

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

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
<b>Исследование закономерностей модификации стали 40Х высокоинтенсивными пучками ионов азота в условиях регулируемой энергии ионов</b>

УДК 539.188:621.384.633

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б61	Вахрушев Дмитрий Олегович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник НЛВИИ ИШФВП	Сивин Д.О.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселёва Е.С.	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	Склярова Е.А.	Доцент, кандидат пед. наук		

## Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник способен)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные компетенции</i>		
<b>Р1</b>	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности	Требования ФГОСЗ+ (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4)
<b>Р2</b>	К самоорганизации и самообразованию, работать в коллективе, 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.	Требования ФГОСЗ+ (ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9)
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>		
<b>Р3</b>	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.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-7)
<b>Р4</b>	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.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6)
<b>Р5</b>	Получить 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.	Требования ФГОСЗ+ (ОПК-8, ОПК-9)
<i>Профессиональные компетенции</i>		

<b>P6</b>	<u>Научно-исследовательская деятельность</u> Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, физики плазмы с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.	Требования ФГОСЗ+ (ПК-1, ПК-2)
<b>P7</b>	<u>Научно-инновационная деятельность</u> Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения в результате освоения профильных дисциплин для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.	Требования ФГОСЗ+ (ПК-3, ПК-4, ПК-5)
<b>P8</b>	<u>Организационно-управленческая</u> 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	Требования ФГОСЗ+ (ПК-6, ПК-7, ПК-8)
<b>P9</b>	<u>Педагогически-просветительская</u> Проектировать, организовывать, анализировать педагогическую деятельность, владеть последовательностью изложения материала с использованием междисциплинарных связей физики с другими дисциплинами, участвовать в информационно-образовательных мероприятиях по пропаганде и распространению научных знаний	Требования ФГОСЗ+ (ПК-9)

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  
 \_\_\_\_\_ Склярова Е.А.  
 (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
0Б61	Вахрушеву Димитрию Олеговичу

Тема работы:

Исследование закономерностей модификации стали 40Х высокоинтенсивными пучками ионов азота в условиях регулируемой энергии ионов

Утверждена приказом директора (дата, номер)	26.05.2020 г., №147-54/с
---	--------------------------

Сроки сдачи студентом выполненной работы	08.06.2020 г.
--	---------------

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

##### Исходные данные к работе

*(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.).*

Объектом исследования являются высокоинтенсивные пучки ионов азота низкой энергии (до 1.8 кэВ) с плотностью тока несколько десятков мА/см<sup>2</sup>. Рассмотреть технические возможности убавления энергией ионов в пучке. Рассмотреть возможности модификации стали 40Х высокоинтенсивными пучками ионов азота в условиях регулируемой энергии ионов.

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

*(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).*

- Обзор литературы в области формирования высокоинтенсивных ионных пучков и их применения для модификации материалов; источников;
- формирование высокоинтенсивных пучков ионов азота в условиях управления энергией ионов;
- исследование возможности формирования пучков с энергией ионов ниже 1 кеВ и плотностью ионного тока в пучке несколько десятков мА/см<sup>2</sup>;
- модификация стали 40Х высокоинтенсивными пучками ионов азота с различными энергиями ионов;
- исследование влияния энергии ионов в пучке на ионное распыление поверхности модифицируемой поверхности образца;
- исследование распределение легируемой примеси в ионно-модифицированных образцах из стали 40Х;
- Анализ полученных результатов;
- Социальная ответственность;
- Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Мезенцева И.Л., ассистент ООД
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Киселёва Е.С., Доцент ОСГН ШБИП

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

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник НЛВИИ	Сивин Денис Олегович	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ61	Вахрушев Димитрий Олегович		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОБ61	Вахрушеву Димитрию Олеговичу

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЭФ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	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 сырьё, размер окладов, затраты на электроэнергию, амортизационные расходы
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 30.2%

**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>	Расчёт и оценка сравнительной и финансовой эффективности

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

1. <i>Оценка конкурентоспособности НИ</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Диаграмма Гантта</i>
4. <i>Основные показатели эффективности НИ</i>

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Киселёва Е.С.	к.э.н.		10.03.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОБ61	Вахрушев Димитрий Олегович		10.03.2020

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0Б61	Вахрушев Д.О.

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

Тема ВКР:

Исследование закономерностей модификации стали 40Х высокоинтенсивными пучками ионов азота в условиях регулируемой энергии ионов	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – пучки ионов азота. Рабочее место – лаборатория. Эксперименты проводятся на основе вакуумной системы.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ.</li> <li>– ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ.</li> <li>– ГОСТ 21753-76.</li> <li>– ГОСТ 22613-77.</li> <li>– ГОСТ EN 894-1-2012.</li> <li>– ПНД Ф 12.13.1-03.</li> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</li> <li>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</li> </ul>	Вредные: отклонение показателей микроклимата, превышение уровня шума, недостаточная освещённость рабочей зоны Опасные: опасность поражения током, вероятность возникновения пожара и взрыва газовых баллонов.

<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– в ходе работы дугового испарителя, может образовываться осаждённый слой на поверхности анода, очистка которого приводит к загрязнению литосферы; В ходе работы форвакуумного масляного насоса образуются масляные пары, влияющие на атмосферу.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	– к возможным ЧС относится угроза возникновения пожара и взрыв газовых баллонов; – к типичным ЧС относиться пожар

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			10.03.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б61	Вахрушев Дмитрий Олегович		04.04.2020



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

Школа ИЯТШ  
 Направление подготовки (специальность) 03.03.02 «Физика»  
 Уровень образования Бакалавр  
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики  
 Период выполнения (осенний/весенний семестр 2019/2020 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

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

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.02.2020	Разработка задания	5
03.03.2020	Аналитический обзор литературы	15
11.03.2020	Составление порядка экспериментов по формированию пучков ионов азота и их взаимодействие с образцами из стали 40X	5
01.04.2020	Проведение экспериментов	10
17.04.2020	Анализ результатов экспериментов	15
25.04.2020	Построение графического материала, 3Д модели формирования пучков ионов, написание эскизов	10
14.05.2020	Социальная ответственность	10
20.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
30.05.2020	Заключение	5

СОСТАВИЛ: Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник НЛВИИ	Сивин Денис Олегович	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

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

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 105 с., 31 рисунок, 18 формул, 17 таблиц и 47 используемых источников.

Ключевые слова: высокоинтенсивные пучки ионов азота, баллистическая фокусировка, высокоинтенсивная ионная имплантация, ионное распыление, плазменно-иммерсионное формирование.

Объектом исследования являются пучки ионов азота и их взаимодействие с поверхностью образца из стали 40Х.

Целью работы является формирование высокоинтенсивных пучков ионов азота регулируемой энергии с плотностями ионного тока десятки  $\text{mA}/\text{cm}^2$  при помощи двухсеточной системы формирования пучков, реализующей «accel-decel» принцип, и применение полученных пучков для ионной имплантации азота в сталь марки 40Х с целью уменьшения ионного распыления.

Экспериментально продемонстрировано практически полное отсутствие влияние ионного распыления поверхности при снижении энергии ионов в пучке до 0,4 кэВ. При этом имплантация пучков ионов азота с энергией 0,4 кэВ и максимальной плотностью тока  $58 \text{ mA}/\text{cm}^2$  позволило получить максимальную глубину проникновения примеси азота вплоть до 300 мкм.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	14
1 ОБЩИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ .....	18
1.1 Общие принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов .....	18
1.2 Применение метода высокоинтенсивной имплантации ионов азота и металлов низкой энергии .....	29
1.3 Распыление твёрдого тела ионным пучком.....	35
Выводы по главе «Общий обзор состояния исследования высокоинтенсивной ионной имплантации». ....	39
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА .....	41
2.1 Экспериментальная установка .....	41
2.2 Источник газовой плазмы .....	42
2.3 Система формирования высокоинтенсивных ионных пучков .....	44
2.4 Подготовка образцов .....	48
2.5 Методики исследований ионно-легированных образцов .....	50
Выводы по главе «Описание экспериментальной установки и методики эксперимента» .....	51
3 ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМИ ПУЧКАМИ ИОНОВ АЗОТА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ .....	52
3.1 Исследование закономерностей формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота с применением «accel-decel» системы .....	52
3.2 Имплантации ионов азота в сталь 40X .....	61
Выводы по главе «Ионная имплантация высокоинтенсивными пучками ионов азота низкой энергии».....	64
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....	65

4.1	Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы	65
4.2	Анализ конкурентных технических решений	66
4.3	SWOT – анализ	68
4.4	Организация и планирование работ	71
4.5	Продолжительность этапов работ	73
4.6	Бюджет научного исследования	77
4.6.1	Расчёт материальных затрат	77
4.6.2	Расчёт заработной платы	78
4.6.3	Отчисления во внебюджетные фонды	79
4.6.4	Расчёт затрат на электроэнергию	80
4.6.5	Расчёт амортизационных расходов	80
4.7	Определение сравнительной эффективности исследования	81
	Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	84
5	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	86
	Введение	86
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	86
5.2	Производственная безопасность	88
5.2.1	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	89
5.3	Экологическая безопасность	96
5.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	97
5.4.1	Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	97
5.4.2	Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	98
	Выводы по разделу	99

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	100
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	102

## ВВЕДЕНИЕ

Ионная имплантация представляет собой метод по внедрению ионизированных атомов или молекул в поверхность твёрдого тела. В качестве ионизированных частиц могут выступать как ионы металлов, так и газов включая инертные газы. Ионная имплантация является важным инструментом для модификации поверхностей широкого круга материалов для применения в областях, связанных с фундаментальными исследованиями и прикладными технологиями [1-5]. 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 сильноточных электронных пучков и других, модификация материала в ионной имплантации происходит за счёт изменения элементного и фазового состава в поверхностном слое [1, 4, 5].

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 наукоёмкой 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/см<sup>2</sup> [1, 3, 6]. Это обеспечивает формирование ионно-легированного приповерхностного слоя материала с измененным элементным составом на глубинах, не превышающих несколько долей микрометра.

Для решения основной проблемы ионной имплантации, связанной с малой толщиной легированного ионами слоя, в зависимости от технологических задач, разрабатывалось несколько подходов.

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 [5]. Однако для модификации свойств и структуры металлов и сплавов аналогичный подход оказался экономически нецелесообразен. Низкая стоимость изделий требовала малозатратной технологии, а очень слабая чувствительность металлов к наличию примесей предопределила необходимость увеличения дозы ионного облучения на несколько порядков по сравнению с полупроводниковыми материалами. Поэтому увеличение энергии ионов до десятков и сотен МэВ привело бы к необходимости увеличения дозы облучения материалов и металлов до предельных значений, а стоимость ионной обработки многократно превышала бы стоимость самих изделий.

В случае металлов, сплавов более перспективный подход, с точки зрения создания глубоких ионно-легированных слоев, основан на увеличении глубины проникновения атомов примеси за счет их радиационно-стимулированной диффузии в твердом теле. Развиваемые методы получили название «сильноточной» [7-9] и «высокоинтенсивной» имплантации ионов [10-12].

Важное отличие таких методов ионной имплантации заключается в нагреве обрабатываемой поверхности до температуры, ускоряющей диффузионное перемещение атомов внедренной примеси. Это приводит к увеличению толщины модифицированного слоя на порядок и более. При такой имплантации важная роль принадлежит процессам, связанным с

нестабильностью поверхности, с радиационно-усиленной диффузией имплантируемых элементов [9].

