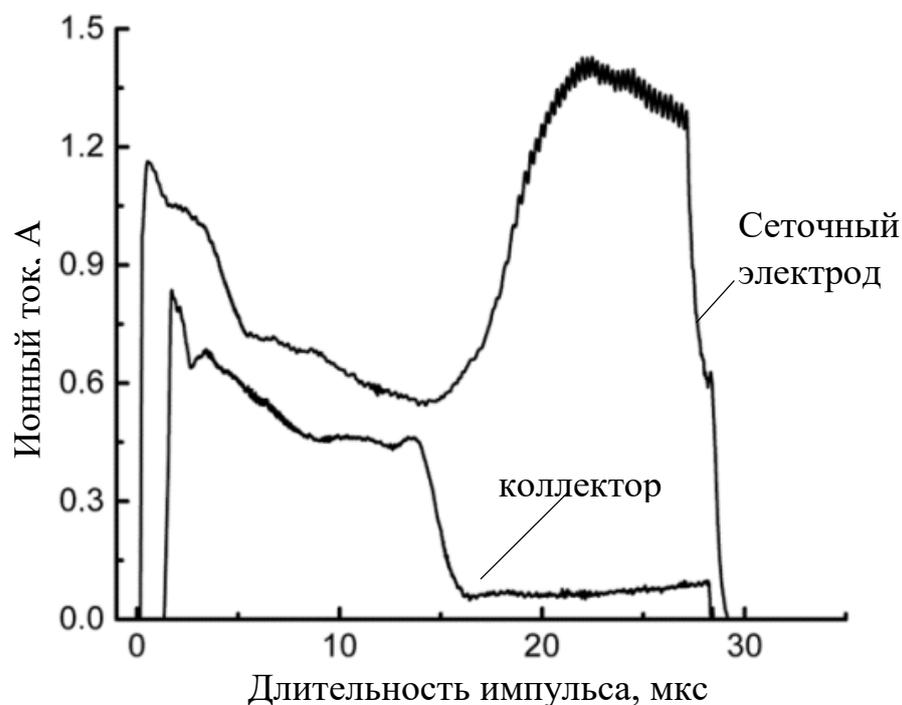


Рисунок 1.3 – Осциллограмма ионного тока на коллекторе и сеточном электроде в условиях неустойчивости пучка ионов титана с высокой длительностью [3].

Без условия нейтрализации пространственного заряда высокоинтенсивные пучки ионов не могут транспортироваться в вакууме. Это связано с тем, что плазменные электроны уходят из пространства дрейфа. В случае же с применением импульсного и повторяющегося импульсного режимов формирования ионных пучков из плазмы непрерывной вакуумной дуги, перед последующим формированием высокоинтенсивного пучка, внутри потенциального электрода инжектируется плазма непосредственно для компенсации пространственного заряда. В таком случае выполняется условие заполнения плазмой пространства дрейфа ионного пучка:

$$\left(\frac{1}{f} - \tau\right) \cdot v_0 \geq R \tag{1.1}$$

Здесь f – частота импульса, τ – длительность импульса, v_0 – скорость направленного движения плазменного потока, R – длина вакуумного зазора в пространстве дрейфа.

При частоте импульсов 10^3 пульсаций в секунду и при длительности импульса смещения 30 мкс время между импульсами составляло почти 1 мс. Плазма полностью заполняла дрейфовое пространство между сетчатым электродом и коллектором перед формированием пучка. Первые эксперименты проводились с сеткой с радиусом кривизны 7,5 см. Коллектор в форме полусферы радиусом 6,8 см размещался на расстоянии 7 мм от сетки.

Анализируя осциллограмму на рисунке 1.2, можно сделать вывод, что при длительности импульсов более 10 мкс существует вероятность развития неустойчивости пучка, при которой амплитуда ионного тока в коллекторе резко уменьшается до определенного предельного значения. При этом ионный ток на сеточном электроде увеличивается. По мере увеличения длительности импульса напряжения смещения сбой переноса ионного пучка становится более вероятным.

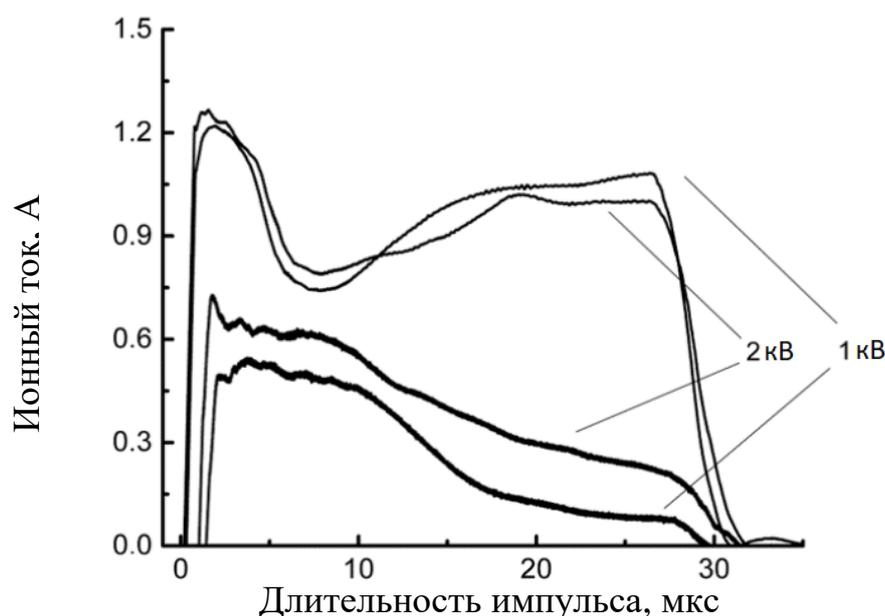


Рисунок 1.4 – Усредненные осциллографом следы тока ионного пучка на сеточном электроде и на коллекторе, расположенном в фокальной плоскости системы (7,5 см) при различных амплитудах отрицательного напряжения смещения [3].

В работе [14] уменьшение ионного тока свидетельствует о вероятности формирования ионного пучка с определенной длительностью. Например, при длительности импульса смещения 15 мкс амплитуда ионного тока, судя по следу осциллографа, примерно в два раза ниже пиковой амплитуды. Это означает, что ток ионного пучка длительностью 15 мкс регистрируется в два раза реже. Условия переноса пучка улучшились, если судить по осциллограммам. Увеличение ускоряющего напряжения и соответствующее увеличение энергии ионов уменьшают вероятность сбоев тока ионов коллектора и увеличивают количество импульсов полной длительности, которое контролируется длительностью импульса потенциала смещения.

При увеличении ускоряющего напряжения уменьшается вероятность срывов транспортировки ионного пучка, что в свою очередь влечёт за собой увеличение ионного тока на коллекторе. При подаче отрицательного потенциала смещения сеточному электроду, вокруг него образуется так называемый матричный слой разделения зарядов. В данном слое под действием электрического поля ионы начинают притягиваться и ускоряться к электроду, а электроны в свою очередь, имея отрицательный заряд, начинают отталкиваться и покидать область у электрода. В данном слое изменяются как распределение плотности ионов в зазоре, так и распределение ионов по скоростям. Чтобы оценить толщину матричного слоя разделения зарядов для стационарного его значения применяют формулу Чайлда-Ленгмюра:

$$d = \sqrt{\frac{4}{3} \varepsilon_0 \cdot \sqrt{\frac{2\bar{Z}e}{M} \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{j}}}, \quad (1.2)$$

где d – ширина слоя разделения зарядов, ε_0 – диэлектрическая постоянная, \bar{Z} – среднее зарядовое состояние ионов, M – масса ионов, j – плотность тока насыщения ионов из плазмы.

Именно по этой причине, когда амплитуда потенциала смещения увеличивается в два раза, ионный ток на сеточном электроде уменьшается, в то время как ионный ток на коллекторе одновременно увеличивается.

Ширина слоя разделения зарядов d имеет критически важное значение для формирования ионного пучка. Если ширина d будет меньше или сравнима с размерами ячейки сетки, то ионы преимущественно будут осаждаться на фокусирующей системе, а формируемый ионный поток будет иметь значительную угловую расходимость.

Несмотря на стабильную фокусировку пучка ионов металлов при достаточной амплитуде потенциалов смещения на сеточном электроде, использование фокусирующих сеточных систем в виде части сферической поверхности второго порядка, условие квазинейтральности ионного пучка не может выполняться на протяжении всего пространства дрейфа. Так, плотность предварительно инжектируемой в пространство дрейфа титановой плазмы составляет n_0 , которая может быть оценена через соотношение (1.3):

$$j = \bar{Z} e n_0 v_0, \quad (1.3)$$

За v_0 можно принять направленную скорость движения плазменной струи ($1,5 \cdot 10^6$ см/с). Плотность потока ионов в ускорителе пучка $n_{\text{ускор}}$ уменьшается обратно пропорционально увеличению их скорости после образования оболочки и ускорения ионов в ней. Если учесть сферическую геометрию сеточного электрода при фокусировке, то плотность ионов пучка увеличивается следующим образом:

$$n_{\text{фок}} = \frac{n_{\text{ускор}} R^2}{(R - \Delta R)^2}, \quad (1.4)$$

где ΔR - расстояние, пройденное ионным пучком в дрейфовом пространстве.

Плотности ионного тока и плазмы равны при $\varphi = -1$ кВ на расстоянии около 3 см от коллектора и при $\varphi = -2$ кВ – на расстоянии около 2,5 см. Когда луч переносится на большие расстояния, нейтрализация его пространственного заряда терпит неудачу, и потенциал провисает. Однако, в отличие от случая формирования резко сфокусированных ионных пучков при высоких частотах следования импульсов и коротких временах инжекции плазмы, где наблюдалось образование виртуального анода из-за наличия зазора [1],

генерация ионных пучков большой длительности сопровождается уменьшением длительности импульса из-за нестабильности.

Поскольку эффективность транспортировки пучка прежде всего зависит от условий компенсации его пространственного заряда, то наряду с предварительной инжекцией плазмы в пространство дрейфа пучка, были проведены исследования влияния давления остаточного газа.

Чтобы объяснить влияние остаточного газа на эффективность переноса длинноимпульсного пучка ионов титана, необходимо объяснить некоторые процессы. В момент, когда ионный пучок проходит через остаточный газ, первый в свою очередь может ионизировать молекулы, находящиеся в газе, и образовать плазму пучка в дрейфовом пространстве. Ионы газа, образовавшиеся в результате столкновений, вытесняются из пучка, а электроны нейтрализуют его пространственный заряд, значительно улучшая условия переноса. В работе [6] была проведена оценка времени нейтрализации пространственного заряда. Пройдя путь R от сетки до коллектора через газ с плотностью $n_{\text{газ}}$, ионный пучок образует число электронов по формуле:

$$N_{\text{эл}} = n_{\text{газ}} \sigma R \quad (1.5)$$

где σ – эффективное сечение ионизации при ионном ударе.

При ускоряющем напряжении 2 кВ ионы титана имеют скорость около $1,3 \cdot 10^7$ см/с, при этих скоростях эффективное сечение ионизации равно $\sigma \approx 5 \cdot 10^{-16}$ ионов/см². Атомная плотность в данных условиях и при давлении воздуха (азота) в рабочей камере 10^{-3} Па будет приблизительно равна $2,65 \cdot 10^{11}$ ат/см³. Время образования электронов ионом газа $\tau_{el} = \frac{\bar{z}}{n_{\text{газ}} \sigma v_{\text{ион}}}$, необходимых для нейтрализации пространственного заряда пучка, больше 1 мс, что значительно превышает длительность импульса ионного тока в экспериментах. Если повышать давление, то данный процесс сокращает время генерации электронов. При давлении 10^{-1} Па достигается полная компенсация пространственного заряда пучка, а время образования плазменных электронов снижается до ~ 10 мкс. Эти оценки обеспечивают хорошую интерпретацию

формы волны ионного тока при различных давлениях, хотя они являются приближительными, поскольку они сделаны в предположении, что электроны не покидают пучок в течение этого времени. В случае полной нейтрализации пространственного заряда за счет ионизации остаточного газа ионами пучка нестабильностей не наблюдается. Можно отметить также характерную особенность, заключающуюся в отсутствии влияния давления на начальную амплитуду ионного тока.

В работе [8] посвящённой формированию высокоинтенсивных пучков ионов алюминия низкой энергии были получены пучки с максимальной амплитудой ионного тока на коллекторе до 1.2 А. При увеличении размера коллектора от 4 до 12 см, ионный ток увеличивался. В случае, когда коллектор располагался в фокусе системы, плотность тока достигала порядка 0.25 А/см^2 , а также при увеличении длины транспортировки пучка за фокус системы на 1 и 2 см плотность тока увеличилась до 0.36 А/см^2 и 0.47 А/см^2 соответственно. При последующем отдалении коллектора от фокуса системы плотность тока снижается.

1.2 Получение высокоинтенсивных пучков ионов газа

Исследование закономерностей формирования пучков ионов газов было описано в работе [10]. Описан данный процесс в зависимости от амплитуды потенциала смещения с максимальной амплитудой -2.4 кВ, в зависимости ионного тока от частоты следования импульса потенциалов смещения в диапазоне от 10 до 100 кГц и длительности импульсов от 2 до 80 мкс. Данное предположение было основано на работе Р. Вея [9], который продемонстрировал, что основным фактором, влияющим на глубину имплантации ионов в материал, является высокая плотность ионного тока, а не их энергия.

На рисунке 1.5 представлена схема системы формирования и фокусировки пучка ионов газов.

Отличительной особенностью схемы формирования высокоинтенсивного пучка ионов газа от схемы формирования высокоинтенсивного пучка ионов металла является отсутствие затеняющего диска, показанного на рисунке 1.1. Как было сказано выше, при получении металлической плазмы образуются микрокапли, загрязняющие поверхность образца, а в случае получения газовой плазмы микрокапельная фракция отсутствует, следовательно, нет необходимости устанавливать затеняющий диск.

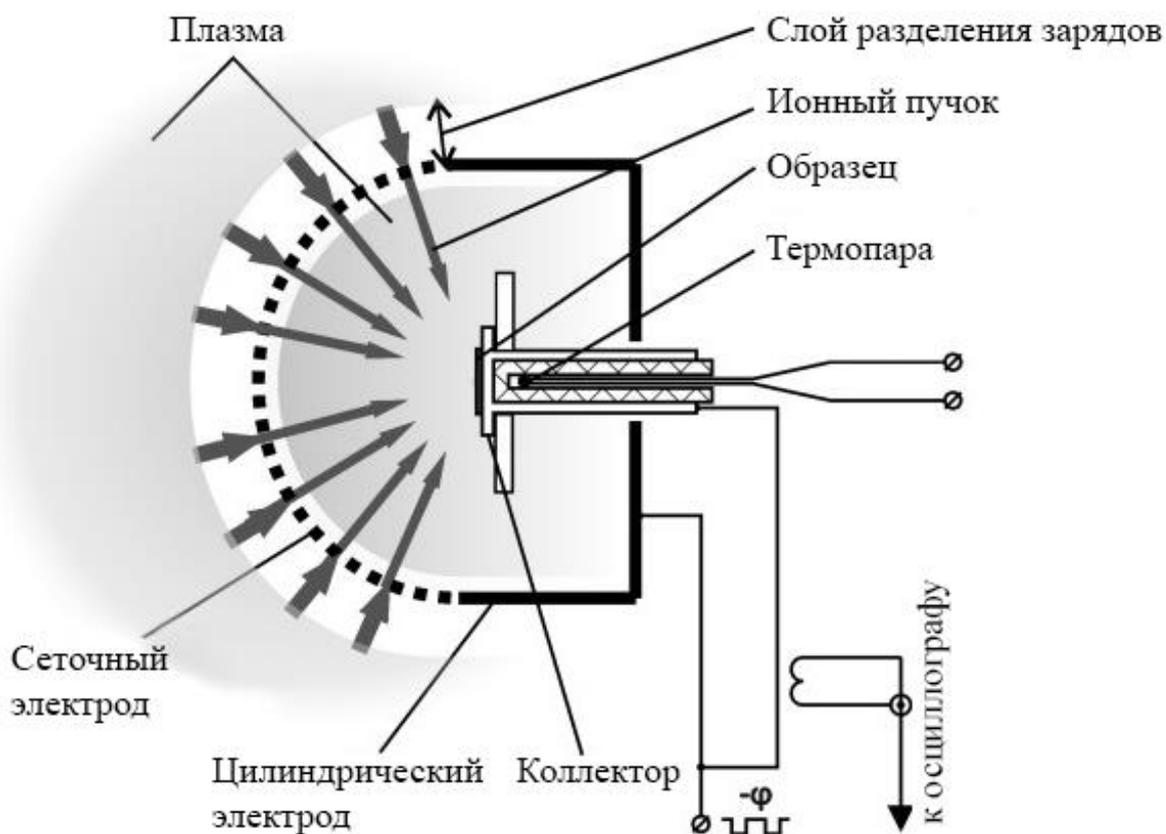


Рисунок 1.5 – Схема формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота

Система формирования газового пучка, показанная на рисунке 1.5, использовалась для формирования повторяющихся импульсных пучков ионов азота длительностью от 2 до 80 мкс. К сетчатому электроду, погруженному в газовую плазму, был приложен отрицательный потенциал смещения, а вблизи

его поверхности образовывалась высоковольтная оболочка. Получив ускорение в оболочке, ионы вошли в дрейфовое пространство, ограниченное сеткой и цилиндрическими электродами. Формирование короткоимпульсных пучков ионов азота изучалось с помощью повторяющегося импульсного генератора потенциалов смещения с фиксированной частотой 100 кГц. На рис. 1.6 приведены характерные осциллограммы напряжения и тока пучка ионов азота, полученные при амплитудах смещения в диапазоне 0,9–2,4 кВ с длительностью импульса 4 мкс. На рисунке 1.5 показано, что импульсы напряжения имеют приблизительно прямоугольную форму. Небольшой индуктивный выброс на переднем крае импульса смещения не оказывает заметного влияния на форму тока ионного пучка. Осциллограммы ионного тока на коллекторе показывают ряд особенностей. Как видно из рисунка, осциллограммы характеризуются заметной зависимостью амплитуды импульса ионного тока от потенциала смещения. При амплитуде потенциала смещения 2,4 кВ ток составлял приблизительно 0,6 А, а при уменьшении потенциала смещения до 0,9 кВ амплитуда тока уменьшалась до 0,27 А.

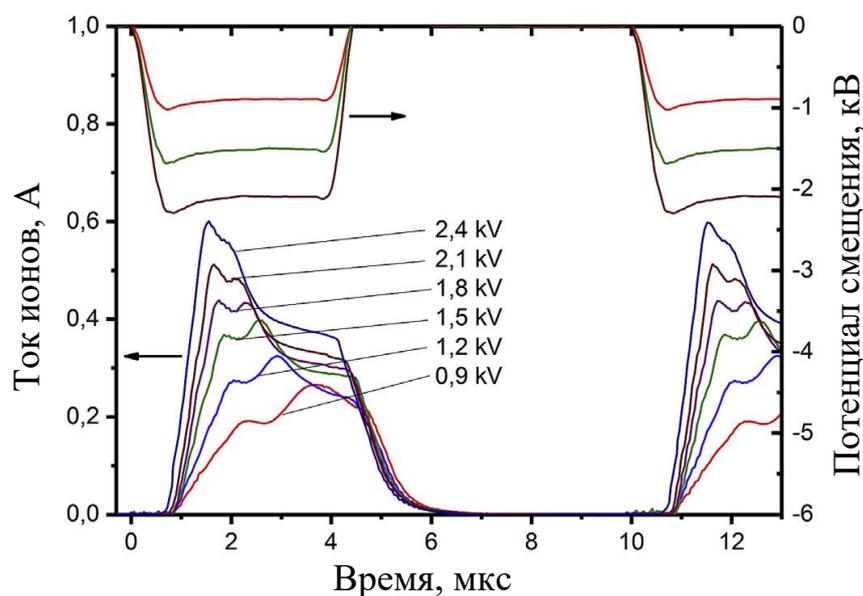


Рисунок 1.6 – Осциллограммы импульсов смещения и тока пучка ионов азота в зависимости от амплитуды смещения при частоте импульса 100 кГц и длительности импульса 4 мкс.

Осциллограммы демонстрируют смещение переднего края импульса тока влево относительно края импульса напряжения. В представленных экспериментах пучки ионов азота формировались с задержкой ионного тока в диапазоне 0,7–0,8 мкс. Одним из основных факторов, влияющих на смещение импульса тока относительно напряжения смещения, является то, что ионы, из полученные из плазмы, не претерпели полной разности потенциалов при начальном моменте формирования пучка. Это повлияло на уменьшение энергии ионов, а, следовательно, увеличилось время взаимодействия их с коллектором. Экспериментальные исследования, проведенные в работе [11] с помощью спектрометра времени полета с погружением в плазму, показали, что время формирования оболочки при плотности тока насыщения ионами из плазмы в несколько миллиампер на квадратный сантиметр при потенциалах смещения приблизительно 1,5 кВ может достигать 0,5 мкс.

Процессы переноса ионного пучка к коллектору, очевидно, влияют на задержку ионного тока относительно импульса напряжения смещения и формирование переднего фронта импульса тока. Поскольку пучок транспортировался от сетчатого электрода к коллектору, расположенному в фокусе сферического сетчатого электрода, время прохождения пучка можно оценить, как $\tau = \frac{R}{v_i}$, где R -фокусное расстояние системы формирования пучка, а v_i - скорость ионов. Выражение для скорости однозарядных ионов в пучке $v_i = \sqrt{\frac{2eU}{m_i}}$, где e - элементарный заряд, U - напряжение смещения и m_i - масса иона. Для амплитуд потенциала смещения 1,2, 1,5 и 2,1 кВ расчетные времена прохождения атомарных ионов азота составляют 0,6, 0,5 и 0,4 мкс соответственно. Таким образом, образование оболочки и транзит ионного пучка в дрейфовом пространстве обеспечивают задержку импульса ионного тока, наблюдаемую в экспериментах.

В работе [10] была показана возможность стабильного формирования аксиально-симметричных пучков ионов газов с длительностью импульсов от 2 до 80 мкс с плотностью тока до сотен mA/cm^2 , рисунок 1.7.

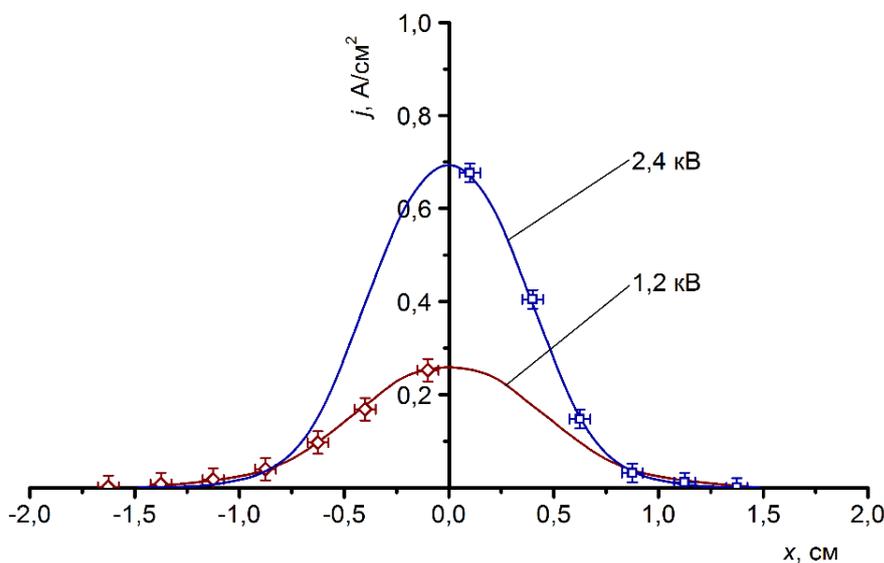


Рисунок 1.7 – Радиальные распределения плотности ионного тока по сечению пучка ионов азота с энергией ионов 1,2 и 2,4 кэВ в плоскости коллектора. [10]

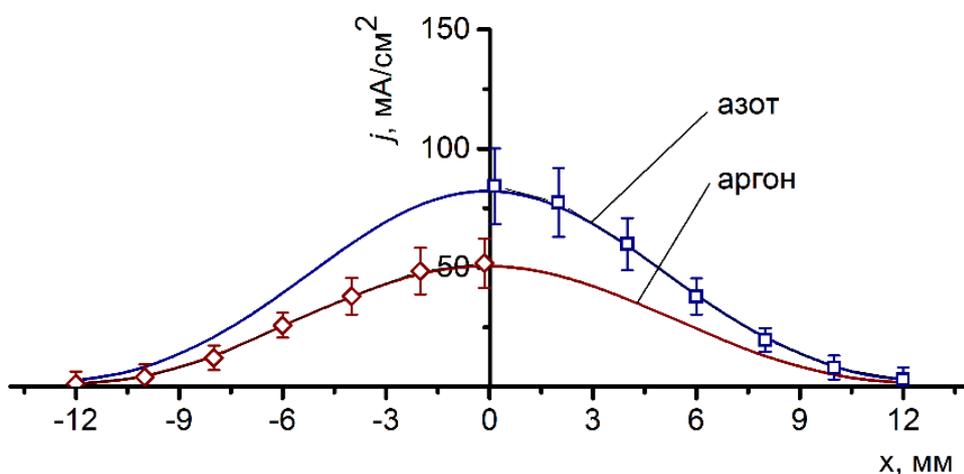


Рисунок 1.8 – Распределение плотности ионного тока (j) по сечению пучков ионов азота и аргона [12]

Помимо аксиально-симметричных пучков возможно формирование ленточных импульсно-периодических пучков ионов. В работе [12] показано формирование пучков ионов азота и аргона низкой энергии с максимальной амплитудой тока 1.3 А и 0.8 А соответственно. Результаты работы подтвердили

возможность стабильной фокусировки пучка на протяжении всего импульса потенциала смещения вплоть до 80 мкс. Отличительной особенностью ленточных пучков является меньшая величина плотности тока в противовес большой площади области обработки материала, что может быть весомо в производственных масштабах, рисунок 1.8.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ

2.1 Экспериментальная установка

Для формирования пучков ионов металлов использовались аксиально-симметричные вакуумно-дуговые генераторы плазмы, работающие как при импульсном, так и при непрерывном вакуумно-дуговом разряде. В плазменно-иммерсионном варианте экстракции ионного пучка на выходе вакуумно-дугового испарителя, установленного непосредственно на боковом фланце вакуумной камеры, устанавливался сеточный экстрагирующий электрод в форме части сферы радиусом 10 см. Этот электрод устанавливался на замкнутой цилиндрической системе, образующей эквипотенциальное пространство дрейфа для ионного пучка. Схема плазменно-иммерсионного формирования пучка представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема плазменно-иммерсионного формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов

С генератора импульсного напряжения потенциал смещения отрицательной полярности прикладывался непосредственно к системе формирования, погруженной в плазму. Между импульсами потенциала смещения в режиме непрерывного формирования плазмы дуговым разрядом поток металлической плазмы, имеющий направленную скорость, заполнял пространство дрейфа.

На рисунке 2.2 Можно выделить четыре основных комплексных элемента установки, а именно: экспериментальная вакуумная камера, источник плазмы, система формирования высокоинтенсивных пучков ионов и система детектирования сигналов.

Для получения и поддержания вакуума в экспериментальной установке использовалась система откачки, состоящая из спирального безмасляного форвакуумного насоса марки «ISP-1000» со скоростью откачки 1000 л/мин и высоковакуумного турбомолекулярного насоса марки «Turbo-V 1000 Navigator» со скоростью откачки 1000 л/с.

Для управления и контроля в системе откачки использовались ионизационный (P2) и термопарные (P1, P3) вакуумметры, а также вакуумный затвор (VT) и клапаны (VR1-3).

Давление остаточной атмосферы в рабочем объеме вакуумной камеры перед началом экспериментов составляло не менее 10^{-3} Па.

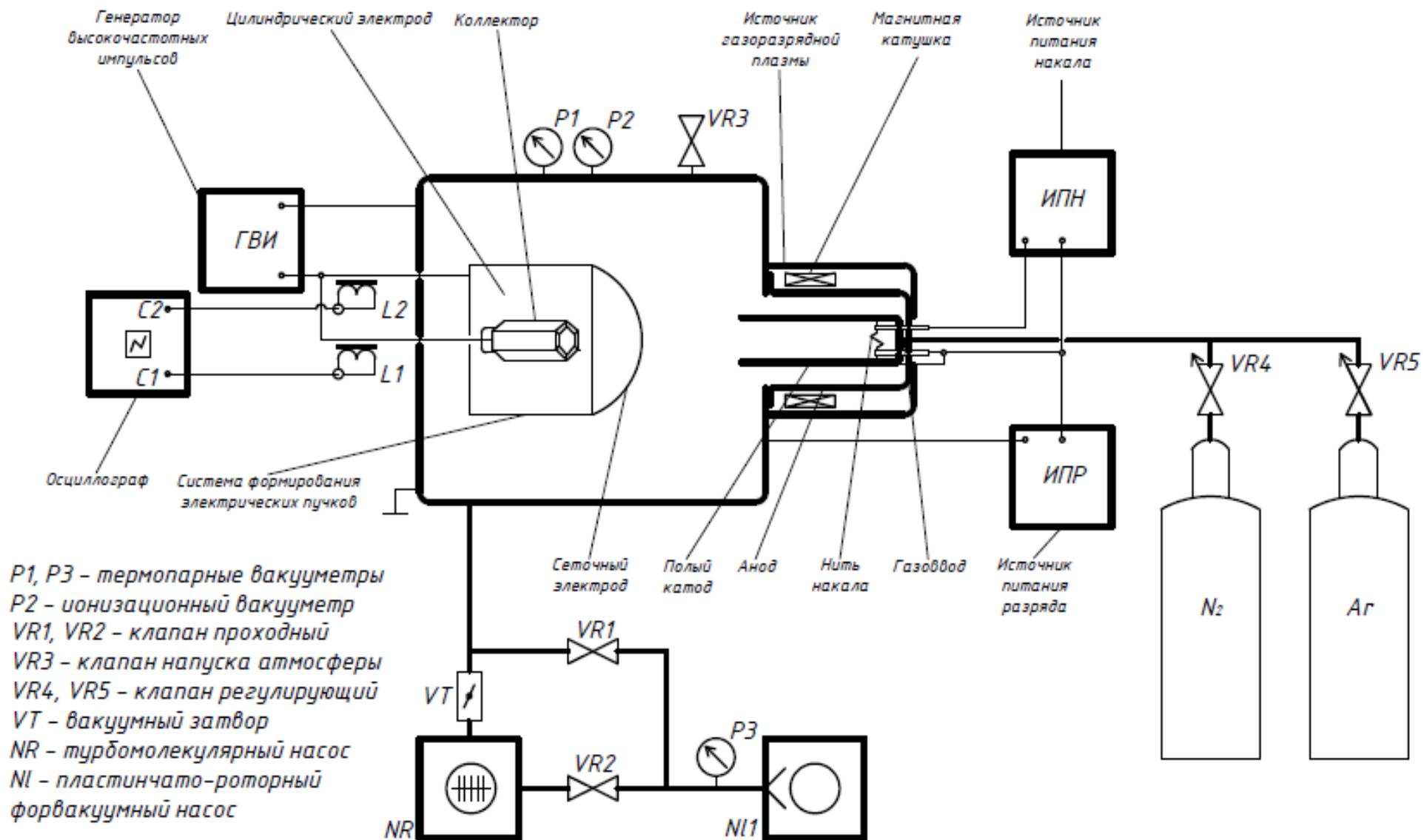


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки

2.2. Источник газовой плазмы

В качестве генератора газовой плазмы использовался источник непрерывной газоразрядной плазмы «PINK», который представляет собой плазмогенератор на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом.

На рисунке 2.3 приведена схема плазмогенератора, присоединённого к заземленному корпусу вакуумной камеры. На водоохлаждаемом корпусе плазмогенератора смонтированы два водоохлаждаемых электрода для питания прямонакального катода. Цилиндрический полый катод закреплен на вакуумной стороне корпуса. Анодом являются стенки вакуумной камеры.

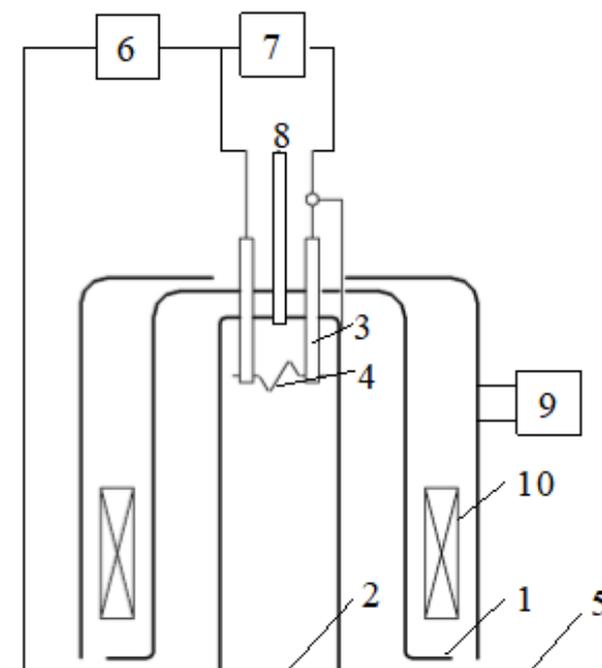


Рисунок 2.3 – Упрощенная конструкция генератора плазмы «ПИНК»: 1 - водоохлаждаемый корпус плазмогенератора, 2 - цилиндрический полый катод, 3 – электроввод, 4 - накаливаемый катод, 5 - анод (стенки вакуумной камеры), 6 - источник питания разряда, 7 - источник питания накала, 8 - газовый ввод, 9 - источник питания магнитной катушки, 10 –магнитная катушка

Катод выполнен из вольфрамовой проволоки диаметром 2-3 мм, длиной 180 мм, изогнутой в виде буквы “М”. Катодный узел плазмогенератора

изолирован от его корпуса диэлектрическим фланцем и находится под катодным потенциалом. Рабочий газ в плазмогенератор подается штатным накателем через газовый ввод [30].