Значимые результаты по формированию глубоко легированных слоев различных сталей и сплавов были получены в результате низкоэнергетической имплантации ионов азота с энергией около 1 кэВ, при плотностях тока в пределах 1–5 мА/см<sup>2</sup>. В работе [7] использовали сильноточную имплантацию ионов азота при повышенных температурах для получения имплантированных слоев в нержавеющей сталях толщиной до 10 мкм за счет диффузионных процессов. Двухчасовая имплантация ионов азота с энергией 1 кэВ, при плотностях тока от 1 до 2 мА/см<sup>2</sup> в мартенситную сталь обеспечивала возможность формирования ионно-модифицированного слоя толщиной 18–20 мкм [8]. Детальные исследования процессов сильноточной имплантации ионов азота позволили сделать вывод, что на глубокое проникновение имплантируемых атомов преимущественное влияние оказывает плотность ионного тока [7, 9]. Энергия ионам нужна только для того, чтобы обеспечить очистку имплантируемой поверхности образца от формирующихся оксидов и карбидов, негативно влияющих на диффузионные процессы.

Появление систем формирования пучков на основе плазменно-иммерсионной экстракции ионов, их ускорения в слое разделения зарядов с последующей баллистической фокусировкой ионного пучка обеспечило возможность увеличения плотности тока ионов с энергией около 1 кэВ до нескольких десятков и сотен мА/см<sup>2</sup> [10]. Очень высокие плотности ионного тока открывают перспективы реализации сверх высокодозовой имплантации и формирования глубоко ионно-легированных слоев за короткие времена.

Коллективом Научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов впервые в мире показана возможность высокоскоростного формирования ионно-легированных слоев в различных материалах на глубинах в десятки и сотни микрометров [11, 12]. Разработанный новый метод, созданное оборудование показали возможность многократного улучшения эксплуатационных свойств различных материалов. В тоже время комплекс



выполненных исследований выявил ряд ключевых научных проблем, требующих своего решения 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 [11, 12], что негативно влияет на морфологию облучаемой поверхности, ее шероховатость. Значительная доля имплантируемых атомов удаляется из ионно-легированного слоя за счет ионного распыления поверхности, что снижает энергетическую эффективность метода и, по всей вероятности, существенно уменьшает глубину диффузии внедряемой примеси. В рамках данного проекта предполагается решение вышеуказанной проблемы.

# 1 ОБЩИЙ ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

## 1.1 Общие принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов

Впервые основные принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов были сформулированы в работе коллектива Научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов Томского политехнического университета в 2017 году в работе [12]. Был предложен новый подход, совмещающий принципы традиционной лучевой и плазменно-иммерсионной имплантации. Представленная в работе система формирования пучков была основана на плазменно-иммерсионном извлечении ионов из плазмы и их последующей баллистической фокусировкой в эквипотенциальном пространстве дрейфа.

На рисунке 1.1 представлена система формирования пучков, которая состоит из нескольких основных элементов: сеточный электрод, сплошной цилиндрический электрод, коллектор, дисковый экран и система формирования высокочастотных короткоимпульсных потенциалов смещения отрицательной полярности.

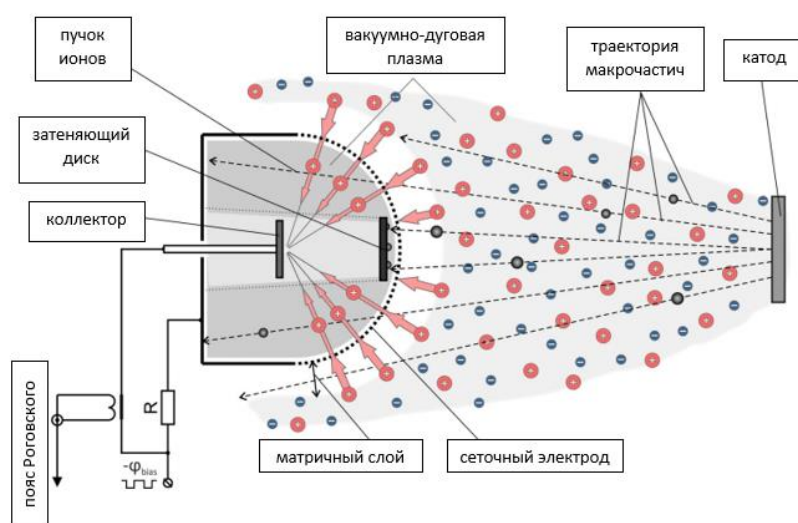


Рисунок 1.1 – Схема формирования и транспортировки пучка, [12]

Как уже было отмечено работа системы 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. Исполнение сеточного электрода в виде невырожденной поверхности второго порядка с центральной симметрией предполагает баллистическую фокусировку потока частиц, нормально укоренных относительно поверхности сеточного электрода, в некоторый фокус. Для электрода в виде части сферы фокус находится в геометрическом центре сферы. Сеточный электрод устанавливался на одном из оснований сплошного металлического цилиндра. Такая конструкция позволила выделить некоторый объем, который ограничивает эквипотенциальное пространство для транспортировки ионного пучка. На противоположном основании цилиндра устанавливались различные коллекторы и датчики. Ускорение ионов и их транспортировка в эквипотенциальном пространстве дрейфа осуществлялись с помощью импульсного потенциала смещения, который одновременно прикладывался к сеточному электроду, сплошному цилиндрическому электроду и коллектору.

В рассматриваемой работе [12] для формирования плазмы использовался вакуумно-дуговой разряд. Однако при создании плазмы вакуумно-дуговым разрядом в результате взрывных эмиссионных процессов на титановом катоде генерируется значительный поток макрочастиц (капель или твердых осколков с размерами от долей микрометров до десятков микрометров), которые снижают технологические возможности системы формирования ионных пучков из-за загрязнения обрабатываемых поверхностей продуктами эрозии катода [13]. 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 дисковый экран (рисунок 1). Используемый в таком положении экран является преградой для практически прямолинейных траекторий движения, эмитируемых с катода макрочастиц в область коллектора, установленного в фокусе системы. При этом ионы пучка из-за баллистической фокусировки с помощью сферического сеточного электрода по прямолинейным траекториям беспрепятственно достигают облучаемой области мишени на коллекторе. Представленные в работе экспериментальные результаты, показали практически полное отсутствие макрочастиц при непрерывном вакуумно-дуговом разряде в области воздействия ионного пучка на мишени при использовании эффекта «solar eclipse». На рисунке 1.2 приставлен пример действия затеняющего диска на удаление макрочастиц из ионного потока.

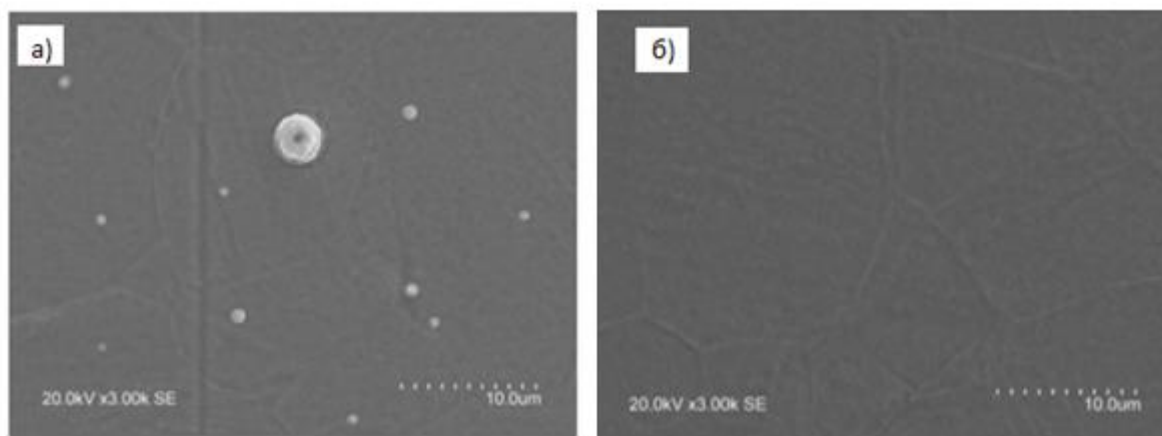


Рисунок 1.2 – Поверхность коллектора после обработки пучком ионов титана, полученного в системе без дискового электрода (а) и с дисковым электродом (б), [12]

Были проведены серии экспериментов на выявление особенностей формирования высокоинтенсивных пучков ионов титана в зависимости от следующих параметров: продолжительность импульса потенциалов смещения на сеточный электрод; амплитуда потенциалов смещения; расстояние между коллектором и сеточным электродом (область дрейфа пучка) и радиусом сеточного электрода. Исходя из представленных в данной работе результатов по формированию сфокусированных пучков ионов титана можно сделать вывод,

что наилучшие условия по формированию ионного пучка наблюдались при расположении коллектора в фокусе системы, где максимальная амплитуда тока достигалась при максимальном ускоряющем напряжении, приложенном на сеточный электрод.

По результатам работы [12] была показана возможность формирования пучков ионов титана с низкой энергией, но высокой плотностью тока до  $1 \text{ А/см}^2$ . Однако изменение радиуса сеточного электрода от 7.5 до 10.5 см продемонстрировало уменьшение амплитуды ионного тока в зависимости от продолжительности импульсов потенциала смещения. Такое поведение также может быть связано с ухудшением эффективности транспортировки пучка в пространстве дрейфа на столь большие расстояния. Данное предположение легло в основу следующих работ по формированию высокоинтенсивных пучков ионов титана с большой длительностью импульса до 30 мкс, [14].

Было показано, что формирование и транспортировка ионного пучка невозможна при невыполнении условия нейтрализации пространственного заряда в области дрейфа. При неполном заполнении пространства дрейфа плазмой, эффективная транспортировка пучка ограничивается возникновением в вакуумном зазоре значительного, вплоть до образования виртуального анода, провисания потенциала. В связи с этим, исследования показали существование вероятности развития пучковой неустойчивости при длительности импульса более 15 мкс, рисунок 1.3.

Как видно из осциллограмм, в течении первых 15 мкс ток пучка на коллекторе стабилен, однако после увеличения длительности импульса наблюдается срыв ионного тока на коллекторе. В результате этого лишь несущественный процент импульсов ионного тока имеет продолжительность 30 мкс.

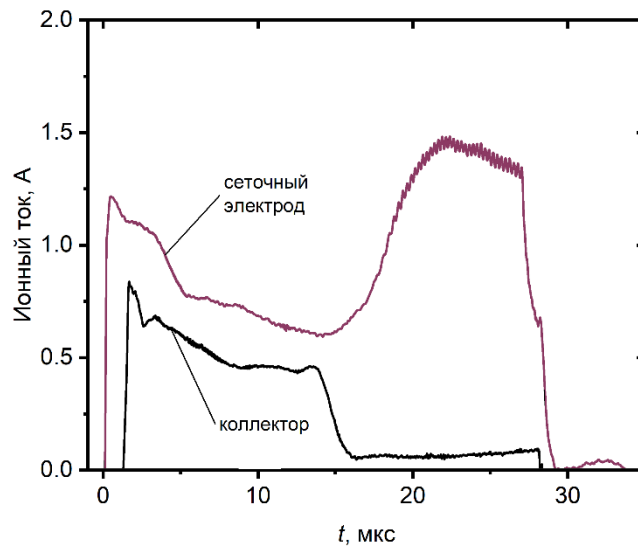


Рисунок 1.3 – Характерная осциллограмма ионного тока на коллекторе (нижняя кривая) и сеточном электроде (верхняя кривая) при возникновении неустойчивости пучка ионов титана большой длительности [14]

Увеличение вероятности срыва может быть связано с уходом из пучка, плазменных электронов. Однако, применение импульсного и импульсно-периодического режимов формирования ионных пучков из плазмы непрерывной вакуумной дуги обеспечило возможность предварительной инжекции плазмы в пространство дрейфа внутри потенциального электрода с целью компенсации пространственного заряда. Таким образом, должно выполняться условие предварительного заполнения плазмой пространства дрейфа пучка ионов (1.1). Данное условие определяется скоростью направленного движения плазменного потока  $v_0$ , длиной вакуумного зазора в пространстве дрейфа  $R$  и длительностью паузы между импульсами смещения  $t = \frac{1}{f} - \tau$ , где  $\tau$  – длительность импульса смещения, а  $f$  – частота импульса смещения.