Эмитируемые накаленным катодом электроны движутся вдоль силовых линий магнитного поля в направлении анода, роль которого выполняют заземленные стенки вакуумной камеры. Так как напуск рабочего газа производится в катодную полость с давлением порядка 10^{-1} Па, то вблизи накаленного катода создается область повышенного давления. Наличие потока ускоренных электронов, траектории которых удлиняются за счёт магнитного поля, и области с повышенной концентрацией молекул рабочего газа, облегчают зажигание и горение несамостоятельного дугового разряда при низких давлениях. Разряд существует между катодом, которым являются как накаленная катодная нить, так и соединенная с ней катодная полость, и полым анодом с площадью, равной площади внутренней поверхности вакуумной камеры. Плазма, генерируемая таким разрядом, заполняет анодную полость, являясь рабочей средой для системы формирования высокоинтенсивных пучков ионов.

2.3 Система формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота

Фокусирующий сеточный электрод был выполнен из сетки из нержавеющей стали с размером ячейки сетки $1,8 \times 1,8$ мм² и прозрачностью 65%. Система устанавливалась в рабочей камере вдоль оси цилиндрического полого катода плазмогенератора на расстоянии 110 и 240 мм между полым катодом и вершиной сеточного электрода системы формирования пучка. Эквипотенциальное пространство для транспортировки и баллистической фокусировки пучка ограничивалось цилиндрическим сплошным электродом.

Для регистрации ионных токов на систему формирования и на коллекторном узле использовались два калиброванных пояса Роговского.

Импульсные сигналы с поясов Роговского измерялись цифровым четырёхканальным осциллографом LeCroy Waverunner 6050A. Внешний вид передней панели осциллографа представлен на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Внешний вид осциллографа LeCroy Waverunner 6050A

С целью получения статистически достоверных результатов, осциллограммы импульсных сигналов с поясов Роговского усреднялись по 200 импульсами математическим аппаратом осциллографа.

2.4 Подготовка образцов

В качестве материала для ионной имплантации азота была выбрана конструкционная легированная сталь марки 12Х18Н10Т, которая, как правило, показывает хорошее улучшение свойств после азотирования.

Исходная подготовка образцов перед имплантацией заключалась в их нарезке размерами 14 мм в ширину, 65 мм в длину и толщиной 1,5 мм, на станке «Brilliant 201» (рисунок 2.5). В процессе резки применялось водяное охлаждение. В качестве материала отрезного круга использовался карбид кремния SiC.



Рисунок 2.5 – Отрезной станок Brilliant 201

В последствии образцы подвергались полировке на шлифовально-полировальной машине Saphir 320 при помощи наждачной бумаги с размерами зёрен абразива от 40 до 3,5 мкм (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – шлифовально-полировальная машина Saphir 320



Рисунок 2.7 – Коллектор

В экспериментах использовался коллектор сложной формы, на котором закреплялось 6 образцов в виде шестигранной полой фигуры, рисунок 2.7.

2.5 Методики исследований ионно-легированных образцов

Исследования поверхности (микроструктуры и кратеров ионного распыления) образцов после высокоинтенсивного ионного легирования азота проводились с помощью оптического бесконтактного трехмерного профилометра «STIL 3D Micromesure», показанной на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Оптический бесконтактный трехмерный профилометра «STIL 3D Micromesure»

Определения распределения азота по глубине в приповерхностном слое стали проводились с помощью растрового электронного микроскопа «Hitachi S-3400 N» с энергодисперсионной приставкой «Bruker XFlash 4010». Установка показана на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – растровый электронный микроскоп «Hitachi S-3400 N»

Для исследования распределения азота в стали по глубине при помощи растрового электронного микроскопа «Hitachi S-3400 N» предварительно была проведена подготовка образцов. Их разрезали поперек центра отпечатка ионного пучка электроискровой резкой. Затем эпоксидной смолой образцы заливались в специальной оснастке. После поперечная поверхность шлифовалась и полировалась.

Прибор CALOTEST предназначен для измерения толщины нанесённых плёнок на различные виды материалов. В данной работе предполагается провести измерение ионно-модифицированного слоя образца стали марки 12X18H10T после высокоинтенсивной имплантации ионов азота. Проведение исследования осуществлялось на установке, показанной на рисунке 2.10.

На рисунке 2.10 изображен внешний вид установки CSEM CALOTEST. Экспериментальный образец устанавливается на подложке и закрепляется настольными тисками 6 так, чтобы плоскость образца была параллельна валу 4,

вращающему шар. Шар расположен под углом от 35° до 40° по отношению к плоскости образца как на рисунке 2.11.

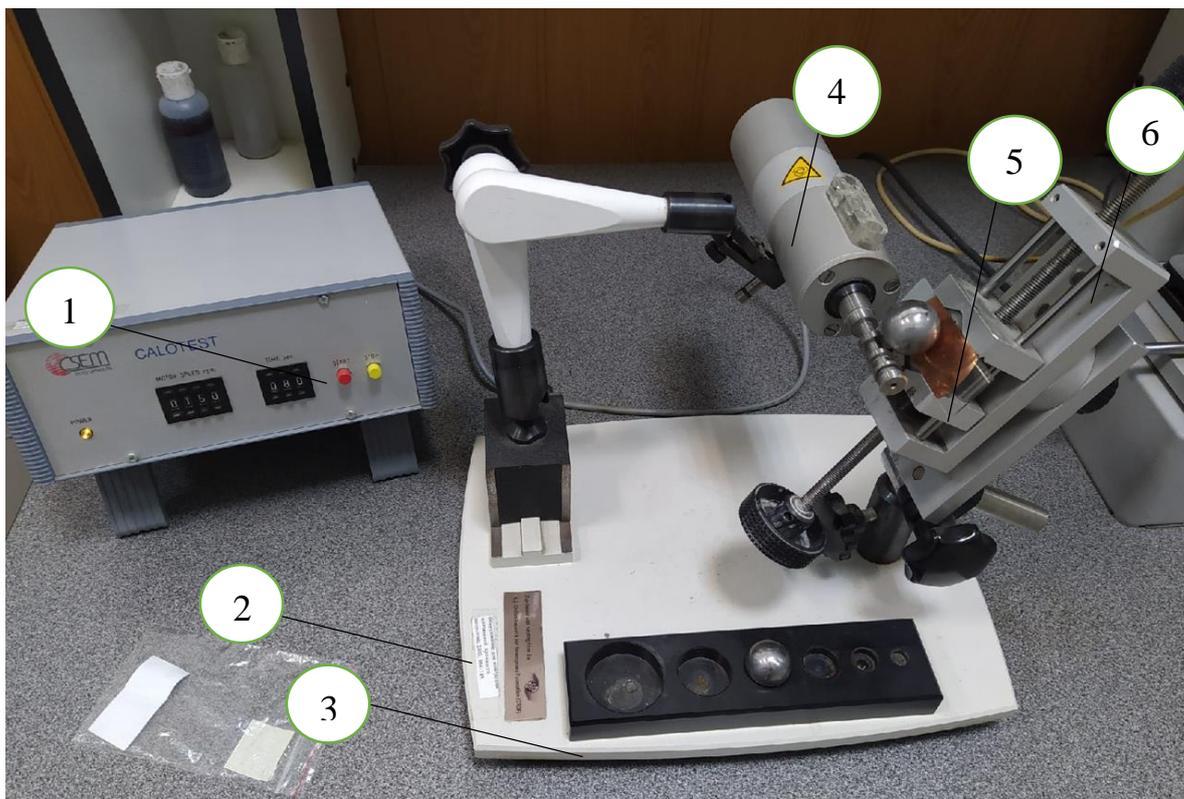


Рисунок 2.10 – Внешний вид установки CALOTEST: 1- электронный интерфейс, 2- опорная плита, 3- подставка с шарами различного диаметра, 4- мотор и крутящийся вал, 5- образец, 6- настольные тиски

При помощи электронного интерфейса 1 происходит настройка скорости и времени вращения вала. На подставке 3 расположены шары разных диаметров.

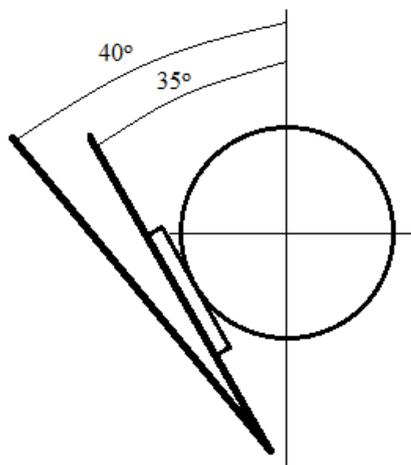


Рисунок 2.11 – Схема расположения шара на подложке

2.6 Методика определения толщин ионно-модифицированного слоя прибором CALOTEST

Измерительный прибор CALOTEST используется для определения толщин одно или многослойных систем при помощи удаления приповерхностной области исследуемого образца шаром с определённым диаметром D . Шар, с предварительно нанесённой на его поверхность алмазной суспензией, вращаясь, постепенно истирает поверхность образца, оставляя шлиф с диаметром D , как показано на рисунке 2.12.

S - это толщина исследуемого слоя:

$$s = T - t. \quad (2.1)$$

T - общая глубина срезанного шлифа, t - это глубина удалённого слоя матричного не модифицированного материала.

Исходя из рисунка 3, общая глубина срезанного шлифа геометрически может быть определена по формуле:

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

где R - радиус шара,

Из рисунка 2.12 видно, что глубина модифицированного слоя будет зависеть от двух переменных x и y , которые в свою очередь определяются диаметрами d и D .

Глубина погружения шара в образец может быть рассчитана по формуле:

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

Следовательно, исходя из (3), уравнение 1 примет вид:

$$s = \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{4R^2 - d^2} - \sqrt{4R^2 - D^2}) \quad (2.4)$$

Тогда окончательно получим выражение (5), если выразить $d \leftrightarrow R$ и $D \leftrightarrow R$,

$$s = \frac{xy}{2R} \quad (2.5)$$

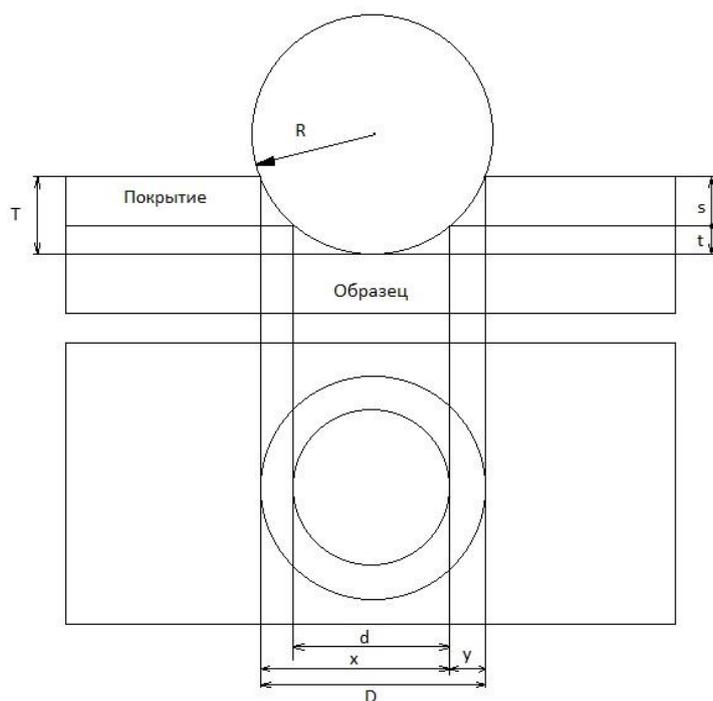


Рисунок 2.12 – Шлиф образца в профиль и сверху, где d - минимальный диаметр шлифа модифицированного слоя, D - максимальный диаметр шлифа модифицированного слоя, y - разность между радиусами внешней и внутренней окружности.

3 ВЫСОКОИНТЕНСИВНАЯ ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ИОНОВ ТИТАНА И АЗОТА

3.1 Формирование пучка ионов металлов

Низкоэнергетическая высокоинтенсивная ионная имплантация обеспечивает возможность формирования ионно-легированных слоев в металлах и сплавах на глубинах в десятки и сотни микрометров [1,5]. Сверхвысокодозовая имплантация ионов низкой энергии сопровождается значительным ионным распылением облучаемой поверхности. При флюенсах ионного облучения превышающих 10^{21} ион/см² толщина ионно-распыленного слоя может превышать 100 микрометров. При распылении поверхностного слоя мишени распыляется как матричный материал, так и имплантированная примесь, что приводит к снижению эффективности накопления легирующих примесей и уменьшению глубины ионно-легированного слоя. Один из вариантов решения проблемы значительного ионного распыления поверхности может быть основан на высокоинтенсивной имплантации при сверхнизкой энергии ионов, когда ионное распыление минимизировано и обеспечивает только динамическую очистку облучаемой поверхности от загрязнения оксидами и карбидами.

В данной работе представлены результаты исследования закономерностей формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой и сверхнизкой энергии с использованием плазмы импульсного и непрерывного вакуумного дугового разряда. Исследованы особенности и закономерности формирования пучков с односеточной системой экстракции и баллистической фокусировки ионов в пространстве дрейфа при амплитудах потенциалов смещения в диапазоне от 50 до 2000 В. Описаны закономерности подавления электронного тока в ускоряющем зазоре при традиционном формировании ионного пучка односеточным электродом с ускоряющим

напряжением, приложенным к генератору плазмы. Изучено влияние размеров ячеек сеток в диапазоне от 100 до 500 мкм, предварительной инжекции плазмы в пространство дрейфа и «электронного душа» на эффективность транспортировки и баллистическую фокусировку высокоинтенсивных пучков ионов титана низкой и сверхнизкой энергии.

Сравнительные экспериментальные исследования выполнены с использованием сеточных электродов с размерами ячейки сетки 100 и 500 мкм выявили следующее. При использовании сеточного электрода с размером ячейки сетки 100 мкм эффективность транспортировки ионного пучка была примерно на 20% выше при малых потенциалах смещения 200-400 В. Однако, в процессе исследований выяснилось, что мелкоструктурный сеточный электрод имеет два существенных недостатка. Во-первых, такой сеточный электрод плохо сохраняет форму и при высоких частотах следования импульсов потенциалов смещения в результате нагрева сетки имеет место значительная деформация и изменение фокусирующих свойств сферического электрода. Во-вторых, выяснилось, что даже с титановой вакуумно-дуговой плазмой имеет место быстрое изменение прозрачности сеточного электрода за счет осаждения микрокапель вакуумной дуги по размерам сравнимым с размерами ячеек сетки. Качественно результаты исследований на сетках с разным размером ячеек существенно не отличались.

Используя сеточный электрод с размером ячейки сетки 500 мкм, первоначально были проведены эксперименты с коллектором диаметром 19 см, установленным на расстоянии, соответствующем радиусу сеточного электрода. На рисунке 3.1 представлены осциллограммы ионного тока на коллектор, полученные при различных напряжениях смещения. При длительности импульса смещения 10 мкс транспортировка ионного пучка до коллектора была достаточно эффективной даже при напряжении смещения 0.2 кВ. Ионный ток более 1А регистрировался при напряжении 1.4 кВ, а при снижении ускоряющего напряжения до 0.2 кВ максимальная амплитуда регистрируемого тока ионов титана снижалась до 0.7 А.

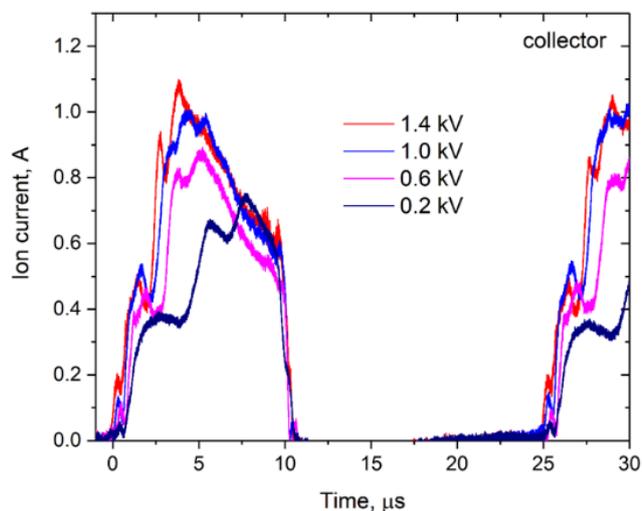


Рисунок 3.1 – Ионный ток на коллекторе диаметром 19 см, длительность импульса смещения 10 мкс

Принимая во внимание особенность формирования импульсно-периодических пучков ионов большой длительности [6], обусловленную динамическим уменьшением амплитуды регистрируемого ионного тока на коллекторе при длительностях импульса более 10-15 мкс были проведены эксперименты с тем же диаметром коллектора, но при длительности импульса потенциала смещения 30 мкс. Результаты исследования представлены на рисунке 3.2.

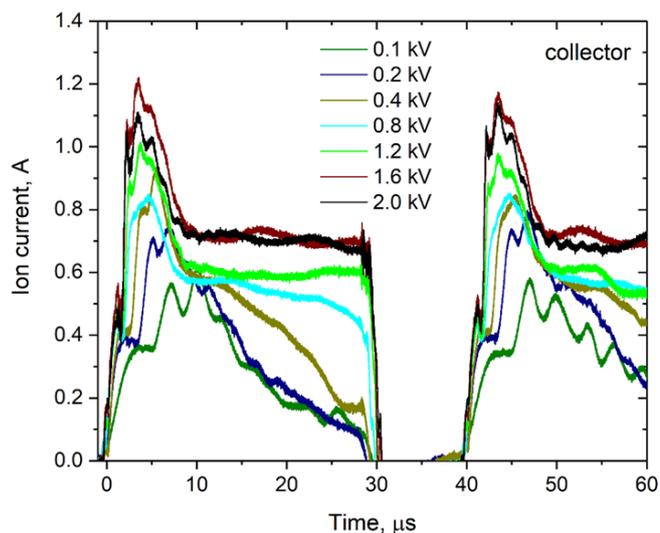


Рисунок 3.2 – Ионный ток на коллекторе диаметром 19 см при длительности импульса потенциала смещения 30 мкс

Осциллограммы рисунка 3.2 очевидно демонстрируют существенное уменьшение ионного тока на коллектор по мере уменьшения амплитуды

потенциала смещения при длительностях импульса превышающих 10 мкс. Очевидно, что при больших длительностях потенциала смещения происходит декомпенсация пространственного заряда ионного пучка в пространстве дрейфа из-за ухода электронов в ускоряющий зазор через ячейки сетки.

На ухудшение условий нейтрализации пространственного заряда пучка оказывает влияние два фактора. Во-первых, при уменьшении напряжения смещения пропорционально уменьшается скорость ионов в пучке, что сопровождается увеличением плотности ионов и как следствие необходимостью иметь более высокую плотность плазмы в пространстве дрейфа для обеспечения эффективной нейтрализации пространственного заряда пучка. С другой стороны, при малых потенциалах смещения инжектируемый в пространство дрейфа ионный пучок формирует меньшие электрические поля, выталкивающие плазменные ионы из области дрейфа пучка и как следствие увеличивается время компенсации пространственного заряда пучка. В результате по мере уменьшения амплитуды потенциала смещения наблюдается значительное затягивание переднего фронта импульса ионного тока.

Осциллограммы тока ионного пучка на коллектор диаметром 1.15 см (площадь около 1 см^2) установленный на расстоянии на 1.5 см больше чем радиус сеточного электрода представлены на рисунке 3.3. Характерная особенность осциллограмм заключается в значительном затягивании переднего фронта импульса тока, что определяется процессами нейтрализации пространственного заряда ионного пучка и динамикой его фокусировки. При потенциале смещения -0.6 кВ максимальная плотность ионного тока составляет около 75 мА/см^2 . Такая плотность достигается через 15 мкс от момента приложения потенциала. В дальнейшем плотность ионного тока достаточно быстро уменьшается.

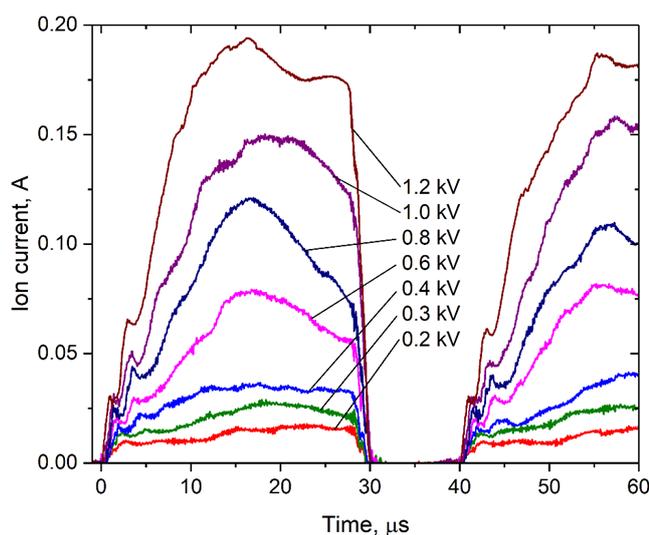


Рисунок 3.3 – Ионный ток на коллекторе диаметром 1,15 см

Эксперименты с дополнительным электронным облаком сформированным с помощью вольфрамового термоэмиттера электронов, расположенного по оси системы транспортировки ионного пучка показали (рис. 3.4) , что при всех потенциалах смещения амплитуда ионного тока на коллекторе диаметром 1.15 см быстро достигает максимума и удерживается в течение всей длительности импульса.

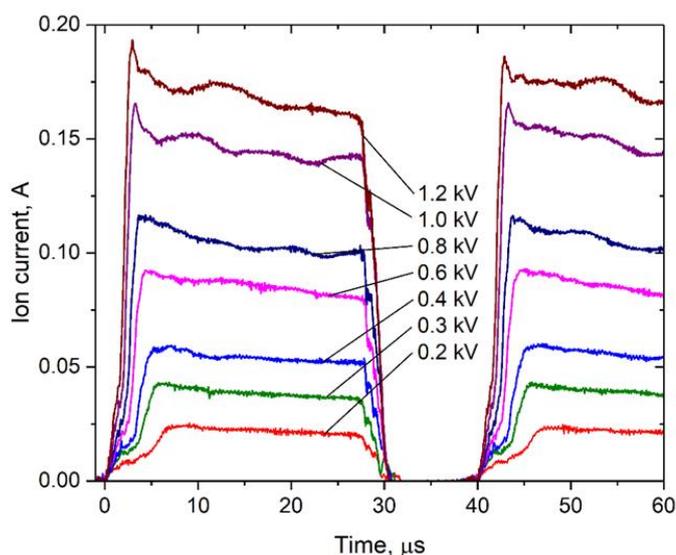


Рисунок 3.4 – Ионный ток на коллекторе диаметром 1,15 см в условиях применения дополнительного термоэмиттера электронов

Максимальная амплитуда ионного тока не существенно отличается от случая когда дополнительный термоэмиттер электронов не использовался.

3.2 Воздействие пучка на поверхность сложной формы

Перед непосредственным исследованием взаимодействия пучков ионов азота с поверхностью твёрдого тела, были проведены предварительные исследования с целью определения оптимальных параметров облучения мишени и подтверждения возможности получения пучка ионов азота с плотностью ионного тока не менее нескольких десятков мА/см² при энергии пучка ионов равной 1.4 кэВ.

В таблице 1 приведены режимы по формированию высокоинтенсивных пучков ионов азота в условии компенсации ионного распыления за счёт осаждения материала. Параметры, изменяющиеся в ходе исследования: ток разряда, расстояние между задней стенкой цилиндрического электрода и коллектора l , расстояние между выходом плазмогенератора и вершиной сеточного электрода h . Опираясь на работу [2], увеличение тока разряда и уменьшение расстояния h способствовало увеличению плотности плазмы, достигаемой до коллектора, что увеличивало средний ионный ток на коллекторном узле. В данной работе была достигнута амплитуда ионного тока на коллекторе порядка 0.20 А. Основываясь на работе [3], имело смысл варьировать расстояния l для определения наилучшей точки фокусировки пучка при конкретных размерах образцов и системы формирования пучка. Изменение коэффициента импульса было необходимо для предотвращения перегрева образцов. Перегрев образцов, то есть превышение оптимальной температуры имплантации, способствует росту зёрен поликристаллической мишени, что негативно сказывается на механических характеристиках, исследуемых образцов [4]. В работе давление рабочего газа и частота импульсов оставались постоянными и равнялись 0.6 Па и 40 кГц соответственно.

Таблица 1. Основные режимы формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота в условиях компенсации распыления осаждением материала

Серия, №	Ток разряда, А	Расстояние l , мм	Расстояние h , мм	Коэффициент заполнения импульса, %
1	от 30 до 50	35	240 и 110	40
2	50	от 70 до 5	110	40
3	30	5	110	от 20 до 40

Результаты предварительных экспериментов показали, что наилучшие условия для формирования и фокусировки пучка, а также получение максимальной амплитуды ионного тока пучка, наблюдались при следующих параметрах: расстояние между задней стенкой цилиндрического электрода и коллектора $l = 5$ и расстояние между выходом плазмогенератора и вершиной сеточного электрода $h = 110$ мм. Поэтому дальнейшие исследования проводились при данных параметрах.

В работе по исследованию оптимальных параметров эксперимента, большой уклон вёлся на температуру поверхности образцов. В отличие от модификации металлов пучками ионов титана, где наибольшая глубина легирования примеси наблюдалась при температуре поверхности образца 823 К, как было показано в работе [5], оптимальная температура обработки нержавеющей стали пучками ионов азота для глубинного легирования составляет порядка 500 К [6]. Для контроля температуры поверхности образцов при облучении, к задней части образца устанавливалась термопара. Для обеспечения одной и той же дозы облучения при смене коэффициента заполнения импульса, время обработки материала также изменялось пропорционально, таблица 2. Опираясь на представленную выше оптимальную температуру имплантации азота в нержавеющую сталь и представленные результаты в таблице 2, видно, что оптимальным коэффициентом заполнения

импульсов, более подходящим по температурному режиму, с теоретической точки зрения, является 30%.

Таблица 2. Результаты третьей серии экспериментов

Коэффициент заполнения импульса, %	Средняя температура на коллекторе, °С	Время обработки, мин
20	410 ± 10	120
30	565 ± 10	80
40	800 ± 10	60

Средняя амплитуда ионного тока на коллекторном узле оценивалась через осциллограммы ионного тока. На рисунке 3.5 представлена осциллограмма ионного тока на коллекторном узле при коэффициенте заполнения импульсов 20%.

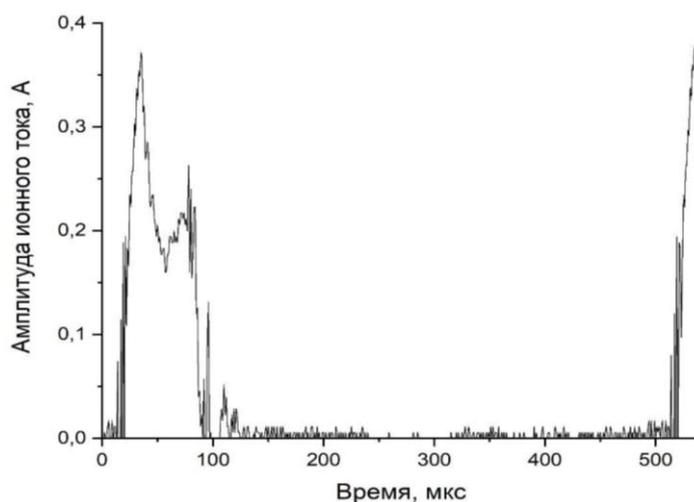


Рисунок 3.5 – Осциллограмма ионного тока на коллекторном узле при коэффициенте заполнения импульса 20% при амплитуде потенциалов смещения на сетке -1.4 кВ, токе разряда 30 А, расстояния $l = 5$ мм, $h = 110$ мм, частота 40 кГц и давления в камере 0.6 Па

Из представленной осциллограммы видно, что средняя амплитуда ионного тока на коллекторе составляет порядка 20 мА.

Для оценки распыления образцов в условиях отсутствия компенсации распыления, был проведён эксперимент, где из 6 образцов оставалось всего 2, где к одному образцу была установлена термопара хром-алюмель для оценки температуры поверхности образцов, а второй образец являлся исследовательским.

Эксперимент проходил по схеме третьей серии экспериментов, таблица 1, при коэффициенте заполнения импульсов 20%. Перед экспериментом было проведено предварительное исследование поверхности образца для дальнейшего сравнения с результатами после эксперимента. Данное предварительное исследование было проведено для минимизации вклада кривизны образца в определение глубины образования кратера.

На рисунке 3.6 представлено изображение поверхности исследуемого образца, полученное на профилометре до и после проведения эксперимента по распылению образца без условия компенсации распыления.

Для исследования формы кратеров ионного распыления, в условиях отсутствия компенсации распыления были получены профили поверхности до и после проведения эксперимента, рисунок 3.7. Предварительное исследование поверхности показало изначальный изгиб образца с имитацией кратера глубиной до 40-45 мкм. После проведения эксперимента, можно наблюдать увеличение кратера вплоть до 100 мкм, что говорит о распылении поверхности образца примерно на 60 мкм за время эксперимента 120 минут. Для лучшей оценки распыления, по полученным профилям был взят интеграл и получена площадь распыления, которая составила 1.13 мм² по профилю предварительного исследования и 2.86 мм² по профилю после проведения эксперимента, что в 2.5 раза больше изначального значения.

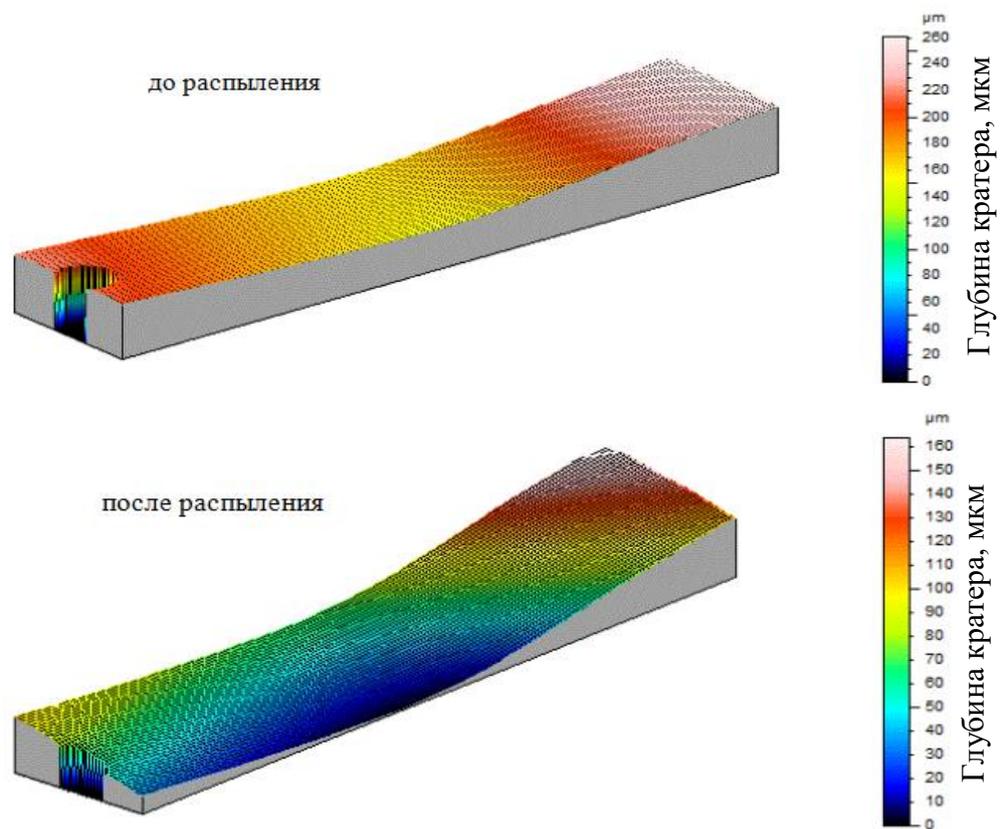


Рисунок 3.6 – Поверхность исследуемого образца до и после ионного распыления при коэффициенте заполнения импульса 20% при амплитуде потенциалов смещения на сетке -1.4 кВ, токе разряда 30 А, расстояния $l = 5$ мм, $h = 110$ мм, частота 40 кГц и давления в камере 0.6 Па

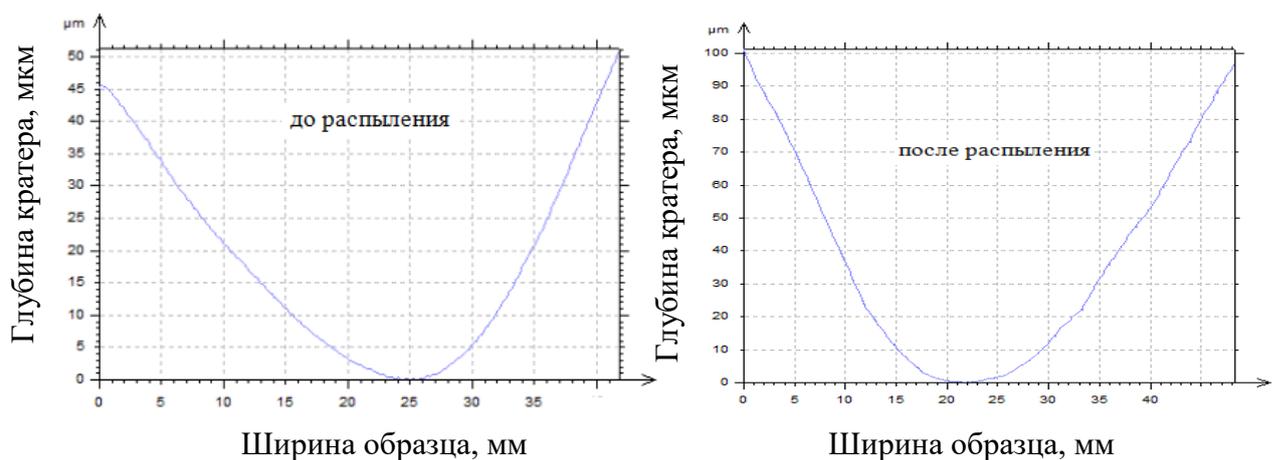


Рисунок 3.7 – Профили поверхности исследуемого образца до и после ионного распыления при коэффициенте заполнения импульса 20% при амплитуде потенциалов смещения на сетке -1.4 кВ, токе разряда 30 А, расстояния $l = 5$ мм, $h = 110$ мм, частота 40 кГц и давления в камере 0.6 Па

Следующей частью работы было исследование компенсации ионного распыления за счёт осаждения материала в рамках геометрии расположения образцов.