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

Увеличение ускоряющего напряжения приводит к уменьшению вероятности срывов транспортировки ионного пучка, что в свою очередь влечёт за собой увеличение ионного тока на коллекторе. Дело в том, что при подаче отрицательного потенциала смещения на фокусирующий электрод, формируется

матричный слой разделения зарядов. Внутри слоя под действием электрического поля ионы ускоряются, в то время как электроны покидают приэлектродное пространство. В данном слое изменяются как распределение плотности ионов в зазоре, так и распределение ионов по скоростям. Для оценки толщины окончательно сформированного слоя разделения зарядов, то есть когда ширина достигает стационарного значения можно применить формулу Чайлда-Ленгмюра:

$$d = \sqrt{\frac{4}{3} \varepsilon_0 \cdot \left(\frac{2Ze}{M}\right)^{1/2} \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{j}}, \quad (1.2)$$

где  $Ze$  – среднее зарядовое состояние ионов,  $M$  – масса иона,  $j$  – плотность ионного тока насыщения плазмы,  $\varphi$  – ускоряющее напряжение смещения.

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):

$$j = Ze \cdot n_0 \cdot v_0. \quad (1.3)$$

В качестве  $v_0$  можно использовать скорость направленного движения плазменной струи. При формировании слоя разделения зарядов и ускорении ионов в слое, плотность потока ионов в пучке  $n_{\text{уск}}$  снижается обратно пропорционально увеличению их скорости

$$n_{\text{уск}} = \frac{n_0 v_0}{v_{\text{уск}}} = \frac{n_0 v_0}{\sqrt{\frac{2Ze\varphi}{m}}}, \quad (1.4)$$

С учётом сферической геометрии сеточного электрода, в процессе фокусировки пучка, плотность ионов возрастает как:

$$n_{\text{фок}} = \frac{n_{\text{уск}} \cdot R^2}{(R - \Delta R)^2}, \quad (1.5)$$

где  $R$  – радиус фокусирующего электрода,  $\Delta R$  – расстояние пройденное пучком ионов в пространстве дрейфа.

Равенство плотностей ионного тока и плазмы имеет место при  $\varphi = -1$  кВ на расстоянии около 3 см от коллектора, при  $\varphi = -2$  кВ на расстоянии около 2.5 см. При транспортировке пучка на большие расстояния, нейтрализация его пространственного заряда нарушается и возникает провисание потенциала.

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

Исследования проводились при изменении остаточного давления воздуха в вакуумной камере в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  Па, рисунок 1.4. При увеличении давления наблюдалась постепенная стабилизация пучка ионного тока на коллекторе с полной стабилизацией транспортировки пучка при давлении  $10^{-1}$  Па.

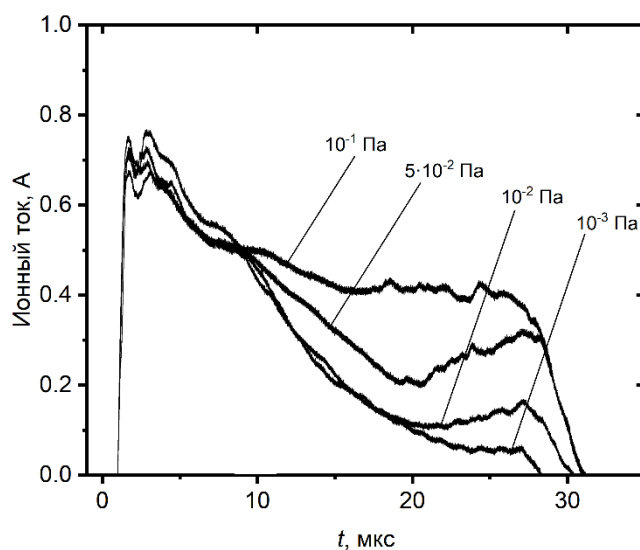


Рисунок 1.4 – Осциллограммы ионного тока на коллекторе в зависимости от



давления рабочего газа в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  Па при разности потенциалов смещения – 2 кВ, [14].

Идея заключалась в том, что ионный пучок, проходя через газ, будет ионизировать молекулы газа с образованием медленных ионов и холодных электронов, тем самым наработывая «пучковую плазму» в области дрейфа. Тогда, образованные в результате столкновения ионы газа вытесняются благодаря пучку ионов, сфокусированных из области матричного слоя, имеющих большую энергию и ориентированное направление распространения, а оставшиеся после ионизации атомов газа электроны будут способствовать нейтрализации пространственного заряда. Оценку числа электронов, полученных после ионизации атомов газа можно провести через следующее соотношение:

$$N_{\text{эл}} = n_{\text{газ}} \sigma R, \quad (1.6)$$

где  $\sigma$  – эффективное сечение ионизации ударом иона.

Если учесть, что скорость ионов титана при приложении отрицательного потенциала смещения, амплитудой -2 кВ, приблизительно равна  $1.3 \cdot 10^7$  см/с и давление в рабочей камере  $10^{-3}$  Па, то опираясь на работы [15,16] эффективное сечение ионизации составит  $\sigma = 5 \cdot 10^{-16}$  ион/см<sup>3</sup>, время наработки составит более 1 мс (миллисекунды), что многократно превышает длительность импульса и в таком случае, условие (1.1) не выполняется. Время наработки вычислялось по формуле:

$$\tau_{\text{эл}} = \frac{Z}{n_{\text{газ}} \sigma v_{\text{ион}}}. \quad (1.7)$$

Соответственно факт стабилизации ионного тока на коллекторе объясняется уменьшением времени наработки до  $\sim 100$  мкс при давлении рабочего газа  $10^{-2}$  Па и  $\sim 10$  мкс при  $10^{-1}$  Па. Можно отметить также характерную особенность, заключающуюся в отсутствии влияния давления на начальную амплитуду ионного тока.

Существенного изменения стабильности транспортировки высокоинтенсивного пучка ионов титана удалось добиться при экспериментах с дополнительным дисковым электродом, установленным непосредственно на сетке. Наблюдалась стабилизация пучка даже без использования дополнительного электронного облака [14].

Ранее уже отмечалось, что дисковый электрод не только исключает попадание макрочастиц вакуумной дуги на поверхность коллектора, как было отмечено в работе [12], но и положительно влияет на транспортировку пучка, [14].

В работе [17] отмечалась возможность формирования высокоинтенсивных пучков ионов алюминия с максимальной амплитудой ионного тока на коллекторе до 1.2 А. Было продемонстрировано увеличение ионного тока при изменении размера коллектора от 4 до 12 см. Также отмечалось, что при расположении коллектора в фокусе системы удалось достичь плотностей тока до  $0.25 \text{ А/см}^2$ , более того, увеличении длины транспортировки пучка за фокус системы на 1 и 2 см показало увеличение плотности тока до  $0.36 \text{ А/см}^2$  и  $0.47 \text{ А/см}^2$  соответственно. Дальнейшее отдаление коллектора от фокусирующего электрода иллюстрировало снижение плотности тока.

При работе с имплантацией пучком ионов азота с низкой энергией, Р. Вей [7] продемонстрировал что основным фактором, влияющим на глубину проникновения примеси, является высокая плотность ионного тока, а не энергия ионов. В связи с этим, в работе [18] были исследованы закономерности формирования высокоинтенсивных пучков ионов различных газов в зависимости от амплитуды потенциала смещения с максимальной амплитудой - 2.4 кВ, ионного тока от частоты следования импульса потенциалов смещения в диапазоне от 10 до 100 кГц и длительности импульсов от 2 до 80 мкс.

На рисунке 1.5 показана схема фокусировки газовых пучков. Отличительной особенностью этой системы от системы фокусировки вакуумно-

дуговой металлической плазмы является отсутствие затеняющего электрода. Данная особенность связана с отсутствием микрокапельных фракций.

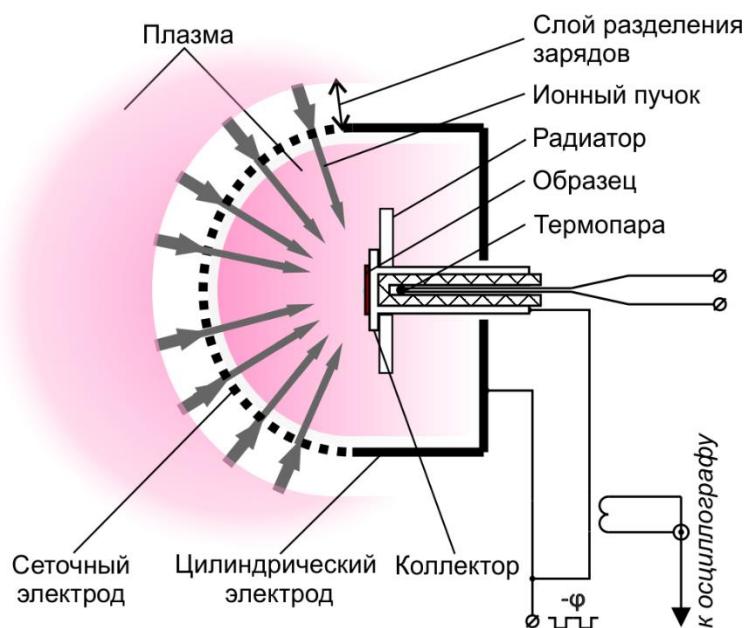


Рисунок 1.5 – Схема формирования газовых пучков, [10]

В случае газоразрядной плазмы, формируемой при повышенных давлениях, примерно на 2 порядка выше по сравнению с вакуумно-дуговой металлической плазмой, на процессы нейтрализации объёмного заряда фокусированного объёмного пучка существенное влияние может оказывать формирование плазмы за счёт ионизации рабочего газа ионами пучка в пространстве дрейфа.

По мере увеличения длительности ионного пучка, влияние переходных процессов на эффективность транспортировки и фокусировки ионного пучка снижается. Благодаря этому факту, исследования закономерности формирования пучков ионов с различной длительностью импульса вплоть до 80 мкс при частотах следования импульса потенциала смещения 10, 20 и 30 кГц продемонстрировали стабильное формирование тока на протяжении всего импульса, рисунок 1.6.

В работе [18] было также 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.

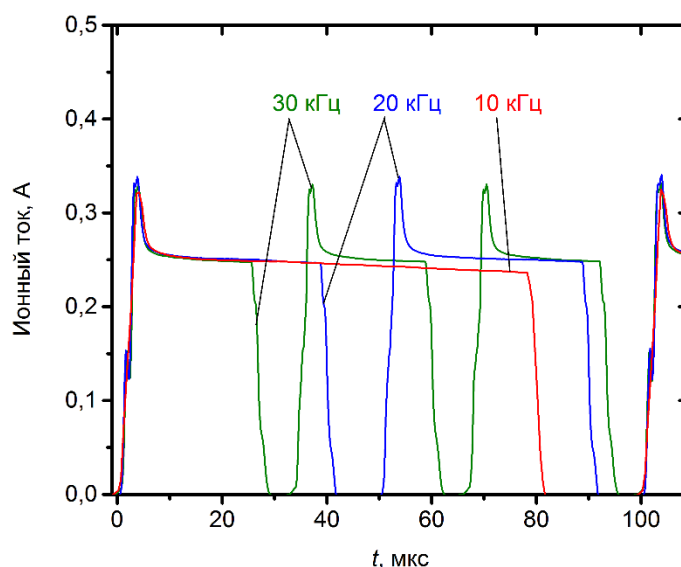


Рисунок 1.6 – Осциллограммы тока пучка ионов азота при частотах следования импульса потенциала смещения 10, 20 и 30 кГц, [18]

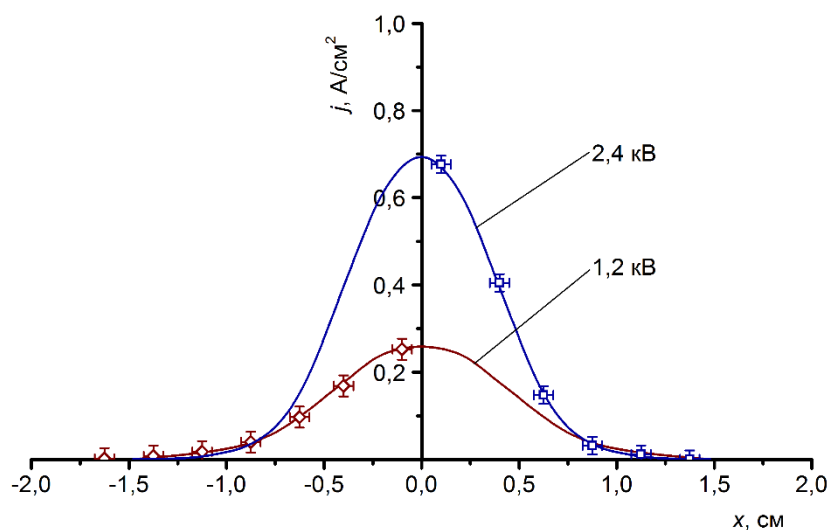


Рисунок 1.7 - Радиальные распределения плотности ионного тока по сечению пучка ионов азота с энергией ионов 1,2 и 2,4 кэВ в плоскости коллектора. [18]

Помимо аксиально-симметричных пучков возможно формирование ленточных импульсно-периодических пучков ионов. В работе [19] 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.

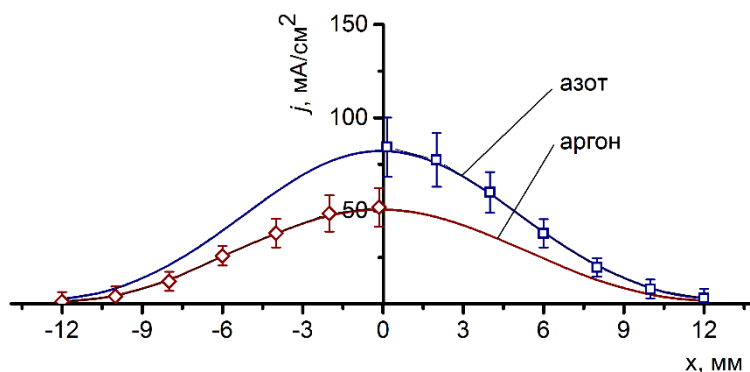


Рисунок 1.8 - Распределение плотности ионного тока ( $j$ ) по сечению пучков ионов азота и аргона [19]

## 1.2 Применение метода высокоинтенсивной имплантации ионов азота и металлов низкой энергии

Применение ионной имплантации имеет ряд преимуществ перед другими методами модификации поверхностей, такие как отсутствие адгезии и хорошо контролируемые концентрация и глубина легируемой примеси. В связи с этим появился большой интерес к изучению процессов воздействия пучками ионов на материалы. Так, работа [10] была направлена на исследование влияния плотности тока ионов азота с энергией 1.2 кэВ на формирование кратера ионным распылением, глубину азотирования и изменение микроструктуры и свойств модифицированных слоёв образцов из стали 40X. Азотирование проводилось в вакуумной экспериментальной установке при давлении рабочей атмосферы  $10^{-3}$  Па, на основе плазменно-иммерсионной экстракции ионов с их последующей баллистической фокусировкой в область дрейфа.

На рисунке 1.9 продемонстрирована зависимость образования кратера, максимальная глубина которого соответствовала максимальному распределению плотности тока по сечению, основанному на измерениях ионного тока на мишени при разных температурных режимах. Время обработки образца составляло 80 минут.

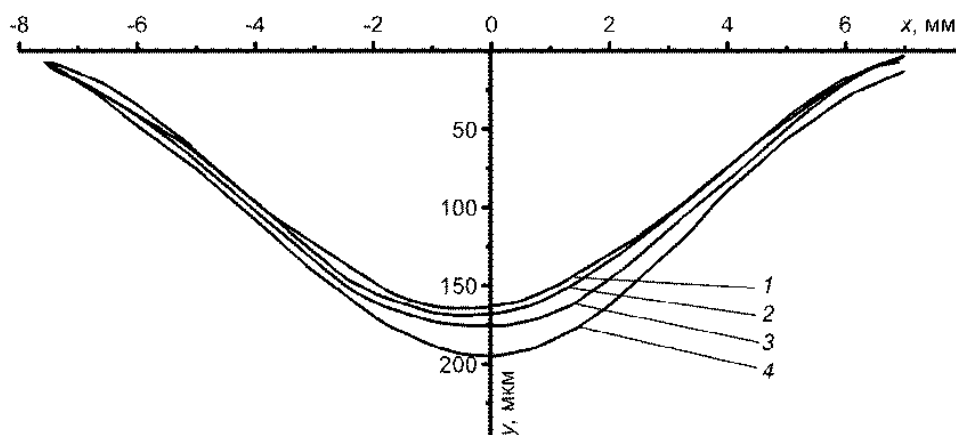


Рисунок 1.9 - Распределение плотности ионного тока ( $j$ ) и сечения поверхности модифицированных образцов ( $T = 450 \dots 650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) по сечению пучка ионов азота в области максимальной глубины кратера [10]

Результаты показали явную зависимость глубины кратера от температуры процесса. Так, минимальная глубина наблюдалась при температуре обработки в  $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , а максимальная соответственно при  $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Влияние температурного режима на ширину азотированного слоя также было продемонстрировано. Максимальная глубина залегания примеси азота наблюдалась при температуре  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и на расстоянии 4 мм от центра кратера, рисунок 1.10. При рассмотрении микрофотографий металлографических шлифов азотированного образца при температуре обработки  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  была показана толщина легированного слоя, составляющая примерно 70 мкм в центре кратера. Также выявлено образование тонкого слоя шириной не более 15 мкм с более плотной структурой на расстоянии 2 мм от центра кратера, ширина которого увеличивалась при увеличении расстояния от кратера. Так, уже на расстоянии 4 мм явно выражалась двухслойная структура где ширина более плотной достигала 25 мкм, а общая ширина модифицированного слоя 130 мкм.

Дальнейшее увеличение расстояния от центра кратера демонстрировало незначительное уменьшение ширины слоя до значений примерно 120 мкм.

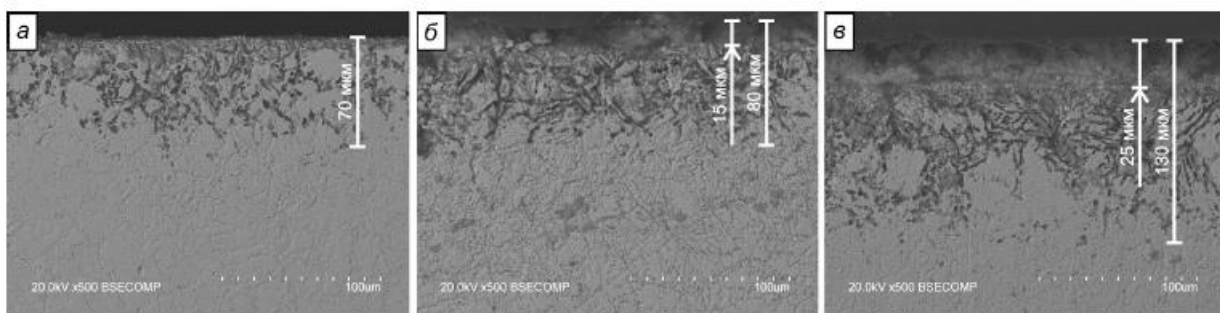


Рисунок 1.10 – Микрофотографии металлографических шлифов образцов модифицированного при температуре 500 °С, полученные в центре (а) и на расстояниях от центра кратера 2 мм (б) и 4 мм (в), [10]

Полученные результаты показали, что на формирование глубоких ионно-легированных слоев азота оказывают существенное влияние плотность ионного тока и температура мишени. Противоборствующим процессом радиационно-стимулированной диффузии выступает ионное распыление поверхности. Толщина распыленного слоя в центре мишени соизмерима и даже превышает при отдельных режимах облучения ширину ионно-модифицированного слоя.

Имплантированные азотом образцы при температурах 450 °С, 500 °С и 580 °С показали значительное увеличение твердости и трибологических свойств приповерхностного слоя.

На примере работы [29] по облучению высокохромистой стали 40Х13 пучком ионов азота в течение часа при температуре 500 °С, было продемонстрировано формирование ионно-легированного слоя толщиной до 75 мкм и увеличение микротвердости поверхности образца в 2-3 раза относительно исходного материала.

При помощи методов РСА и ПЭМ было продемонстрировано, что формируемый в процессе ионной имплантации модифицированный слой стали 40Х13 представляет собой многофазную систему, состоящую из матричного  $\alpha$  –

фазы с распределёнными в ней частицами вторичных фаз нитрида железа  $Fe_4N$  ( $\gamma'$  – фаза) и нитрида хрома CrN.

В результате идентификации микродифракционных картин было зарегистрировано наличие матричных рефлексов нитрида железа и нитрида хрома вплоть до глубины 30 мкм, что говорит о толщине модифицируемого слоя на десятки микрометров.

Анализ влияния дозы облучения на модификацию стали 40X13 показал следующие результаты: увеличение дозы имплантации от  $1.6 \times 10^{21}$  ион/см<sup>2</sup> и  $2.25 \times 10^{21}$  ион/см<sup>2</sup> ширина слоя с повышенной микротвёрдостью увеличилась на 21%.

В работе [20] проводились исследования по модификации подложки алюминия. Исследование алюминия в качестве образца проводилось в связи с широтой использования данного материала. Несмотря на это, большинство сплавов алюминия имеют низкие механические характеристики, такие как твёрдость и износостойкость. Была показана возможность глубокой модификации поверхности за счёт формирования слоя интерметаллидного соединения  $Al_3Ti$  толщиной более 6 мкм. Образование интерметаллидного слоя  $Al_3Ti$  значительно повысило механические свойства алюминия. Помимо этого, формирование Ti-Al интерметаллидов существенно улучшает коррозионную стойкость и трибологические свойства [21], прочность и жёсткость [22].

Увеличение толщины модифицированного слоя от температуры также было показано, рисунок 1.11. По данным концентрационных профилей видно увеличение толщины легирования ионов титана от 1 до 6 мкм при увеличении температуры на 200 К.



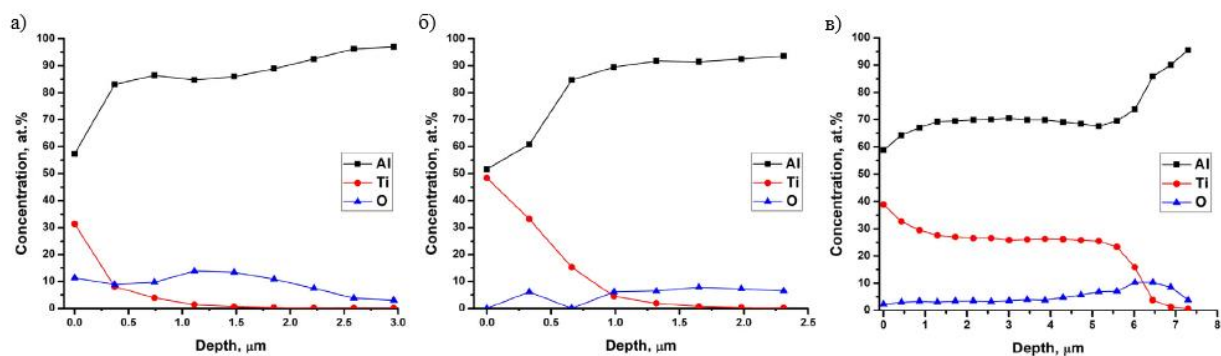


Рисунок 1.11 – Концентрационные профили при температурах легирования 623 К (а), 723 К (б) и 823 К (в), [20]

Также на примере работы [23] было показано влияние высокоинтенсивной низкоэнергетической имплантации ионов титана в циркониевые сплавы с целью повышения их механических характеристик.