Для исследования формы кратеров ионного распыления на поверхности образца, в условии компенсации распылённого материала за счёт осаждения, и оценки площади профиля распыления были получены профили поверхности и взят интеграл по всей ширине кратера, рисунок 3.8.

Из представленных результатов видно, что наибольшая глубина кратера 10.6 мкм, соответствующая площадь унесённого материала 0.271 мм² наблюдались при коэффициенте заполнения импульса 20% и времени обработки 120 минут. Наименьшая глубина кратера 2.1 мкм с соответствующей площадью унесённого материала 0.029 мм² наблюдалась при коэффициенте заполнения импульса 30%, что соответствовало времени обработки 80 минут.

Таким образом, можно судить о наилучшей компенсации ионного распыления при режиме с коэффициентом заполнения импульса 30%.

Сравнение результатов экспериментов в условии компенсации ионного распыления и его отсутствия, можно видеть, что в случае геометрии расположения образцов, наблюдается существенное уменьшение образования кратера распыления, что говорит о реальной возможности компенсации распыления.

Для исследования глубины легирования примеси, представленных образцов, были получены профили концентрации в зависимости от глубины. На рисунке 3.9 представлены концентрационные профили азота в образце по глубине при коэффициентах 20, 30 и 40%. По представленным концентрационным профилям видно, что преимущественно, наибольшая глубина легирования примеси, примерно 8 мкм, наблюдалась на расстоянии 2 см от края образца (красная кривая). Наибольшая поверхностная концентрация, 26-27 ат.%, наблюдалась при коэффициенте заполнения импульса 30%.

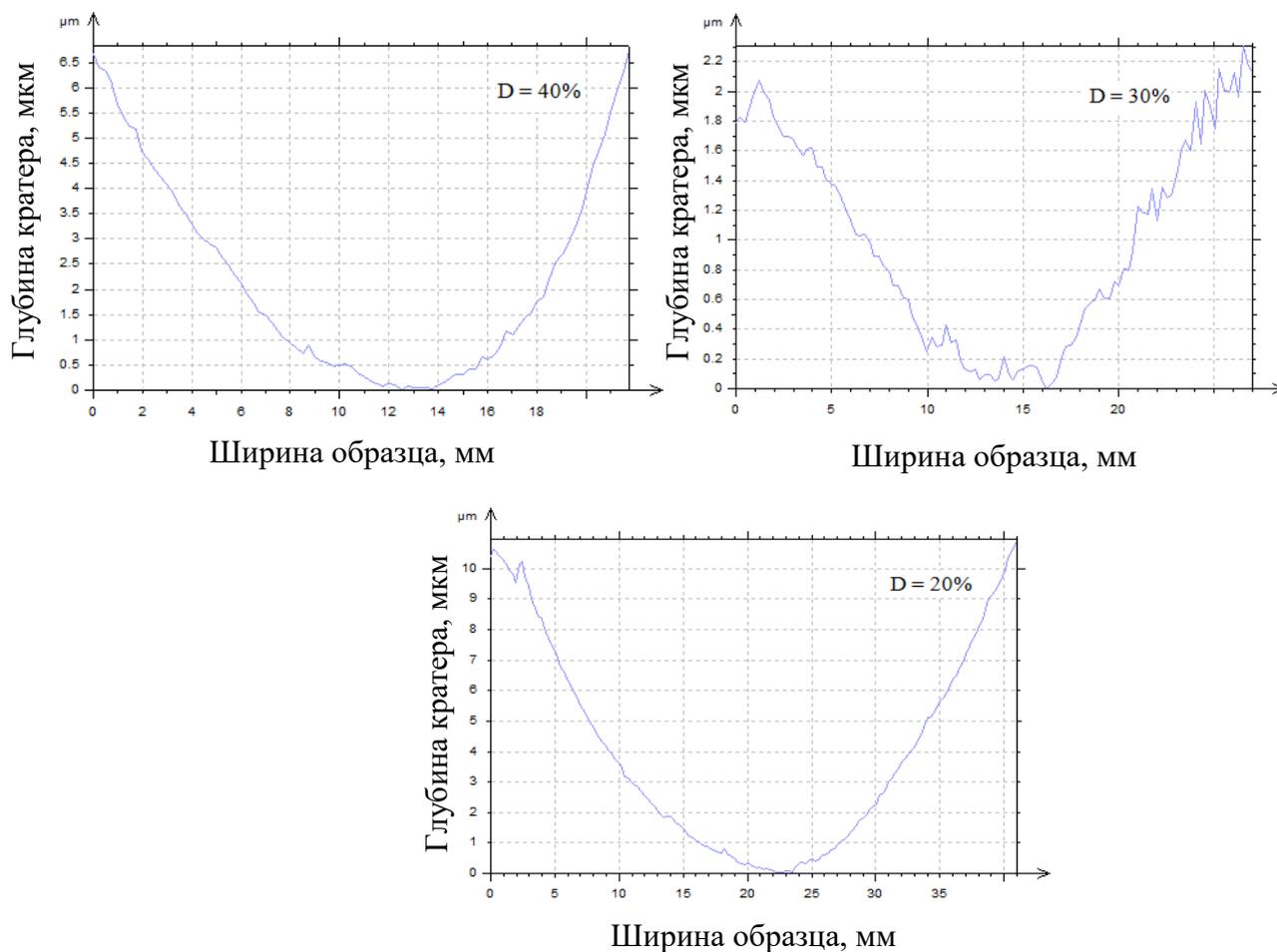


Рисунок 3.8 – Профили поверхности образцов после бомбардировки пучками ионов азота при коэффициенте заполнения импульсов 20, 30 и 40 в условиях компенсации ионного распыления, при токе разряда 30 А

С целью увеличения плотности плазмы, ток разряда было решено увеличить до 50 А, что должно было поспособствовать увеличению количества эмитируемых электронов с поверхности катода и последующей ионизации рабочего газа. Увеличение плотности генерируемой плазмы должно было поспособствовать увеличению количества, фокусируемых ионов на коллекторный узел.

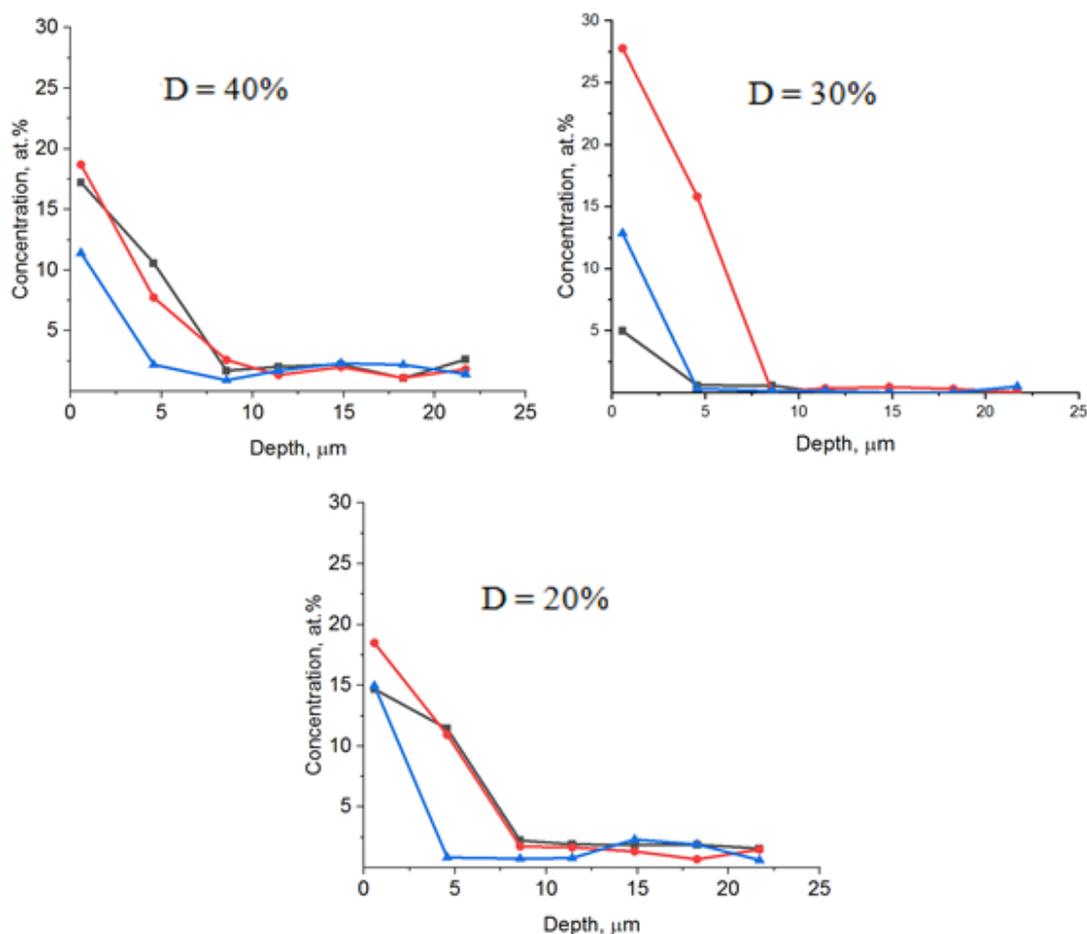


Рисунок 3.9 – Концентрационные профили азота в нержавеющей стали при коэффициенте заполнения импульсов 20, 30 и 40% в условиях компенсации ионного распыления, при токе разряда 30 А. Чёрной линией отмечен край образца, красной – 2 см от края, синей – 4 см от края образца

Увеличение числа ионов на коллекторном узле должно было способствовать большей дозе облучения за тот же промежуток времени. Большие дозы способствуют увеличению диффузии за счёт градиента концентрации примеси, то есть глубина имплантации должна увеличиться. На рисунке 3.10 представлен концентрационный профиль азота в образце по глубине после увеличения тока разряда, при коэффициенте заполнения импульса 40%. На профиле видно значительное увеличение глубины имплантации от ранее 8-9 мкм до 18-20 мкм на расстоянии 2 см от края образца с максимальной поверхностной концентрацией 25 ат.%. Также можно отметить существенное увеличение концентрации примеси по глубине, в сравнении с

предыдущими экспериментами, с краю образца и на расстоянии 4 см, что говорит о лучшем пространственном распределении примеси по образцу.

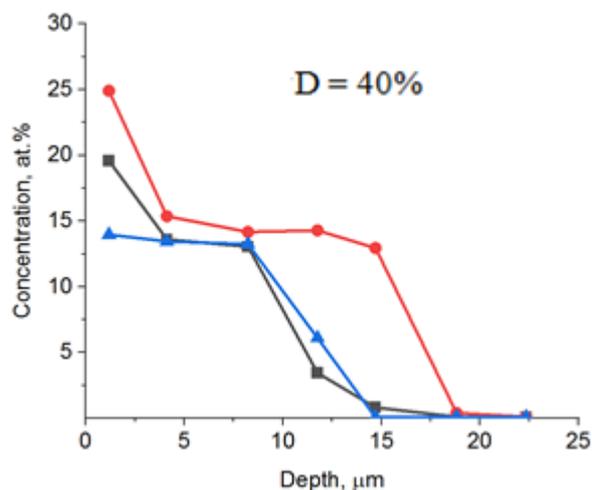


Рисунок 3.10 – Концентрационный профиль азота в нержавеющей стали при коэффициенте заполнения импульсов 40% в условиях компенсации ионного распыления, при токе разряда 50 А. Чёрной линией отмечен край образца, красной – 2 см от края, синей – 4 см от края образца

3.3 Исследование возможности изучения приповерхностного, имплантированного ионами азота, слоя образца стали (12Х18Н10Т) при помощи оборудования CALOTEST.

В настоящее время существуют различные методы модифицирования приповерхностного слоя для улучшения его физико-химических и эксплуатационных свойств. К одному из таких методов относится высокоинтенсивная ионная имплантация. Глубина имплантируемого слоя при такой имплантации сопоставима, а иногда и превышает толщину плёнок, полученных при помощи методов плазменного осаждения покрытий и достигает 10, а иногда и более 100 мкм [1].

В данной работе впервые исследуется возможность изучения глубоколегированного слоя образца стали, имплантированного ионами азота, при помощи прибора CALOTEST.

Данный подход обеспечивает возможность расчёта глубины легированного слоя по данным, определённым с помощью оптического микроскопа. Однако, рассмотреть обе окружности на микроскопе не всегда оказывается возможным. Во многих случаях недостаточно контрастно выражена граница между матричным и ионно-легированным материалом. Для улучшения контрастности изображения шлифа в ряде случаев можно использовать химическое травление поверхности необходимо обработать данный шлиф. Травление позволяет лучше разглядеть диаметры двух шлифов-самого материала, из которого сделан образец, и модифицированный слой.

На рисунке 3.11 представлено изображение поверхности шлифа нержавеющей стали с двумя видимыми диаметрами после травления.

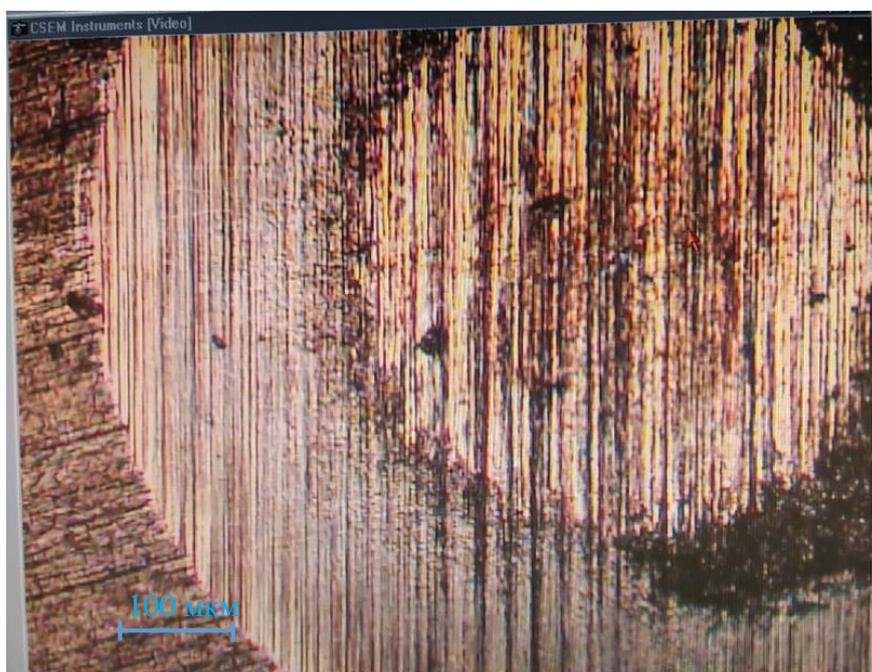


Рисунок 3.11 – Микроструктура образца со шлифом после травления

На рисунке отчётливо видны две окружности с различными диаметрами $D=1.183$ мм и $d=0.637$ мм, радиус шара равен $R=14,975$ мм. В процессе травления они приобрели отчётливый окрас, отличный друг от друга. Микроструктура поверхности шлифа имеет характерные полосы, обусловленные процессом формирования лунки за счёт износа трением алмазных микрочастиц на поверхности шара нержавеющей стали. Трение между шаром и образцом является очень важной частью эксперимента, так как

чем оно меньше, тем меньший слой снимается и, вследствие этого, лучше видны очертания окружностей шлифа. Скорость формирования шлифа и морфология его поверхности во многом определяется размерами алмазных микрочастиц, добавляемых в суспензию, используемую для нанесения на поверхность шара.