Циркониевые сплавы широко используются в качестве основного конструкционного материала для оболочек ядерного топлива реакторов с водяным охлаждением из-за низкого сечения тепловых нейтронов, высокой температуре плавления, коррозионной стойкости в воде и хорошим механическим свойствам в нормальных условиях эксплуатации. Однако, в случае аварии при потере теплоносителя (LOCA) температура оболочки топлива быстро повышается до 1200 °С, что приводит к высокой скорости коррозии и образованию большого количества водорода [24]. Выделившийся водород поглощается оболочками топлива, что вызывает водородное охрупчивание материала [25]. Значительное снижение гидрогенизации сплава Zr-1Nb после плазменной имплантации ионов титана было достигнуто за счет захвата водорода ионно-модифицированным слоем [26]. Также было обнаружено, что толщина модифицированного слоя оказывает существенное влияние на скорость диффузии и количество «захваченного» водорода.

Влияние ионной имплантации на механические характеристики показаны на рисунке 1.12. Средняя твердость образцов, имплантированных титаном, увеличивается по сравнению с необработанным циркониевым сплавом (2,5–3 ГПа).

Существует также тенденция к увеличению твердости имплантированного слоя наряду с увеличением дозы имплантированного титана. Наибольшее увеличение твердости имплантированного слоя составило приблизительно 50% при приложенных нагрузках от 10 до 50 мН.

Износостойкость сплава возрастает с увеличением дозы имплантации при плотности тока 120 мА/см<sup>2</sup>. Однако дальнейшее увеличение дозы при имплантации при более высокой плотности тока приводит к ухудшению износостойкости. Такое поведение может быть вызвано высокой шероховатостью поверхности, а также размером зерна модифицированного сплава.

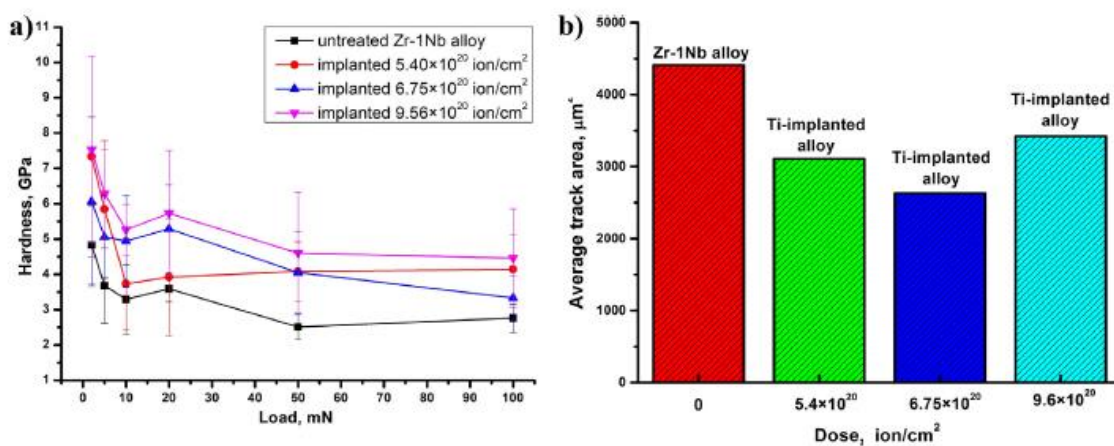


Рисунок 1.12 – Твёрдость по Викерсу (а) и износостойкость (б), [23]

Помимо повышения характеристик твёрдости и износостойкости, на примере работы [21] была продемонстрирована возможность использования метода низкоэнергетической высокоинтенсивной ионной имплантации для повышения стойкости к окислению циркониевого сплава Zr-1Nb благодаря имплантации ионов хрома.

Было отмечено, что циркониевые сплавы имеют низкую стойкость к окислению в паровой среде. Разработка защитных слоев, образующих оксид хрома на поверхности во время окисления, является одним из основных и наиболее перспективных подходов для аварийных топливных оболочек. Выбор хрома в качестве защитных покрытий для ядерных оболочек обусловлен

повышенной коррозионной стойкостью в паре до 1200 °С, тем же коэффициентом теплового расширения, что и Zr, улучшенными механическими свойствами и износостойкостью.

Для оценки стойкости к окислению образцов Cr-имплантированных циркониевых сплавов были проведены высокотемпературные испытания на окисление в атмосфере пара. Испытания на высокотемпературное окисление паром, проведенные при 1000 и 1200 °С, показали, что стойкость к окислению циркониевого сплава улучшилась после имплантации ионов хрома на 40-45%.

### 1.3 Распыление твёрдого тела ионным пучком

На основе результатов, полученных в работе [10], можно сделать вывод о многофакторном характере модификации стали. С одной стороны, с повышением температуры, в соответствии с законами Фика, коэффициент диффузии увеличивается, что влечёт за собой увеличение глубины легирования ионов азота. Таким образом температура благоприятно влияет на процесс ионного легирования. С другой стороны, с повышением температуры увеличивается эффект ионного распыления. Толщина слоя распыления может достигать и даже превышать ширину ионно-модифицированного слоя. Иными словами, распыление коллектора представляет собой негативный фактор модификации материалов методом ионной имплантации. Остановимся чуть подробнее на теории распыления.

Распыление – разрушение поверхности, подвергаемой бомбардировке быстрыми частицами вследствие удаления её атомов. Распыление на поверхности является результатом каскада атомных столкновений в граничных, т.е. поверхностных слоях твёрдого тела с наиболее распространённым механизмом распыления металлов за счёт прямого выбивания. В общем случае можно выделить три качественно различных случая: режим первичного выбивания атомов, режим линейных каскадов и режим тепловых пиков. При этом область линейных каскадов соответствует энергиям от единиц

килоэлектронвольт до мегаэлектронвольт, что идёт в соответствии с экспериментальными данными представленными в работе [10].

Распыление, то есть эрозию поверхности можно характеризовать параметром, названным коэффициентом распыления или выходом продуктов распыления, который по определению находится следующим образом:

$$Y = \frac{\text{число удалённых атомов}}{\text{число падающих частиц}}, \quad (1.8)$$

Распыление поверхности можно разделить на физическое и химическое. К физическому относиться механизм передачи импульса атомам мишени с их последующим вылетом при условии преодоления барьера, связанного с поверхностными силами связи со стороны мишени. К химическому относиться образование на поверхности мишени нестабильных соединений, которые, при достижении определённых условий, способствуют увеличению коэффициента распыления, либо наоборот уменьшению в случае образования твёрдых соединений таких как карбиды и оксиды. Проведём теоретический обзор по коэффициенту распыления в случае плоской поверхности мишени на основе теории линейных каскадов.

Информация предоставленная ниже в основном была взята из книги Рейнера Бериша [27] и Фельдмана Л. И Майера Д. [28].

Выход продуктов распыления должен быть пропорционален числу смещённых или отскочивших атомов. В случае линейного каскада, число атомов отдачи пропорционально ядерным потерям энергии на единицу толщины. Тогда коэффициент распыления  $Y$  можно представить следующим образом:

$$Y = \lambda \cdot F_D(E, \theta), \quad (1.9)$$

где  $\lambda$  – константа зависящая от характерный свойств материала мишени, но не зависит от параметров, характеризующих ион, которая в общем виде задаётся выражением:

$$\lambda = \frac{\Gamma_m}{2} \int \frac{dE_0}{E_0 |dE_0/dx|} \int d(\cos\theta_0) |\cos\theta_0| P(E_0, \theta_0), \quad (1.10)$$

где  $P(E_0, \theta_0)$  вероятность отрыва атома от поверхности.

Функция  $F_D(E, \theta)$  – функция распределения поглощённой энергии по глубине,  $E$  – энергия первичных частиц,  $\theta$  – угол падения первичных частиц на поверхность мишени.

Допущения, введённые при использовании формул (1.9, 1.10):

1. предполагалось, что режим распыления соответствует условиям линейного каскада, то есть в движение приходит лишь малая часть атомов мишени в объёме каскада;
2. было введено предположение об изотропности низкоэнергетических атомов каскада;
3. предполагалось, что поверхность мишени не вносит существенного вклада в развитие каскада столкновений;
4. не учитывались объёмные силы связи атомов мишени;
5. не учитывались ориентационные эффекты, связанные с кристаллической структурой мишени.

Однако, при учёте сил поверхностной связи в металлах, можно ввести следующее условие:

$$P(E_0, \theta_0) = \begin{cases} 1 & \text{при } E_0(\cos\theta_0)^2 > U_0 \\ 0 & \text{при } E_0(\cos\theta_0)^2 \leq U_0 \end{cases} \quad (1.11)$$

В таком случае, формулу (1.10) можно преобразовать к виду:

$$\lambda = \frac{\Gamma_m}{8(1-2m)} \cdot \frac{1}{NC_m U_0^{1-2m}}, \quad (1.12)$$

Из теории Зигмунда, падающая частица сталкивается с атомами твёрдого тела и при этом передаёт им свою энергию. Если передаваемая энергия больше энергии связи атома в кристаллической решётке  $E_0 \geq U_0$ , то он выбивается из своего равновесного положения и можно положить  $m = 0$ , тогда формула (1.12) преобразуется к более простому виду:

$$\lambda = \frac{3}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{NC_0 U_0}, \quad (1.13)$$

где  $C_0 = \frac{\pi}{2} \lambda_0 a_{\text{ВМ}}^2$ , некоторая константа со значениями  $\lambda_0 \approx 24$ ,  $a_{\text{ВМ}} = 0.219 \text{ \AA}$ , а  $N$  – плотность атомов мишени.

Второй множитель в формуле (1.9) можно найти из соотношения:

$$F_D(E, \theta) = \alpha \left( \frac{M_2}{M_1}, \tilde{\theta} \right) N S_n(E), \quad (1.14)$$

где  $\alpha$  – некоторая безразмерная функция от отношения масс матрицы и иона  $M_2/M_1$  и угла падения налетающей частицы, а  $N S_n(E)$  – ядерные потери энергии, где  $N$  – число атомов в единице объёма твёрдого тела.

Вклад от  $\alpha(M_2/M_1)$  может быть найдена из рисунка 1.13. Для случая, предложенной в работе [10], отношение масс атома мишени железа и иона азота составляет:  $M_2/M_1=4$ , тогда  $\alpha \approx 0.66$ .

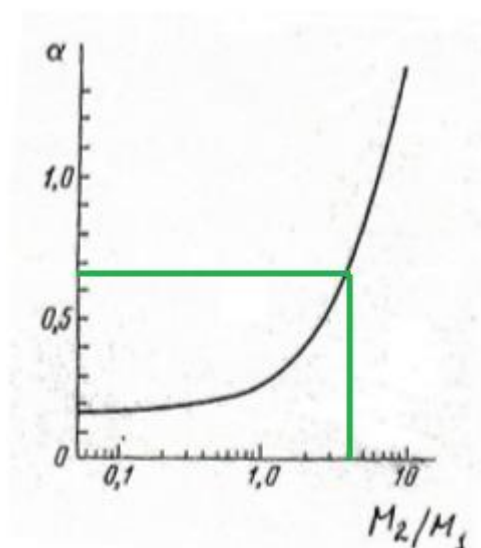


Рисунок 1.13 – зависимость величины  $\alpha$  от отношения масс  $M_2/M_1$ , [27]

В работе [10], в условиях баллистической фокусировки ионов в широком диапазоне углов отклонения, стоит рассматривать задачу о нахождении коэффициента распыления разбиением всего диапазона углов на отдельные составляющие. Тогда коэффициент распыления можно будет оценить, как среднее арифметическое.