По измеренным показателям диаметров внешнего D и внутреннего d кругов шлифа, а также радиуса шара R , была посчитана глубина модифицированного слоя, равная 8.32 мкм.

Режим проведения эксперимента по ионной имплантации образца определялся следующими параметрами: амплитудой потенциала смещения -1.4 кВ, частота импульса потенциала смещения 40 кГц, коэффициент заполнения импульсов $D=40\%$, давление рабочего газа в камере 10^{-5} А или 0.6 Па, время обработки 60 мин, ток разряда 50 А.

Измеренная глубина модифицированного слоя образца стали 12X18H10T при помощи прибора CALOTEST показала примерное сходство с полученными ранее результатами на растровом электронном микроскопе «Hitachi S-3400 N» (рис. 3.9, $D=40\%$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были выполнены исследования по формированию высокоинтенсивных пучков ионов титана с помощью односеточной плазменно-иммерсионной системы. Они показали, что при использовании фокусирующей сетки радиусом 120 мм с размером ячейки сетки 500x500 мкм при амплитудах потенциалов смещения около 0.5-0.6 кВ максимальная плотность ионного тока приближается к 100 мА/см². Компенсация пространственного заряда ионного пучка с помощью дополнительного эмитера электронов существенно не изменяет максимальные амплитуды достигаемые плотности ионного тока, но существенно улучшает форму импульса тока, обеспечивая значительные увеличения флюенса ионного облучения в течение импульса.

Применение мелкоструктурной сетки с размером ячейки 100x100 мкм не обеспечило существенного увеличения плотности ионного тока. В тоже время такая сетка плохо сохраняет форму при термическом нагреве ионным пучком. Использование такой сетки для генерации пучков ионов металлов из плазмы вакуумной дуги ограничивается быстрым изменением прозрачности сеточной структуры из-за осаждения на нее микрочастиц.

Также исследования по модификации стали 12X18H10T высокоинтенсивных пучков ионов азота показали, что наилучшими переменными параметрами для легирования являлись коэффициент заполнения импульсов 40% и ток разряда 50 А. График распределения примеси по глубине при данных параметрах (рис. 3.10) показал, что наибольшая глубина легирования приходится на расстояние в 2 см от края образца (красная линия) и равна примерно 17-18 мкм. В случаях при расстоянии в 4 см и без расстояния (синяя и черная линии) глубина легирования была практически равна и составила примерно 15-16 мкм. Данное улучшение показало увеличение глубины имплантации с ранее 8 мкм до 18 мкм, что напрямую связано с увеличением тока разряда, увеличенного с 30 А до 50 А. Также стоит отметить

существенное увеличение концентрации примеси по глубине, в сравнении с предыдущими экспериментами, с краю образца и на расстоянии 4 см, что говорит о лучшем пространственном распределении примеси по образцу. Максимальная концентрация азота в приповерхностном слое образцов была равна 25 ат. %.

В приведенном докладе впервые было продемонстрировано использование прибора CALOTEST в качестве исследования толщины легированного слоя твёрдого тела. Данные показали, что при параметрах тока разряда 50 А, коэффициенте заполнения импульса 40 %, потенциале смещения -1.4 кВ, времени облучения 60 минут и частоте импульса потенциала смещения 40 кГц глубина модифицированного слоя равна 8.32 мкм, при расстоянии от края поверхности примерно 4 см, что соответствует графику на рис. 3.10.

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСООБЕСПЕЧЕНИЕ

В данном разделе проведена оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-исследовательской работы, направленной на исследование закономерностей модификации стали 12Х18Н10Т высокоинтенсивными пучками ионов азота. Ионная имплантация является одним наиболее эффективных методов модификации поверхностных свойств материалов. В данной работе проводится непосредственно улучшения поверхностных свойств образцов с необычной формой, а именно с формой цилиндра. В связи с этим, были определены ресурсная, финансовая и экономическая эффективности.

Этапы решения задачи:

- провести анализ конкурентных технических решений;
- провести SWOT – анализ;
- предоставить организацию и планирование работ;
- построить график Гантта;
- провести расчёт материальных затрат, заработных плат, отчисления во внебюджетные фонды, затраты на электроэнергию и амортизационных расходов;
- провести анализ сравнительной эффективности работы.

4.1 Техничко-экономическое обоснование научно-исследовательской работы

Научно-исследовательская работа посвящена применению высокоинтенсивной имплантации ионов азота низкой энергии для обработки внутренних поверхностей отверстий, на примере использования стали 12Х18Н10Т. Метод ионной имплантации обладает уникальными свойствами и обеспечивает возможность управляемого изменения элементного состава,

микроструктуры и свойств различных материалов, включая полупроводники, металлические и диэлектрические материалы, что даёт этому методу широкое применение. Так же данное сырьё успешно используется при производстве различных элементов для промышленной сварочной аппаратуры. Широкой популярностью пользуется такая деталь, как бесшовная труба из 12Х18Н10Т сплава. Элементы, изготовленные из этого сырья, могут эксплуатироваться в средах, характеризующихся высоким давлением и температурами, а также агрессивными химическими средами. Другими словами, активно применяется в химической, фармацевтической и пищевой промышленности.

4.2 Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями результатов исследований являются организации в сфере авиастроения, машиностроения и ядерной энергетики. В каждой сфере необходимо модифицировать материалы, добиваясь новых свойств и качеств. Это означает, что потребители – крупные коммерческие и некоммерческие организации отраслевой принадлежности.

Для определения группы потребителей, которых может заинтересовать результаты данных научных исследований, необходимо провести сегментирование рынка.

Выбранные основные характеристики потребителей сегмента:

Месторасположение – регионы с развитыми отраслями тяжелой промышленности (авиастроение, машиностроение и ядерная энергетика).

Отношение к услуге – готовность внедрять новые технологии в технологический процесс

Закупочные принципы – компании, проводящие централизованный закуп товаров и услуг.

Так как исследований по модификации внутренних поверхностей ранее никем не проводилось, результаты будут интересны большинству организаций,

вне зависимости от их месторасположения. Также данная технология заинтересует организации, нуждающиеся в модификации поверхностных свойств деталей со сложными формами.

Карта сегментирования рынка по модификации поверхностей представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Карта сегментирования рынка услуг по модификации поверхностей

		Вид услуги			
		Модификация поверхностного слоя	Нанесение защитных покрытий	Модификация поверхности сложных деталей	
Вид промыш- ленности	Машиностроение		■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
	Авиастроение		■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
	Ядерная энергетика		■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
	Космическая промышленность		■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
	Advenira Enterprises	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■	Группа компаний «Плакарт»

В качестве конкурентных компаний были рассмотрены: Advenira Enterprises, ЗАО «МАНЭЛ», Группа компаний «Плакарт».

Компания Advenira Enterprises предоставляет услуги по нанесению нанопокровтий на различные поверхности. Среди клиентов – машиностроительные, трубные и авиакосмические компании страны.

ЗАО «МАНЭЛ» - наноструктурные неметаллические неорганические покрытия. Машиностроение и строительство.

Группа компаний «Плакарт» - многофункциональные наноструктурированные защитные покрытия. Машиностроение, авиастроение, ядерная энергетика.

Исходя из карты сегментирования рынка услуг по модификации поверхностей, результаты научных исследований могут быть предложены в сегменте рынка модификации поверхностей сложных деталей (в том числе и с отверстиями) ядерной энергетике. Также можно выбрать сегмент модификации

поверхностного слоя деталей авиастроения и/или космической промышленности, учитывая не высокую конкуренцию.

4.3 Анализ конкурентных технических решений

В отличие от других методов (лазерная обработка, обработка сильноточными электронными пучками и др.) модификация материала в ионной имплантации происходит за счёт изменения фазового и элементного состава в поверхностном слое.

Ионная имплантация как метод модификации материалов широко применяется в различных сферах промышленности. Имплантация различными материалами позволяет добиться улучшения поверхностных свойств материала. Например, имплантация ионов титана в циркониевый сплав Zr-1Nb за счет захвата водорода ионно-модифицированным слоем снижает гидrogenизацию, следовательно, увеличивает продолжительность безопасной работы тепловыделяющих элементов, в которых используют данный сплав. При имплантации ионов хрома в тот же циркониевый сплав Zr-1Nb, повышается устойчивость материала к окислению.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки. Для этого была составлена оценочная карта, таблица 4.2.

B_{ϕ} , K_{ϕ} – высокоинтенсивная модификация пучками ионов азота низкой энергии

B_{K1} , K_{K1} – метод нанесения защитных покрытий

Таблица 4.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (исследований)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _Ф	Б _{К1}	К _Ф	К _{К1}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1) Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0.2	4	4	0.8	0.6
2) Повышение механических свойств	0.05	4	2	0.2	0.1
3) Энергоэкономичность	0.05	4	4	0.2	0.1
4) Надежность	0.1	4	3	0.4	0.2
5) Сложность в проведении технического анализа	0.05	5	5	0.25	0.25
6) Безопасность	0.01	5	5	0.05	0.05
7) Простота эксплуатации	0.05	4	5	0.2	0.2
8) Качество изделия	0.03	5	5	0.015	0.015
9) Возможность дальнейшей модификации	0.02	5	5	0.1	0.1
10) Скорость получения модифицированного слоя	0.1	4	5	0.4	0.5
11) Простота проведения модификации	0.02	5	5	0.1	0.1
12) Необходимость контролирования выполняемых процессов оператором установки	0.05	4	5	0.2	0.1
Экономические критерии оценки эффективности					
1) Конкурентоспособность продукта	0.05	4	4	0.2	0.1
2) Уровень проникновения на рынок	0.02	5	5	0.1	0.1
3) Цена	0.03	4	4	0.12	0.12
4) Предполагаемый срок эксплуатации	0.02	4	4	0.08	0.06
5) Послепродажное обслуживание	0.01	4	4	0.04	0.04
6) Финансирование научной разработки	0.08	4	5	0.32	0.32
7) Срок выхода на рынок	0.05	4	4	0.2	0.1
8) Наличие сертификации разработки	0.01	4	4	0.04	0.04

Итого	1	87	86	4.015	3.195
-------	---	----	----	-------	-------

Исходя из таблицы 4.2, конкурентоспособность разработки составила 4.015, против 3.195 у другого аналога. Полученные данные свидетельствуют о конкурентоспособности научно-технической разработки в критериях: удобство в эксплуатации, механические характеристики, энергоэкономичность, надёжность, скорость получения модифицированного слоя, необходимость контролирования процесса модификации оператором, срок эксплуатации и срок выхода на рынок. Конкурентоспособность обусловлена, более высокими механическими показателями обрабатываемого материала.

4.4 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

По результатам SWOT анализа можно предоставить две таблицы, интерактивную матрицу работы, таблица 4.3, и результирующую таблицу с выявлением возможностей и угроз НИР, таблица 4.4.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

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

Таблица 4.4 – SWOT анализ

	<p>Сильные стороны: С1 – Широкий спектр предоставляемых возможностей (реализация нескольких типов релейной защиты, автоматики и функций); С2 – Длительный срок эксплуатации; С3 – Высокая эффективность работы защит (увеличенное быстродействие и чувствительность); С4 – Высокая точность обработки данных; С5 – Малые габариты оборудования; С6 – Малые объемы технического обслуживания оборудования; С7 – Удобство и простота настройки и эксплуатации; С8 – Возможность подключения устройства в общую информационную сеть</p>	<p>Слабые стороны: Сл1 – Высокая стоимость микропроцессорных устройств РЗА; Сл2 – Низкая ремонтпригодность; Сл3 – Необходимость квалифицированных специалистов для обслуживания оборудования; Сл4 – Усложнение схем и алгоритмов работы защит; Сл5 – Постепенное устаревание программного обеспечения и необходимость своевременного обновления.</p>
<p>Возможности: В1 – Государственная поддержка проектов по модернизации объектов промышленности; В2 – Использование оборудования отечественного производителя; В3 – Создание унифицированных проектов</p>	<p>Сильные стороны и возможности: 1) Привлечение государственных и частных средств на модернизацию объектов энергетики; 2) Использование высокотехнологичных, эффективных и быстродействующих устройств РЗ с большим сроком эксплуатации; 3) Применение технологий</p>	<p>Слабые стороны и возможности: 1) Высокая стоимость проектов затрудняет повсеместное внедрение микропроцессорных устройств, ситуацию может улучшить государственное субсидирование проектов по перевооружению оборудования. 2) Применение</p>

<p>переоснащения оборудования РЗ типовых схем; В4 – Снижение стоимости микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) за счет удешевления технологии производства; В5 – Актуализация внедрения микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики</p>	<p>цифровой подстанции для создания системы по типу SCADA.</p>	<p>оборудования отечественных производителей, а также государственное субсидирование позволит снизить стоимость на микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ), 3) Унификация и стандартизация проектов позволит упростить процесс проектирования, повысится совместимость и взаимозаменяемость оборудования</p>
<p>Угрозы: У1 – Рост стоимости импортных комплектующих; У2 – Появление новых конкурентных технических решений; У3 – Низкий спрос на рынке, обусловленный экономической ситуацией; У4 – Инертность рынка на переоснащение оборудования работающем на базе новых технологий.</p>	<p>Сильные стороны и угрозы: 1) Повышение стоимости импортного оборудования способствует повышению спроса на отечественное оборудование; 2) Появление конкурентных технических решений в конечном итоге будет способствовать снижению стоимости и повышению качественных показателей; 3) Снижение интенсивности спроса помимо убытка, будет способствовать развитию экономических стратегий по разработке технических решений в будущем.</p>	<p>Слабые стороны и угрозы: 1) Рост стоимости импортных компонентов может значительно повлиять на стоимость микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ), что может негативно сказаться на спросе в будущем; 2) Вследствие задержки между разработками и поступлением на рынок оборудования на базе новых технологий велика вероятность коммерческой неудачи вследствие малого спроса.</p>

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

Приведённый анализ показал, что технология, находясь на этапе разработки, имеет хорошие шансы на коммерциализацию, с учетом проявляемого интереса партнеров и удачных исследований. При этом если переход разработки в стадию коммерциализации затянется, то возможна потеря спроса на готовую технологию.

4.5 Организация и планирование работ

В данном разделе отражено распределение времени и трудового вклада участников исследовательской работы.

Определяющим фактором выражения основной части стоимости научно-технической разработки являются заработные платы лиц, задействованных в реализации проекта. В связи с этим, наиболее важным моментом является максимально точное определение трудозатрат каждого из участников проекта [18].

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществлялось в следующем порядке:

- разработка задания;
- теоретические исследования;
- составление порядка эксперимента, выбор технических режимов;
- построение 3Д моделей и создание схемы эксперимента;
- подготовка исследуемых образцов;
- экспериментальные исследования;
- оценка результатов экспериментов;
- оформление отчёта по ВКР;
- подготовка к защите ВКР.

Примерный порядок составления этапов и работ, а также трудовой вклад участников исследовательской работы представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Перечень этапов, работ и распределения исполнителей

Основные этапы	№ работ	Содержание работ	Должность исполнителя
Разраб. задания	1	Составление и утверждение научного задания	Научный руководитель
Теор. исслед.	2	Изучение литературных материалов, связанных с НИ	Студент-Инженер
Состав. порядка exper. Постр. 3Д мод. и схемы	3	Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	Научный руководитель, Студент-Инженер, Сотрудник-техник
	4	Моделирование процесса эксперимента	Студент-Инженер, Сотрудник-техник
Изготов. исслед. образц.	5	Подготовка исследуемых образцов	Студент-Инженер, Сотрудник-техник
Exper. исслед.	6	Проведение серий экспериментов	Студент-инженер, Научный руководитель
Оценка резул. exper.	7	Проведение анализа на анализаторах	Студент-инженер
	8	Описание полученных результатов	Студент-инженер
Оформ. Отчета по ВКР	9	Оформление отчета по ВКР	Студент-инженер
Подгот. к защите ВКР	10	Подготовка к защите ВКР	Студент-инженер

НР – научный руководитель, СТ – сотрудник- техник, ИН – студент- инженер

Данная таблица отображает вклад каждого участника исследовательской работы.

4.6 Продолжительность этапов работ

Для определения трудоёмкости реализации научного исследования выпускной квалификационной работы используется экспертный способ, основным показателем которого является человеко-день [19]. Для расчёта предлагаемого значения трудоёмкости используют следующую формулу

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

где $t_{ож}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения работы, чел.дн.; t_{\min} – минимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.дн.; t_{\max} – максимально возможная трудоёмкость выполнения работы, чел.-дн.

Оценка трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 10 + 2 \cdot 40}{5} = 22 \text{ чел.-дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для сотрудника – техника:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1.8 \text{ чел.-дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для инженера:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 90 + 2 \cdot 180}{5} = 126 \text{ чел.-дн.}$$

Далее определим продолжительность каждой работы в рабочих днях $T_{рд}$, учитывая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по следующей формуле:

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д}, \quad (4.2)$$

где $T_{рд}$ – продолжительность одного этапа работы, раб.дн.; $K_{вн}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение определённых длительностей, в частности, возможно $K_{вн} = 1$; $K_{д}$ – коэффициент,

учитывающий дополнительное время на компенсацию не предвиденных задержек и согласование работ, $K_d = 1$.

Расчёт продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$T_{RD} = \frac{22 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 22 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для сотрудника-техника:

$$T_{RD} = \frac{1.8 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 1.8 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для инженера:

$$T_{RD} = \frac{126 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 126 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Ленточный график проведения научных работ изображается в форме диаграммы Гантта. Для построения диаграммы необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением:

$$T_{KD} = T_{RD} \cdot T_K, \quad (4.3)$$

где T_{KD} – продолжительность выполнения этапа в календарных днях; T_K – коэффициент календарности, определяющийся выражением 4.4.

$$T_K = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}}, \quad (4.4)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; $T_{\text{ВД}}$ – количество выходных дней в году; $T_{\text{ПД}}$ – количество праздничных дней.

Рассчитаем коэффициент календарности по формуле 4.4:

$$T_K = \frac{366}{366 - 93 - 25} = 1.476$$

Построим таблицу по результатам расчётов, в которой укажем трудоёмкости работ, название работы, а также укажем длительность работ в рабочих и календарных днях, таблица 4.6.

Таблица 4.6 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Длит. работ в раб. дни Трд			Длит. работ в кален. дни Ткд		
	t _{min} , чел.-дн			t _{max} , чел.-дн			t _{ож} , чел.-дн			НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН
	НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН						
Разраб. задания		-	-	2	-	-	1.4	-	-	1.4	-	-	2.1	-	-
Теор. исслед.	10	-	10	30	-	30	18	-	18	18	-	18	26.6	-	26.6
Состав. порядка экспер.	1	1	1	5	5	2	2.6	2.6	1.4	2.6	2.6	1.4	3.8	3.8	2.1
Постр. 3Д мод. и схемы	-	-	5	-	-	10	-	-	7	-	-	7	-	-	10.3
Изготов. исслед. образц.	-	-	1	-	-	2	-	-	1.4	-	-	1.4	-	-	2.1
Экспер. исслед.	5	5	5	15	15	15	9	9	9	9	9	9	13.3	13.3	13.3
Оценка резул. экспер.	3	-	3	10	-	10	5.8	-	5.8	5.8	-	5.8	8.6	-	8.6
Оформ. Отчета по ВКР	1	-	7	2	-	21	1.4	-	12.6	1.4	-	12.6	2.1	-	18.6
Подгот. к защите ВКР	1	-	5	2	-	15	1.4	-	9	1.4	-	9	2.1	-	13.3
Итого	21	6	37	66	20	105	39.6	11.6	64.2	39.6	11.6	64.2	56.5	17.1	94.9

На основании таблицы 4.6, построим календарный план-график. График построим для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. Отметим области в зависимости от исполнителей, ответственных за конкретную работу, таблица 4.7.

Таблица 4.7 – Календарный план-график (график Гантта) проведения НИ

Вид работ	Исполнитель	Т _{кд} , чел.-дн	Продолжительность работ													
			Февр.			Март			Апр.			Май				
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Разработка задания	НР	2.1	■													
Теоретическое исследование	НР	26.6	■	■	■											
	ИН	26.6	■	■	■											
Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	НР	3.8				■										
	СТ	3.8				■										
	ИН	2.1				■										
Подготовка исследуемых образцов	ИН	2.1				■										
Эксперимент. исследования	НР	13.3					■	■	■							
	СТ	13.3					■	■	■							
	ИН	13.3					■	■	■							
Оценка результатов экспериментов	НР	8.6							■	■	■					
	ИН	8.6							■	■	■					
Построение 3Д моделей и эскиза	ИН	10.3							■	■	■	■	■			
Оформление отчета по ВКР	НР	2.1											■			
	ИН	18.6											■	■	■	■
Подготовка к защите ВКР	НР	2.1													■	■
	ИН	13.3													■	■

■ - Научный руководитель ■ - Сотрудник-техник ■ - Инженер (студент)

Таким образом, в ходе данного этапа работы были определены длительности и обозначены сроки выполнения всех запланированных видов работ. Был построен график Гантта, наглядно иллюстрирующий этапы выполнения проекта участниками.

4.7 Бюджет научного исследования

4.7.1 Расчёт материальных затрат

Расчёт материальных затрат включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта, таблица 4.8.

Таблица 4.8 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Сталь 12Х18Н10Т	м	1	1284	1284
Азотный баллон	шт	1	5650	5650
Диск для нарезки образцов из карбида кремния	шт	1	1650	1650
Халат	шт	1	500	500
Бумага наждачная, зернистость – 800	шт	4	52	208
Бумага наждачная, зернистость - 1500	шт	4	30	120
Бумага наждачная, зернистость – 2000	шт	4	115	460
Бумага наждачная, зернистость – 4000	шт	4	170	680
Итого				10552

По полученным данным, наибольшие расходы приходятся на сырьё и рабочий газ. Используемые при выполнении ВКР: газоразрядный источник плазмы «PINK», осциллограф LeCroy Waverunner 6050A, нарезной станок Brilliant 201, шлифовальная машина Saphir 320, растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N и профилометр STIL 3D Micromesure – в материальных затратах не учитывались, так как имелись в оснащении лаборатории.

4.7.2 Расчет затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ

Используемые при выполнении ВКР: научно-исследовательская вакуумная установка, персональный компьютер, осциллограф LeCroy Waverunner 6050A, отрезной станок Brilliant 201, шлифовальная машина Saphir 320, растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N и профилометр STIL 3D Micromesure – в материальных затратах не учитывались, так как имелись в оснащении лаборатории. В связи, с чем рассчитаем их амортизационные отчисления.

Проведем расчет амортизации использованного оборудования на примере осциллографа LeCroy Waverunner 6050A. Первоначальная стоимость 160000 рублей; срок полезного использования для осциллографов, согласно общероссийскому классификатору основных фондов, составляет 3-5 лет, код 143312467; Время работы на всём оборудовании не превышало одного месяца за все время исследования. Тогда:

- норма амортизации:

$$H_a = \frac{1}{n} \cdot 100\% = \frac{1}{5} \cdot 100\% = 20\%, \quad (4.5)$$

где H_a – норма амортизации в процентах; n – срок полезного использования в годах.

- годовые амортизационные отчисления:

$$A_r = 160000 \cdot 0.2 = 32000 \text{ рублей}$$

- ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_m = \frac{32000}{12} = 2667 \text{ рублей}$$

- итоговая сумма амортизации основных средств:

$$A = 2667 \cdot 1 = 2667 \text{ рублей}$$

Также произведем расчет для остального оборудования и занесем полученные данные в таблицу 4.9.

Таблица 4.9 – Расчеты амортизационных отчислений

Наименование	Первонач. Цена, руб.	Норма аморти., %	Годовые аморти. отчисл., руб.	Ежемесяч. аморти. отчисл., руб.	Затраты, руб.
Осциллограф LeCroy Waverunner 6050A	160000	20	32000	2667	2667
Вакуумная установка	7000000	14.3	1001000	83417	83417
Отрезной станок Brilliant 201	260000	10	26000	2167	2167
Шлифовальная машина Saphir 320	300000	10	30000	2500	2500
РЭМ Hitachi S-3400 N	1500000	14.3	214500	17875	17875
Профилометр	1350000	14.3	193050	16088	16088

4.7.3 Расчёт заработной платы

Для вычисления основной заработной платы необходимо учесть научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, участвующих в выполнении выпускной квалификационной работе.

Среднедневная тарифная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{дн-т} = \frac{МО}{25.083}, \quad (4.5)$$

где $МО$ – месячный должностной оклад работника, руб.

В таблице 4.10 представлены расчёты заработной платы

Таблица 4.10 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб/мес	Среднедневная ставка, руб/раб. день	Затраты времени, раб. дни	Фонд, з/платы, руб
НР	26116	1041.18	58.6	61013
СТ	13058	520.59	17.1	8902
ИН	-	-	94.9	-
Итого				69915

По данным таблицы 4.10 получены данные по затратам на заработную плату сотрудников за весь период ВКР.

4.7.4 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Ставка отчислений во внебюджетные фонды для учреждений, осуществляющих научную и образовательную деятельность, на 2021 год составляет 30% (ПФ – 22%, ФФОМС – 5.1%, ФСС – 2.9%).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб.} = k_{внеб.} \cdot Z_{осн.}$$

где: $k_{внеб.}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{внеб.} = 69915 \cdot 0.3 \approx 20114 \text{ руб.}$$

4.7.5 Расчёт затрат на электроэнергию

Потребляемая мощность анализатора составляет 7 кВт/час. Длительность еженедельной работы на комплексной технологической установке составляет 2 часа. Стоимость электроэнергии в Томске составляет

5.748 рубля за 1 кВт/час. Стоимость электропотребления за 5 месяцев рассчитывается по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об.} \cdot C_{\mathcal{E}} \cdot t_{об.}, \quad (4.6)$$

где $P_{об.}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $C_{\mathcal{E}}$ – тариф на 1 кВт·час; $t_{об.}$ – время работы оборудования, час.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования	Потребляемая мощность $P_{об.}$, кВт	Затраты $C_{эл.об.}$, руб.
Персональный компьютер	646	0.3	1113.96
Комплексная технологическая установка	40	7	1609.44
Итого			2723.4

4.7.6 Расчёт амортизационных расходов

Затраты на приобретение плазменных источников «Радуга» отсутствуют, так как имеются в оснащении лаборатории кафедры. Произведем расчет амортизационных отчислений на данный вид оборудования.

Срок полезного использования источника составляет 10 лет, поэтому норма амортизации составляет:

$$H_a = \frac{1}{n} \cdot 100\% = 10\%, \quad (4.7)$$

где H_a – норма амортизации в процентах; n – срок полезного использования в годах.

Первоначальная стоимость оборудования составляет 7 000 000 рублей.

Из этого следует, что годовая сумма амортизации составит:

$$C_{AM} = \frac{C_{об.} \cdot H_a \cdot t_{пф}}{F_d} = \frac{7000000 \cdot 0.1 \cdot 40}{200} = 140000 \text{ руб.}, \quad (4.8)$$

где $C_{об}$ – первоначальная стоимость оборудования; $t_{рф}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта; $F_{д}$ – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования.

Первоначальная стоимость персонального компьютера составляет 30 000 рублей. Из этого следует, что годовая сумма амортизации составит:

$$C_{AM} = \frac{C_{об} \cdot H_a \cdot t_{рф}}{F_{д}} = \frac{30000 \cdot 0.4 \cdot 646}{1980} = 3915.16 \text{ руб.}$$

4.8 Определение сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчёта интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трёх вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчёта, с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

$$I_{финр}^{испi} = \frac{\Phi_{Pi}}{\Phi_{max}}, \quad (4.9)$$

где Φ_{Pi} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.10)$$

В таблице 4.12 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. Под исполнением 1 представлена методика качественного анализа материалов, заложенная в программе как базовая.

Таблица 4.12 – Сравнительная оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Данный проект	Исполнение 1
Способствует росту производительности труда	0.25	5	5
Соответствует требованиям потребителей	0.15	4	4
Энергосбережение	0.2	4	3
Надежность	0.2	4	4
Материалоемкость	0.2	5	4
Интегральный показатель ресурсоэффективности		4.45	4.25

Характеристики имеют схожие критерии, так как методики реализованы для одного прибора. Каждая из представленных методик реализована для определённой задачи.

Пример расчёта интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_p = 0.25 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 5 = 4.45$$

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

$$I_{ИСП} = \frac{I_{Рi}}{I_{ФИНр}}, \quad (4.11)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{CP} = \frac{I_{Д.П.}}{I_{ИСП}}, \quad (4.12)$$

В таблице 4.13 представлена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 4.13 – Сравнительная эффективность

Показатели	Данный проект	Исполнение проекта
Интегральный финансовый показатель	1	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности	4.45	4.25
Интегральный показатель эффективности	4.45	4.25
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.05	0.95

Как видно из таблицы 4.13, разработанная методика эффективнее стандартной.

Традиционная оценка экономической эффективности полученных результатов невозможны, т.к. они носят чисто научный характер.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

1. В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был выполнен анализ конкурентоспособности. Данный анализ подтвердил конкурентоспособность применение метода высокоинтенсивной имплантации ионов азота для обработки внутренних поверхностей отверстий на примере стали 12X18H10T, в связи с более высокими показателями механических характеристик.

2. Проведён SWOT-анализ проекта, в ходе которого были выявлены потенциальные внутренние и внешние сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Анализ показал, что потенциальных сильных сторон у проекта больше, чем слабых, что доказывает перспективность разработок проекта.

3. Установлено, что в календарных днях длительность работ для научного руководителя составило 58.6 дней, для сотрудника-инженера 17.1, а для инженера 94.9 дней.

4. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график Гантта, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – проведение теоретических исследований.

5. Определены показатели ресурсоэффективности, интегральный финансовый показатель, интегральный показатель эффективности и сравнительная эффективность вариантов исполнения, значения которых свидетельствуют о достаточно высокой эффективности реализации технического проекта.

Материальные затраты составили 10552 рубля (без учета стоимости имеющегося в наличии лаборатории оборудования). Затраты на электропотребление 2723.4 рубля. Фонд основной заработной платы составил 69915 рублей. Отчисления во внебюджетные фонды – 20114 рублей.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

ВВЕДЕНИЕ

Данный раздел посвящен вопросам обеспечения нормативных условий труда (санитарно-гигиенические условия, защита от опасных производственных факторов, обеспечение пожарной безопасности) в соответствии с действующими нормативными документами.

В современных условиях развития общества, всё чаще возникает острая потребность в новых конструкционных материалах, способных удовлетворять сразу механическим, электрическим и коррозионностойким характеристикам. На основании этого, в настоящей выпускной работе ведется исследование взаимодействия пучков ионов азота с поверхностью твёрдого тела. Эксперименты проводятся на комплексной технологической установке, включающую в себя вакуумную систему, источники тока разряда, генераторы потенциалов смещения отрицательного знака и т.д.

Данный раздел несёт в себе не только правовой смысл, но и отвечает на вопросы безопасности исследователей и сохранности здоровья, рассматривая опасные и вредные факторы.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К работе на комплексной установке, включающей в себя высокочастотные генераторы потенциалов смещения допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие обучение безопасности труда и инструктаж на рабочем месте [24]. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний, норм и правил работы с электроустановками,

приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы на установке, имеющие не менее III группы по электробезопасности.

Повторная проверка знаний норм и правил электробезопасности проводится с работниками не реже 1 раза в 12 месяцев, повторный инструктаж на рабочем месте – не реже 1 раза в 3 месяца. Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктаж, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

Проведение всех видов инструктажа должно оформляться в журнале регистрации инструктажа установленного образца, с обязательными подписями получившего и проводившего инструктажа, с указанием даты проведения инструктажа, наименования и номеров инструкции на виды работ, по которым проводится инструктаж.

По данной теме рассматриваются специальные законодательные и нормативные документы:

-инструкция № 2-14 по охране труда при работе с электрооборудованием напряжением до 1000 В;

-инструкция № 2-07 по охране труда при работе с баллонами, работающими под давлением;

-инструкция № 2-08 по охране труда при работе с ПЭВМ и ВДТ.

Согласно [24], продолжительность работ не должна превышать 40 часов в неделю, таким образом, при шестидневной рабочей неделе продолжительность рабочего дня должна составлять не более 7 часов.

Обязательное социальное страхование работников регламентируется [2,3]. Работодатели обязуются обеспечить своим подчиненным социальное страхование от возможных производственных несчастных случаев. Также представленный вид страхования может применяться в случае возникновения

профессионального заболевания. Работники могут получать выплаты на основаниях, указанных в [24].

Пособия по временной нетрудоспособности, размеры пособий по временной нетрудоспособности и условия их выплаты устанавливаются [1, ст. 236].