При движении заряженных частиц в твёрдом теле, потери энергии происходят по результатам двух процессов: 1) передачи энергии электронам и 2) передачи энергии атомам. Пик сечения ядерных потерь приходится при

значениях энергии 0.1 – 10 кэВ. Величина энергии ионов 1.2 кэВ в работе по модификации стали 40X соответствует этому диапазону.

$S_n(E)$  – сечение ядерного торможения, можно найти следующим образом:

$$S_n(E) = 4\pi a Z_1 Z_2 e^2 \frac{M_1}{M_1 + M_2} s_n(\varepsilon), \quad (1.15)$$

где  $Z_1 e$  и  $Z_2 e$  – заряды ядер,  $s_n(\varepsilon)$  – универсальная функция, зависящая от точного вида используемого экранированного кулоновского потенциала, где  $\varepsilon$  – приведённая энергия задаваемая в эВ, определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{M_2 E}{M_1 + M_2} \frac{a}{Z_1 Z_2 e^2}, \quad (1.16)$$

где  $a \approx \frac{0.885 a_0}{\sqrt{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}}} \approx 0.133 \text{ \AA}$  – радиус экранирования для ионов азота и атомов

мишени железа,  $a_0 = 0.529 \text{ \AA}$  – радиус Бора,  $E$  – энергия налетающего иона.

Для оценки ядерных потерь можно воспользоваться упрощённой формулой

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_n = N \frac{\pi^2}{2} Z_1 Z_2 e^2 a \frac{M_1}{M_1 + M_2}. \quad (1.17)$$

Тогда общее выражение для коэффициента распыления с учётом формулы (1.17) будет:

$$Y = \frac{3}{8} \cdot \frac{1}{c_0 U_0} \cdot Z_1 Z_2 e^2 a \frac{M_1}{M_1 + M_2} \quad (1.18)$$

Подставляя значения  $U_0 = 3$  [эВ],  $e^2 = 14.4$  [эВ · Å], то  $Y \approx 4.84$ .

Выводы по главе «Общий обзор состояния исследования высокоинтенсивной ионной имплантации».

Таким образом, в данной главе был проведён литературный обзор и показана возможность формирования высокоинтенсивных пучков ионов как металлов, так и газов с энергией ионов единицы кэВ при помощи односеточной системы формирования. Возможность формирования аксиально-симметричных и ленточных пучков ионов с плотностью ионного тока до сотен мА/см<sup>2</sup> была продемонстрирована.

Возможности модификации материалов, а именно повышение коррозионной стойкости, увеличение микротвёрдости образцов в 2-3 раза, значительное снижение гидrogenизации сплавов Zr-1Nb и повышение износостойкости также были продемонстрированы.

По результатам литературного обзора была выявлена проблема, препятствующая модификации материалов, связанная с распылением поверхности. Толщина распылённого слоя могла достигать и даже превышать толщину модифицированного слоя при определённых условиях. Была показана зависимость коэффициента распыления от энергии падающих ионов и, в связи с этим, было выдвинуто предложение уменьшения энергии ионов для снижения распыления поверхности.



## 2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

### 2.1 Экспериментальная установка

Исследования по формированию высокоинтенсивных пучков ионов азота проводились на комплексной технологической установке, схема которой представлена на рисунке 2.1.

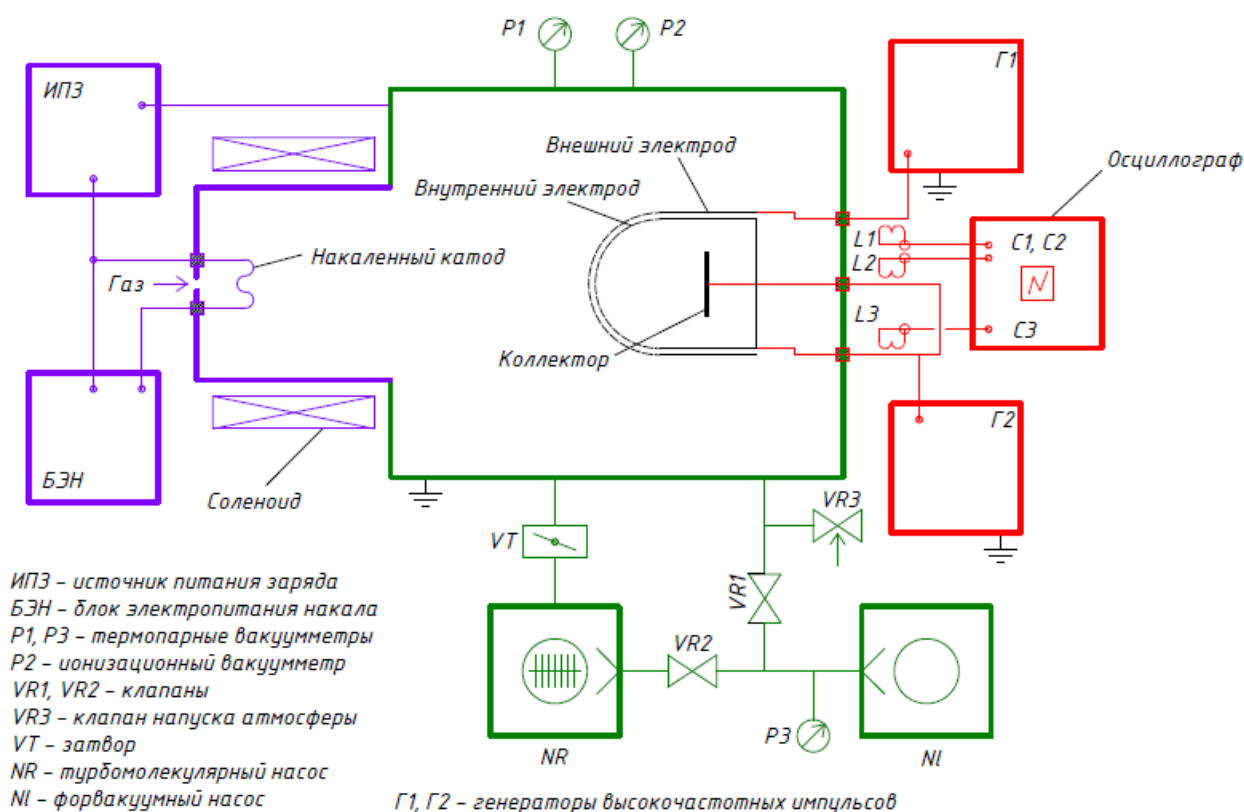


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки

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.

## 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 2.2 приведена схема плазмогенератора, пристыкованного 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.

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 натекателем через газовый ввод [30].

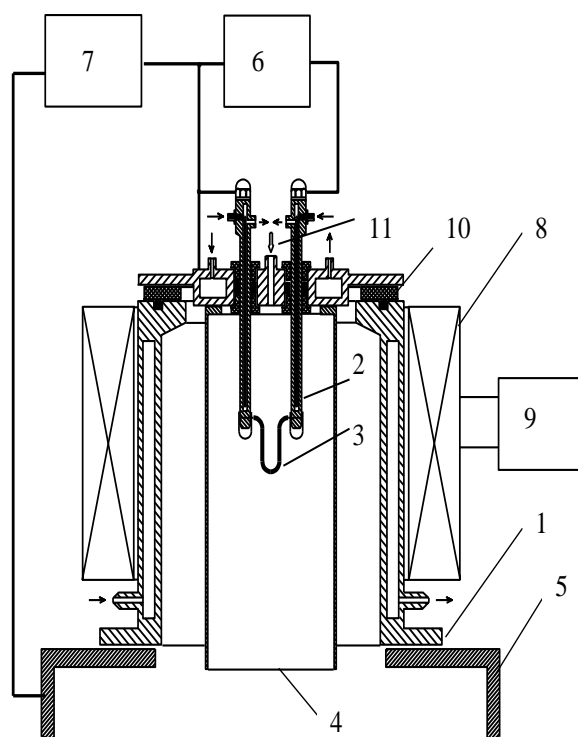


Рисунок 2.2- Схема плазмотрона «PINK»

1 - водоохлаждаемый корпус плазмотрона, 2 – электроввод, 3 - накаливаемый катод, 4 - цилиндрический полый катод, 5 - анод (стенки вакуумной камеры), 6 - источник питания накала, 7 - источник питания разряда, 8 - магнитная катушка, 9 - источник питания магнитной катушки, 10 – изолятор, 11 – газопровод

Эмитируемые накаливаемым 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 накаливаемого 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 накаливаемая 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 (рисунок 2.1).

### 2.3 Система формирования высокоинтенсивных ионных пучков

В первой главе на основе экспериментальных результатов [10, 19] было показано, что предложенная система формирования аксиально-симметричных пучков ионов низкой энергии имеет недостаток, связанный с существенным ионным распылением пучком поверхности обрабатываемых деталей. Одним из способов снижения влияния этого негативного фактора, связан с уменьшением энергии ионов в пучке. Одним из очевидных способов управления энергией ионов в пучке может выступать традиционная система электродов типа «accel-decel».

На рисунке 2.3 изображена общая схема применения «accel-decel» принципа для формирования и фокусировки высокоинтенсивных ионных пучков.

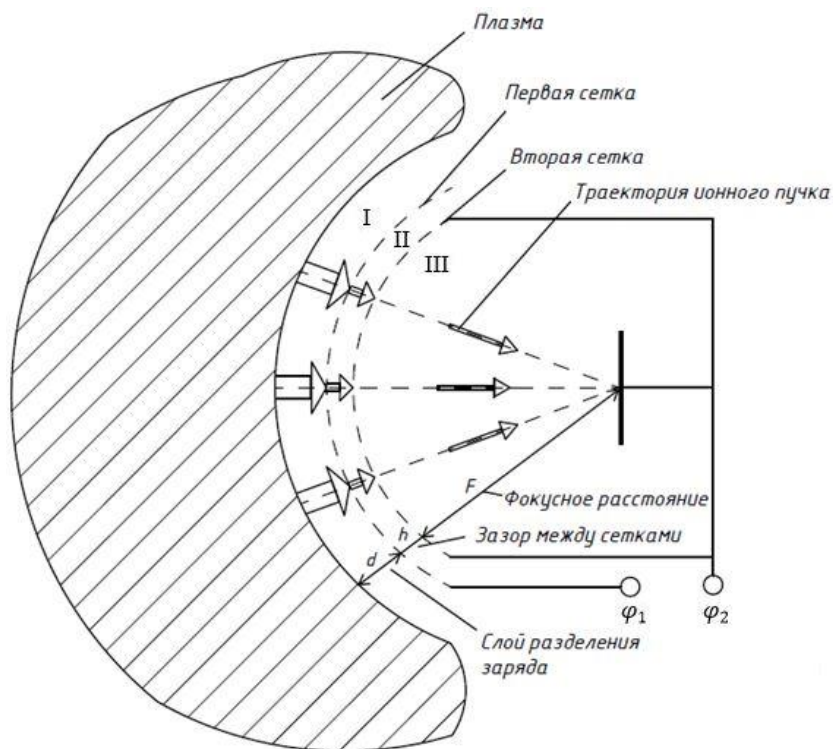


Рисунок 2.3 – Схема системы формирования высокоинтенсивных пучков ионов газов низкой энергии с применением «accel-decel» принципа вблизи сеточного фокусирующего электрода

Система формирования в данном случае состоит из двух электрически изолированных сеточных электродов с одинаковым зазором между ними по всей их длине. При этом второй сеточный электрод присоединен к сплошному цилиндрическому электроду, обеспечивающему замкнутое эквипотенциальное пространство в области дрейфа пучка. Как и в случае односеточной системы [10], так и в данной системе, сеточные электроды выполнены в виде поверхности второго порядка, которые обеспечивают баллистическую фокусировку пучков ионов газов.

Предложенный принцип формирования пучков ионов основан на плазменно-иммерсионном извлечении ионов из плазмы и их баллистической фокусировки в эквипотенциальном пространстве дрейфа. Поэтому предварительно система формирования пучков должна быть погружена в плазму. Формирование пучка ионов азота начинается при подаче потенциала смещения на первую сетку и образования слоя разделения зарядов в области I (область экстракции ионов, рисунок 2.3). Внутри слоя под действием электрического поля ионы ускоряются, в то время как электроны покидают приэлектродное пространство. Ширина стационарного слоя разделений зарядов описывается формулой (1.2), называемой законом Чайлда Ленгмюра. После ускорения в области I, ионы попадают в зазор между сетками II (рисунок 2.4). Взаимное изменение потенциалов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  на соответствующих сеточных электродах позволяет формировать электрическое поле в зазоре между ними, позволяющее управлять энергией ионов в пучке.

Возможно три варианта включения сеточных электродов.

1)  $\varphi_1 = \varphi_2$ . В данном случае, фокусировка пучка ионов осуществляется в стандартном режиме в отсутствии электрического поля. Ионы движутся с

неизменной энергией, приобретенной в слое разделения зарядов (зона I на рисунке 2.3).

2)  $\varphi_1 < \varphi_2$ . В зазоре возникает электрическое поле, ускоряющее ионы пучка на  $ze|\varphi_2 - \varphi_1|$ , где  $z$  - зарядовое состояние ионов.

3)  $\varphi_1 > \varphi_2$ . Данный режим включения использовался в представленной работе и непосредственно реализует «accel-decel» принцип. Ионы пучка, ускоряясь в слое разделения зарядов и проникая в зазор между сетками, попадают в электрическое поле, вектор напряжённости которого направлен к первой сетке. В результате, зазор между сетками пройдут только те ионы, энергия которых больше  $ze|\varphi_2 - \varphi_1|$ . Таким образом, регулируя амплитуду потенциалов смещения на внутренней сетке, можно управлять энергией ионов.

После прохождения второй сетки, ионы попадают в эквипотенциальное пространство III (рисунок 2.3), или иначе говоря, область дрейфа, в которой пучки транспортируются до коллектора.

На рисунке 2.4 представлена трехмерная модель предложенной системы формирования высокоинтенсивных пучков ионов газов с двухсеточной фокусирующей системой, основанной на «accel-decel» принципе.

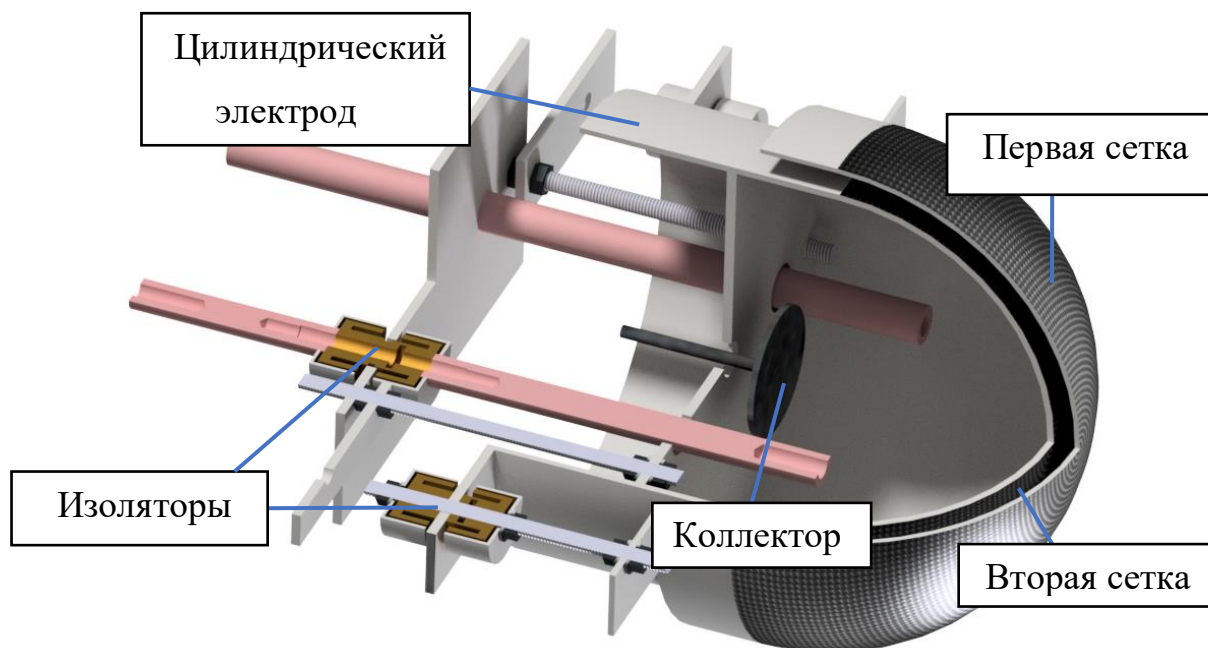


Рисунок 2.4 – Трехмерная модель системы формирования высокоинтенсивных

пучков ионов газов низкой энергии с применением «accel-decel» принципа системы вблизи сеточного фокусирующего электрода

В представленной системе использовались сеточные электроды, имеющие радиусы кривизны 7,5 (первая сетка) и 7,0 см (вторая сетка), которые обеспечивали формирование тормозящего зазора шириной примерно 5 мм. Фокусирующие сеточные электроды выполнены из сетки из нержавеющей стали с размерами ячейки сетки  $1,8 \times 1,8$  мм<sup>2</sup> и прозрачностью 65%. Система устанавливалась в рабочей камере на расстоянии 15 см от выхода плазмогенератора «PINK». Эквипотенциальное пространство для транспортировки и баллистической фокусировки пучка ограничивалось вторым сеточным и цилиндрическим сплошным электродом. Коллекторы и облучаемые мишени при исследованиях вблизи фокальной плоскости второго сеточного электрода.

Для формирования ионного пучка использовались два синхронизированных генератор высокочастотных импульсов отрицательного смещения. Схема включения генераторов представлена на рисунке 2.1. Эксперименты выполнены при фиксированной частоте потенциалов смещения 10 кГц и коэффициенте заполнения импульса 40%. Амплитудой импульсно-периодического потенциала смещения на сеточных электродах варьировали в диапазоне от 250 до 2000 В.

В экспериментах использовали два дисковых коллектора с диаметром 40 мм для измерения полного тока пучка и 12 мм для измерения плотности ионного тока пучка в его центре. Для стимулирования радиационной диффузии на коллекторе с обратной стороны от обрабатываемой поверхности поддерживалась постоянная температура, равная 500 °С. Для регистрации ионных потоков на первую и вторую сетку, а также ионный ток на коллектор использовались три калиброванных пояса Роговского.

Импульсные сигналы с поясов Роговского измерялись цифровым четырёхканальным осциллографом LeCroy Waverunner 6050A. Внешний вид передней панели осциллографа представлен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – 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 40X, которая, как правило, показывает хорошее улучшение свойств после азотирования [10].

Исходная подготовка образцов перед имплантацией заключалась в нарезке образцов диаметром 12 и 40 мм и толщиной 4 мм, на станке «Brilliant 201» (рисунок 2.6). В процессе резки применялось водяное охлаждение. В качестве материала отрезного круга использовался карбид кремния SiC.





Рисунок 2.6 – Станок Brilliant 201

После нарезки образцы были отшлифованы на шлифовально-полировальной машине «Saphir 320» при помощи наждачной бумаги с размерами зёрен абразива от 40 до 3,5 мкм (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Шлифовально-полировальная машина Saphir 320

После окончательной полировки на сукне в присутствии алмазной суспензии с минимальным размером абразивного зерна до 1 мкм среднеарифметическая шероховатость поверхности образцов  $R_a$  составляла примерно 0,2 мкм.

## 2.5 Методики исследований ионно-легированных образцов

Исследования микроструктуры и формы кратеров ионного распыления на поверхности мишеней после ионной обработки высокоинтенсивными пучками ионов азота проводились с помощью оптического бесконтактного трехмерного профилометра «STIL 3D Micromesure». Внешний вид профилометра представлен на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Профилометр STIL 3D Micromesure

Исследование распределение в стали примеси азота по глубине производилось с помощью растрового электронного микроскопа «Hitachi S-3400 N» с энергодисперсионной приставкой «Bruker XFlash 4010». Внешний вид комплекса представлен на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N

Для этого подготавливались специальные металлографические шлифы.

Ионно-модифицированные образцы разрезались поперек центра отпечатка ионного пучка электроискровой резкой. Затем эпоксидной смолой заливались в специальной оснастке. После поперечная поверхность шлифовалась и полировалась.

Выводы по главе «Описание экспериментальной установки и методики эксперимента»

В данной главе была представлена схема экспериментальной установки, рассмотрен принцип работы источника непрерывной газоразрядной плазмы «PINK». Предложена система формирования пучков ионов азота, основанная на принципе фокусировки «accel-decel», варьирование амплитудой потенциалов смещения на сетках которой, позволило регулировать энергией ионов в диапазоне 0.2-1.8 кэВ. Рассмотрена последовательность подготовки образцов. Представлены методы и оборудование для анализа поверхности образца на образование кратера (профилометр STIL 3D Micromesure) и распределения примеси азота в стали 40X (растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N).

### 3 ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМИ ПУЧКАМИ ИОНОВ АЗОТА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ

#### 3.1 Исследование закономерностей формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота с применением «accel-decel» системы

Для проведения экспериментов по модификации высокоинтенсивными пучками ионов азота в условиях регулируемой энергии ионов было необходимо выполнить исследования, подтверждающие возможность формирования пучков с энергией менее 1 кэВ с плотностями ионного тока не ниже нескольких десятков мА/см<sup>2</sup>. Как уже отмечалось в первой главе, решение проблемы высокого ионного распыления при энергиях ионов в единицы кэВ может быть связано со снижением энергии ионов в пучке после формирования ионного потока. Для управления энергией ионов использовалась двухсеточная фокусирующая система, основанная на «accel-decel» принципе, суть которого представлена на рисунках 2.3, 2.4.

В таблице 1 приведены режимы экспериментов по формированию высокоинтенсивных пучков ионов азота с применением «accel-decel» системы

Таблица 1 - Основные режимы формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота с применением «accel-decel» системы

Серия	Параметра потенциала смещения на сеточных электродах				Давление азота, Па	Диаметр коллектора, мм
	Амплитуда на первой сетке, кВ	Амплитуда на второй сетке, кВ	Частота, кГц	Коэффициент заполнения, %		
1	1.8	от 0.2 до 1.8 с шагом 0.4	10	40	0,6	40
2	1.8	от 0.2 до 1.8 с шагом 0.4			0,6	12
3	от 0.8 до 1.8 с шагом 0.4	0.8			0,6	12
4	от 0.4 до 1.8 с шагом 0.4	0.4			0,6	12
5	2	0.4			0,6; 0,3; 0,18 и 0,12	12

В первой серии экспериментов исследовались особенности формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота с помощью двухсеточной системы при постоянной амплитуде импульсно-периодического потенциала смещения на первой сетке и изменяемом потенциале смещения на второй в диапазоне амплитуд от 0.2 до 1.8 кВ с шагом 0.4 кВ. Это позволило изменять энергию ионов азота в пучке, достигающего коллектора, в диапазоне от 0.2 до 1.8 кэВ. В данной серии использовался коллектор диаметром 40 мм. Во всех экспериментах на сетки подавались синхронизованные импульсы потенциалов смещения частотой 40 кГц с коэффициентом заполнения импульса 40%.

На рисунке 3.1 приведены импульсы ионного тока на первой и второй сетках, а также на коллекторе в зависимости от амплитуды потенциала смещения на второй сетке.

Можно отметить, что на первой сетке (рисунок 3.1а) не наблюдалось какой-нибудь однозначной зависимости амплитуды импульсов тока для экспериментов в серии. Средняя амплитуда тока варьировала в пределах от 0.65 до 0.8 А. Очевидно, что при рассматриваемых условиях формирования ионного потока вблизи первой сетки, когда во всех экспериментах использовался неизменный потенциал смещения при постоянной плотности плазмы, ионный ток на элементы сеточного узла должен быть постоянный. Некоторый разброс значений импульсного среднего тока скорее всего связан с нестабильностью плотности вакуумно-дуговой плазмы из-за специфики самого дугового разряда (процессы взрывной эмиссии, перемещений катодных пятен по поверхности катода, затухание и рождение самих пятен и т.д.).

На рисунке 3.1б представлены импульсы тока на второй сетке, которые уже демонстрируют достаточно четкую закономерность. Наблюдалось достаточно равномерное уменьшение средней амплитуды ионного тока от 0.60 А до 0.33 А при уменьшении амплитуды потенциала смещения на второй сетке от 1.8 до 0.2 кВ. Причина такой закономерности может быть связана с возникновением дополнительного тока электронов за счет их эмиссии в

межэлектродное пространство. Бомбардировка высокоэнергетичными ионами второй сетки приводит к вторичной ион-электронной эмиссии с элементов конструкции электрода. При этом в исследуемом диапазоне энергий ионов (от 0.2 до 1.8 кэВ) чем больше энергия, тем эффективнее эмиссия электронов.

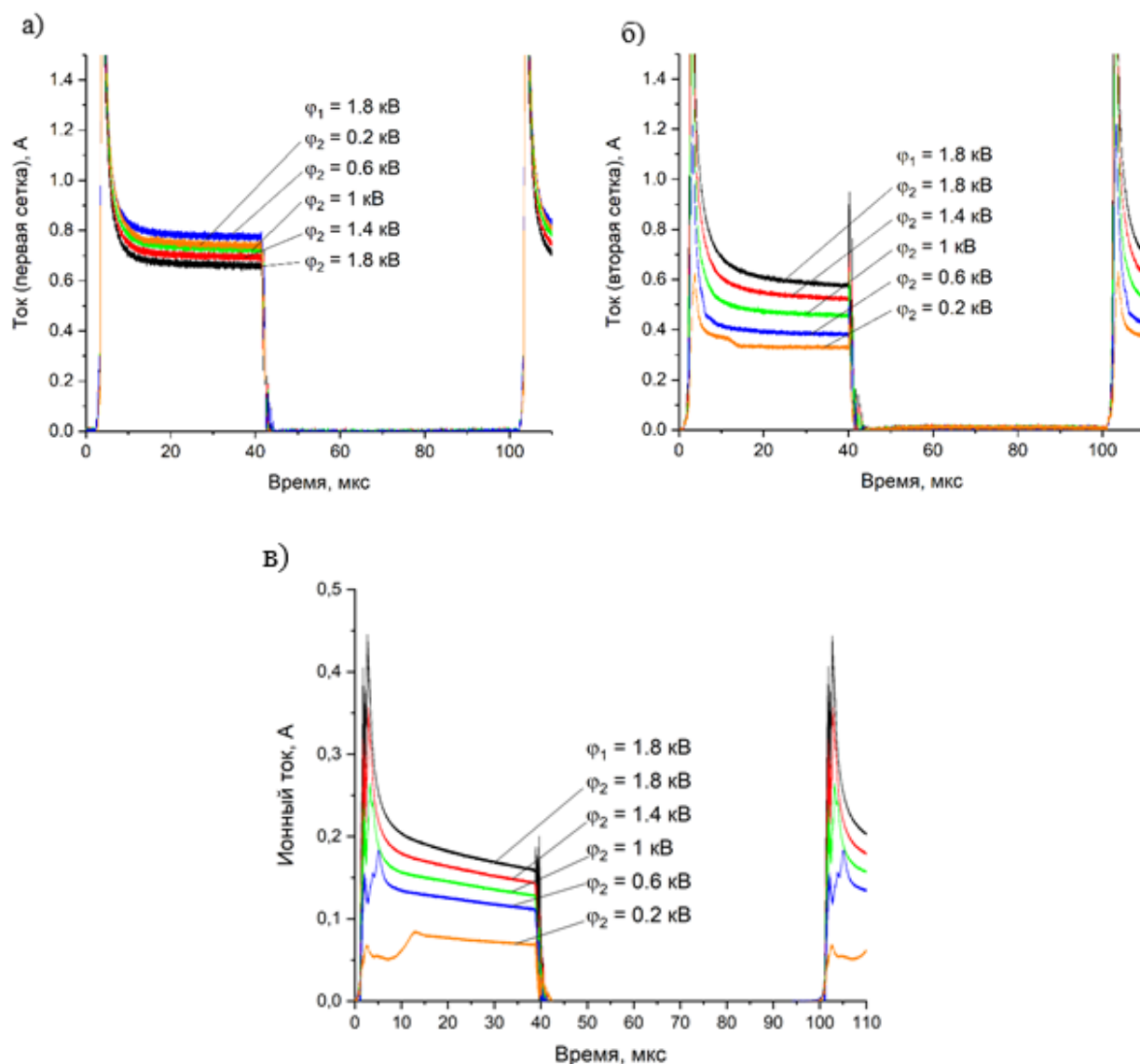


Рисунок 3.1 – Импульсы токов на первом (а), втором (б) сеточных электродах и на коллекторе (в) при постоянной амплитуде импульсно-периодического потенциала смещения на первой сетки 1.8 кВ и изменяемом потенциале смещения на второй в диапазоне амплитуд от 0.2 до 1.8 кВ, частоте следования импульсов 10 кГц и коэффициенте заполнения импульса 40% (диаметр коллектора 40 мм)

Импульсы ионного тока на коллектор, представленные на рисунке 3.1в, демонстрируют снижение амплитуды ионного тока в пучке в фокусе системы при снижении амплитуды потенциала смещения на второй сетке. Средний ионный ток в импульсе изменялся от 0.18 А до 0.075 А при снижении энергии ионов азота от 1.8 до 0.2 кэВ. Можно отметить, что при снижении амплитуды потенциалов смещения на второй сетке от 1.8 до 0.6 кВ наблюдалось достаточно равномерное уменьшение амплитуды ионного тока на коллектор, однако, в диапазоне амплитуды потенциалов смещения от 0.6 до 0.2 кВ произошло нарастание скорости снижения тока ионов в пучке в зависимости от амплитуды потенциала на второй сетке. На всех импульсах тока наблюдается значительный первоначальный пик амплитуды, который связан с паразитными емкостными, индуктивными переходными процессами в электрических цепях экспериментальной установки. При дальнейшем формировании импульса ионного тока на коллектор наблюдается некоторое снижение амплитуды, которое объясняется процессами нейтрализации объемного заряда пучка при его транспортировке в пространстве дрейфа, рассмотренными в работе [18].

Рассмотрим отдельно два режима формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота: при наличии тормозящего электрического поля в зазоре между сеточными электродами ( $\varphi_1 = -1.8$  кВ и  $\varphi_2 = -0.6$  кВ) и при его отсутствии ( $\varphi_1 = \varphi_2 = -1.8$  кВ). В этих случаях после фокусировки ионы пучка имели энергии 0.6 и 1.8 кэВ, соответственно. На рисунке 3.2 представлены импульсы токов на сеточных электродах и коллекторе для выбранных режимов формирования ионных пучков.



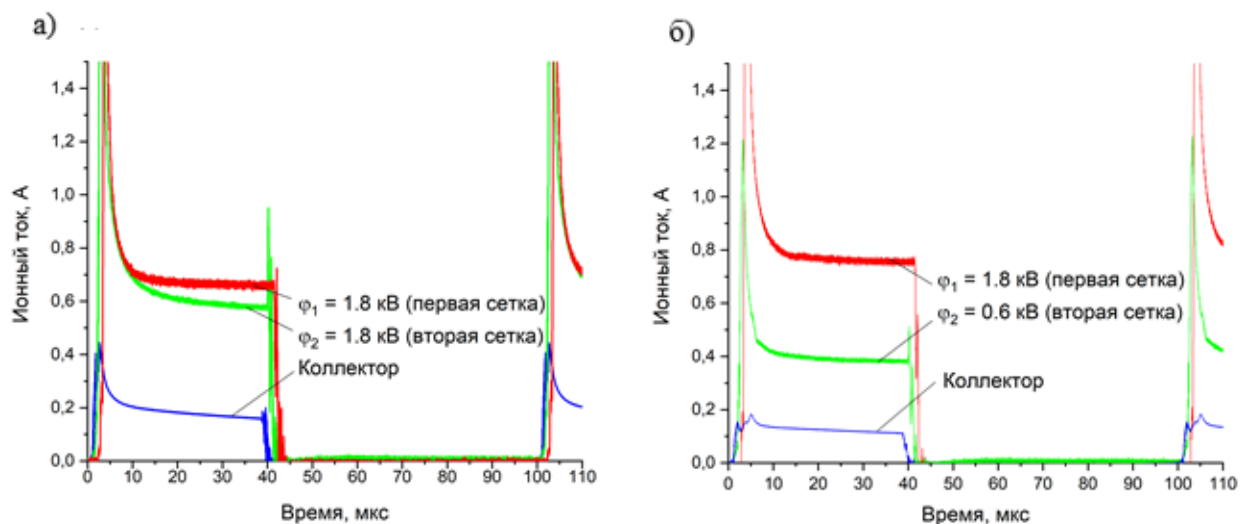


Рисунок 3.2 – Импульсы токов на сеточных электродах и коллекторе при различных режимах формирования пучка ионов азота

а) –  $\varphi_1 = -1.8$  кВ,  $\varphi_2 = -0.6$  кВ; б) –  $\varphi_1 = \varphi_2 = -1.8$  кВ

Можно отметить (рисунок 3.2а), что в условиях равных амплитуд потенциалов смещения 1.8 кВ на первой и второй сетках наблюдается небольшое различие в значении амплитуд средних токов на сетки, равных 0.68 и 0.60 А на первой и второй, соответственно. Ионный ток на коллекторе составил 0.18 А. Однако, при уменьшении энергии ионов до 0.6 кэВ за счёт тормозящего поля, наблюдалось уменьшение ионного тока на второй сетке примерно в 1.5 раза, и незначительное увеличение на первой сетке. Ионный ток на коллекторе при этом уменьшился до 0.13 А.

Вторая серия экспериментов была выполнена в тех же условиях что и первая, но с коллектором диаметром 12 мм. Применение коллектора небольшого размера использовалось для оценки плотности ионного тока в центре пучка. На рисунке 3.3 представлены импульсы ионного тока пучка на коллектор. Можно отметить, что и для малого коллектора, и для коллектора диаметром 40 мм (рисунок 3.1в) наблюдалась схожая закономерность изменения амплитуды ионного тока при уменьшении энергии ионов в зазоре между сетками. Максимальный средний ионный ток в данной серии 0.16 А был получен при отсутствии тормозящего электрического поля в зазоре между сеточными

электродами. Можно отметить, что полученный ток на коллектор диаметром 12 мм практически совпадает с ионным током на коллектор диаметром 40 мм (0.18 А на рисунке 3.1в), что демонстрирует хорошую фокусировку и указывает на примерный размер ионного пучка в данном режиме его формирования (диаметр меньше 1,2 см). Однако при формировании тормозящего поля в зазоре между сеточными электродами наблюдается снижение амплитуды импульса ионного тока на коллектор. Увеличение напряжения тормозящего поля ведет к более существенному падению тока. Минимальный средний ионный ток в данной серии 0.03 А наблюдался при амплитуде потенциала смещения на второй сетке 0.2 кВ.