Работники всех категорий подлежат обязательному социальному страхованию (ОСС) вне зависимости от их желания. Обязанность создания гарантий возложена на работодателей и производится за счет расходов предприятия. Каждый из видов ОСС имеет четко установленные ставки, преимущественно зависящие от принятой в компании-работодателе системы налогообложения [25].

5.2 Производственная безопасность

Во время работы, на персонал воздействовали следующие вредные и опасные факторы, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1. – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003- 2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разраб отка	Изгото вление	Эксплу атация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	-	Требования к допустимым параметрам микроклимата регулируются СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [27].

2. Превышение уровня шума	-	+	+	Требования к допустимым уровням шума приводятся в СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [28] и СН 2.2.4/2.1.8.566-96.
Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
3. Отсутствие или недостаток естественного света	-	-	-	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*[29].
4. Недостаточная освещённость рабочей зоны	+	+	-	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*[29].
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи,	+	+	+	Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2017 [30]

замыкание которой может произойти через тело человека				
---	--	--	--	--

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований.

5.2.1.1 Отклонение показателей микроклимата

Микроклиматом производственных помещений называют метеорологические условия внутри помещений. Эти условия определяются действующим на организм человека рядом факторов. В этот ряд входят температура воздуха, влажность, скорость движения воздуха и тепловое излучение. Так же на микроклимат влияет набор физических факторов, оказывающих влияние на состояние человека. Это теплообмен человека с окружающей средой и факторы, определяющие самочувствие. Такие факторы как работоспособность, здоровье и производительность.

Перегрев организма наступает при высокой температуре воздуха и высокой относительной влажности, которые сопровождаются низкой подвижностью воздушной массы. При наступлении переохлаждения снижается температура тела, происходит сужение кровеносных сосудов, возникают сбои в работе сердечно-сосудистой системы [31].

Санитарными нормами, установленными для производственных помещений [27] утверждены оптимальные и допустимые интервалы температуры воздуха, относительной влажности и скорости движения воздушных масс. Нормативы установлены с учетом тяжести выполняемой работы и времени года.

В таблице 5.2 отражены наиболее оптимальные климатические параметры в производственных помещениях для категории легких работ. К

такovým относятся работы, которые выполняются сидя и не требуют высокого физического напряжения.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые климатические параметры, согласно [27]

Период года	Температура, °С		Относительная влажность воздуха, %		Скорость движения воздуха, м/с	
	Оптималь.	Допуст.	Оптималь.	Допуст.	Оптималь.	Допуст.
Холодный	22-24	18-26	40-60	75	0.1	Не более 0.1
Теплый	23-25	20-30	40-60	55 – при 28 °С	0.1	0.1-0.2

К коллективной защите сотрудников лаборатории относятся нормализация метеорологических условий производственной среды. К способам нормализации метеорологических условий производственной среды относятся вентиляция, отопление и кондиционирование.

5.2.1.2 Превышение уровня шума

Главным источником шума в лаборатории является форвакуумный насос.

Шум является биологическим раздражителем, способным влиять на все органы и системы организма, вызывая разнообразные физиологические изменения. К биологически агрессивному шуму относятся импульсный и тональный шум. Шум с уровнем звукового давления до 35 дБ привычен для человека и не беспокоит его. Повышение этого уровня до 40–80дБ создает

значительную нагрузку на нервную систему, вызывая ухудшение самочувствия, а при длительном действии может быть причиной нервов. Воздействие шума уровнем свыше 80дБ может привести к потере слуха – профессиональной глухоте. При действии уровней свыше 140 дБ возможен разрыв барабанных перепонок, контузия, а при уровне более 160 дБ наступает летальный исход.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, утверждённых [28].

Для определения допустимого уровня шума на рабочих местах используется ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности.» [32]. Нормирование шума производится по комплексу показателей с учетом их гигиенической значимости на основании ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ [33]. и санитарных норм. Принято два метода нормирования: по предельному спектру шума и по интегральному показателю (эквивалентному уровню шума, дБА). Выбор метода зависит от временных характеристик шума. В таблице 5.3 представлены допустимые уровни звукового давления на рабочем месте, согласно [28].

Таблица 5.3 – Допустимые уровни звукового давления на рабочем месте, согласно [37]

Вид деятельности	Частота, Гц							
	Уровень звукового давления, дБ							
Научная деятельность, проектирование	62	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	71	61	54	49	45	42	40	30

Выбор средств по защите от воздействия производственного шума на работающих и окружающую среду производится исходя из конкретных условий: величины превышения ПДУ и характера спектра источника излучений.

К средствам коллективной защиты можно отнести средства, снижающие шум в самом источнике, а именно применение рациональных конструкций и новых материалов, разработка нового типа насоса с меньшим звуковым воздействием, удаление источника шума за радиус воздействия на человека либо временное разграничение работы прибора и человека в одном помещении.

5.2.1.3 Превышение уровня вибрации

К источникам вибрации можно отнести всё тот же форвакуумный насос, причина вибрации которого заключается во возвратно-поступательном движении ротора.

Результатом действия вибрации могут быть головокружения, расстройство координации движений, симптомы укачивания, вегетативная неустойчивость, нарушения зрительной функции, снижение болевой, тактильной и вибрационной чувствительности и другие отклонения в состоянии здоровья.

Частота и особенности клинических проявлений заболеваний, вызванных воздействием вибрации, зависят главным образом от спектрального состава вибрации, продолжительности воздействия, индивидуальных особенностей человека, направления вибрационного воздействия, места приложения, явлений резонанса, условий воздействия вибрации (факторов производственной среды, усугубляющих вредное воздействие вибрации на организм человека).

Колебания высоких частот вызывают спазм сосудов. В некоторых случаях сосудистые нарушения при вибрационной болезни могут привести к постепенному развитию хронической недостаточности мозгового кровообращения.

Нормы по производственной вибрации приводятся в СН 2.2.4/2.1.8.566. «Санитарные нормы. Производственная вибрация, вибрация в помещениях

жилых и общественных зданий», [34]. В таблице 5.4 приведены предельно допустимые значения производственной локальной вибрации.

Таблица 5.4 – Предельно допустимые значения производственной локальной вибрации, согласно [34]

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Виброускорение		Виброскорости	
	м/с ²	дБ	м/с·10 ⁻²	дБ
8	1.4	123	2.8	115
16	1.4	123	1.4	109
31,5	2.8	135	1.4	109
63	5.6	135	1.4	109
125	11.0	141	1.4	109

К средствам защиты от вибрации можно отнести вибродемпфирование (процесс уменьшения уровня вибрации путём превращения энергии механических колебаний системы в другие виды энергии), виброгашение (уменьшение уровня вибрации защищаемого объекта путём введения в систему дополнительных сопротивлений упругого или инерционного типа) и виброизоляцию (осуществляется посредством упругой связи, препятствующей передаче вибраций от источника колебаний к элементам конструкции или человеку).

5.2.1.4 Опасность электрического тока

Опасность поражения током в данной работе создавали генераторы высокого напряжения. Воздействие электрического тока на человека носит разносторонний и своеобразный характер. Прохождение электрического тока через организм может вызвать у человека раздражение кожных покровов и повреждения различных внутренних органов. Проходя через живые ткани организма человека, электрический ток производит электролитическое, термическое, механическое, световое, биологическое, световое воздействие на организм. С целью обеспечения максимальной защиты от поражения электрическим током необходимо доскональное соблюдение правил технической эксплуатации электроустановок и проведение мероприятий по защите от электротравм [35].

Допустимые для человека токи оцениваются по трём критериям электробезопасности: осязаемый ток, который не вызывает нарушения деятельности организма, отпускающий и фибрилляционный токи.

В таблице 5.5 приведены предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека, которые не должны превышать ГОСТ 12.1.038-82 с изм. от 01.07.88.

Таблица 5.5 - Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека

Продолжительность действия тока, с	Предельно допустимые значения, не более		Продолжительность действия тока, с	Предельно допустимые значения, не более	
	U, В	I, мА		U, В	I, мА
0.01-0.08	550	650	0.6	95	105
0.1	340	400	0.7	85	90
0.2	160	190	0.8	75	75
0.3	135	160	0.9	70	65
0.4	120	140	1.0	60	50
0.5	105	125	Свыше 0.1	20	6

Лаборатория относится к помещению без повышенной опасности поражения электрическим током. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений, расположения токоведущих частей на недоступной высоте. К СКЗ относятся заземление и разделение электрической сети с помощью трансформаторов - в результате изолированные участки сети обладают большим сопротивлением изоляции и малой емкостью проводов относительно земли, за счет чего значительно улучшаются условия безопасности [45].

5.3 Экологическая безопасность

Охрана окружающей среды - комплексная проблема и наиболее активной формой ее решения является сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства. Для перехода к безотходным производствам в лаборатории необходимо осуществлять сбор аргона в специальные емкости, в настоящее время он выпускается в воздух через специальный фильтр при продувке вакуумной системы.

Также необходимо улучшить систему улавливания/фильтрации масляных паров при работе пластинчато-роторных насосов, так как масло и масляные пары непосредственно влияют на окружающую среду в целом. В данный момент стоят фильтры, улавливающие масло и масляные пары, но все же, используемые фильтры не улавливают все вредные вещества.

Так же необходимо позаботиться о отдельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла, металлических частей, пластика, резины и т. д. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

Наиболее характерным в условиях лаборатории и типичным ЧС является пожар, возникающий в условии неисправности работы оборудования. Под пожаром понимают неконтролируемое горение, причиняющее

материальный ущерб, вред жизни и здоровью людей, интересам общества, государству.

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, статическое электричество и т. д.

5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.

В качестве превентивных мер по предотвращению пожаров и взрывов на объекте используются такие меры как: не менее одного раза за полгода необходимо проводить со всеми работниками противопожарный; необходимо проводить обучение всех работников правилам противопожарной безопасности; внедрение инструктивных материалов наглядной агитации, регламентов и норм ведения технологического процесса на подстанции; необходимо устраивать противоаварийные работы с распределением выполнения работ при аварийных ситуациях [37].

В рассматриваемой рабочей зоне, для увеличения противопожарной устойчивости: периодический осмотр состояния лабораторного оборудования, при необходимости вывод его в ремонт; содержание в исправном состоянии токоведущих проводников, обеспечение беспрепятственного подхода, и отхода от оборудования.

В помещениях для оповещения рабочего персонала о наличие ЧС предусмотрено звуковое оповещение, происходящее при срабатывании датчиков на задымление в помещениях.

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

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует

располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей, рисунок 5.1.



Рисунок 5.1 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещений учебного корпуса №11

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации (рисунок 1), порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к выходу.

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

В данном разделе, посвящённом социальной ответственности был проведен анализ возможных опасных и вредных факторов на рабочем месте исследователя. Были предложены превентивные меры и меры безопасности. Так же проведен анализ безопасности предприятия по отношению к экологии и безопасность в случае чрезвычайных ситуаций. В результате анализа было подтверждено, что все необходимые меры для обеспечения безопасности сотрудников в лаборатории приняты, например, все элементы, порождающие

шум изолированы. Так же в лаборатории установлены широкие пластиковые окна, которые обеспечивают необходимый уровень освещения и вентиляции воздуха. Установлена оптимальная система освещения для обеспечения искусственного белого света. В случае ЧС в лаборатории присутствует план эвакуации, огнетушитель.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A.I. Ryabchikov, P.S. Ananin, S.V. Dektyarev, D.O. Sivin, A.E. Shevelev, High intensity metal ion beam generation, *Vacuum*. 143 (2017) p. 447–453
2. A.I. Ryabchikov. Physical mechanisms of macroparticles number density decreasing on a substrate immersed in vacuum arc plasma at negative highfrequency short-pulsed biasing / D.O. Sivin, A.I. Bumagina // *Applied Surface Science*. – 2014. – 305. – с.487-491
3. A.I. Ryabchikov. Regularities of plasma-immersion formation of long-pulse high-intensity titanium ion beams/ D.O. Sivin, A.E. Shevelev// *Russian Physics Journal*. – 2018. – №7. – с. 1-7.
4. A. S. Bugaev, V. I. Gushenets, A. G. Nikolaev, et al., *ZhTF*, 70, Iss. 9, 37– 43 (2000).
5. A.I. Ryabchikov, D.O. Sivin, O.S. Korneva, I.A. Bozhko, A.I. Ivanova, “Modification of the microstructure and properties of martensitic steel during ultra-high dose high-intensity implantation of nitrogen ions,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 388, pp. 125557, 2020.
6. *Isotopes: Properties, Manufacture, Application* (Ed. V. Yu. Baranov), IzdAT, Moscow (2000).
7. A.I. Ryabchikov, D.O. Sivin, S.V. Dektyarev, A.E. Shevelev, “Formation of repetitively pulsed high-intensity, low-energy silicon ion beams”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, volume 953, pp. 163092, 11 February 2020.
8. A.I. Ryabchikov. Generation of high-intensity aluminum-ion beams/ D.O. Sivin, A.E. Shevelev// *Technical Physics*. – 2018. – №10. – с. 1-9.
9. Wei, R. Low energy, high current density ion implantation of materials at elevated temperatures for tribological applications / R. Wei // *Surf. Coat. Technol.*. – 1996. – Vol. 83.– P. 218–227.

10. A.I. Ryabchikov. Plasma-immersion formation of high-intensity gaseous ion beams/ D.O. Sivin, (and ect.)// Vacuum. – 2019. – с. 1-7.
11. Stepanov I. B. et al. Plasma immersion ion charge state and mass spectrometer //Review of scientific instruments. – 2014. – Т. 85. – №. 2. – С. 02A733.
12. Ryabchikov A. I. et al. High-current-density gas ion ribbon beam formation //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – Т. 906. – С. 56-60.
13. Пранявичюс, Л. Модификация свойств твердых тел ионными пучками / Л. Пранявичюс, Ю. Дудонис. – Вильнюс: Мокслас, 1980. – 342 с.
14. Гусева, М.И. Ионная имплантация в металлах / М.И. Гусева // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1982. – № 4. – С. 27–50.
15. Риссел, Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге ;пер. с нем.; под ред. М.И. Гусевой. – М.: Наука, 1983. – 326 с.
16. Хирвонен, Дж. Ионная имплантация / Дж. Хирвонен.– М.: Metallurgy, 1985.– 392 с.
17. Комаров, Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы / Ф.Ф. Комаров. – М.: Metallurgy, 1990.– 216 с.
18. Шульмин В.А. Экономическое обоснование в дипломных проектах: учебное пособие для вузов / В.А. Шульмин, Т.С. Усынина. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 192 с
19. Кнышова Е.Н. Экономика организации: учебник / Е.Н. Кнышова, Е. Е. Панфилова. – Москва: Форм Инфа-М, 2012 – 334 с.: ил. – Профессиональное образование
20. R.S. Daum, Y.S. Chu, A.T. Motta, J. Nucl. Mater. 392 (2009) 453–463.
21. E.B. Kashkarov, N.N. Nikitenkov, A.N. Sutygina, M.S. Syrtanov, O.V. Vilkhivskaya, et al., Surf. Coat. Technol. 308 (2016) 2–9.
22. Р. Бернш. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой. / Н.Н. Andersen (and ect.). – Издательство «Мир», Москва. – 1984. – с. 35-56.

- 23.Л. Фельдман, Д. Майер. Основы анализа поверхности и тонких плёнок. – Издательство «Мир», Москва. – 1986. – с. 78-86..
- 24.Кнышова Е.Н. Экономика организации: учебник / Е.Н. Кнышова, Е. Е. Панфилова. – Москва: Форм Инфа-М, 2012 – 334 с.: ил. – Профессиональное образование.
- 25.Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От.01.04.2019)
- 26.Федеральный закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» от 24.07.1998 N 165-ФЗ (последняя редакция)
- 27.Федеральный закон «Об основах обязательного социального страхования» от 16.07.1999 N 165-ФЗ (последняя редакция)
- 28.СанПин 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений 105
- 29.СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»
- 30.Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2017
- 31.Беляков Г. И. Охрана труда и техника безопасности [Электронный ресурс]: учебник для прикладного бакалавриата/ГИ Беляков.—3-е изд., перераб. И доп.—Мультимедиа ресурсы (10 директорий; 100 файлов; 740МВ).— Москва: Юрайт, 2016.—1 Мультимедиа CD-ROM.— Бакалавр. Прикладной курс.— Электронные учебники издательства» Юрайт».— Электронная копия печатного издания.—Системные требования: Pentium 100 MHz, 16 Mb RAM //М.: Юрайт.– 2017. – Т. 404.
- 32.ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности.»
ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная болезнь. Общие требования.
- 33.Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств. Охрана труда: учебное пособие для вузов / П.П. Кукин и др. – 5-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2009. – 335 с.

- 34.СН 2.2.4/2.1.8.566. «Санитарные нормы. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий»
- 35.ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
- 36.ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
- 37.СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений.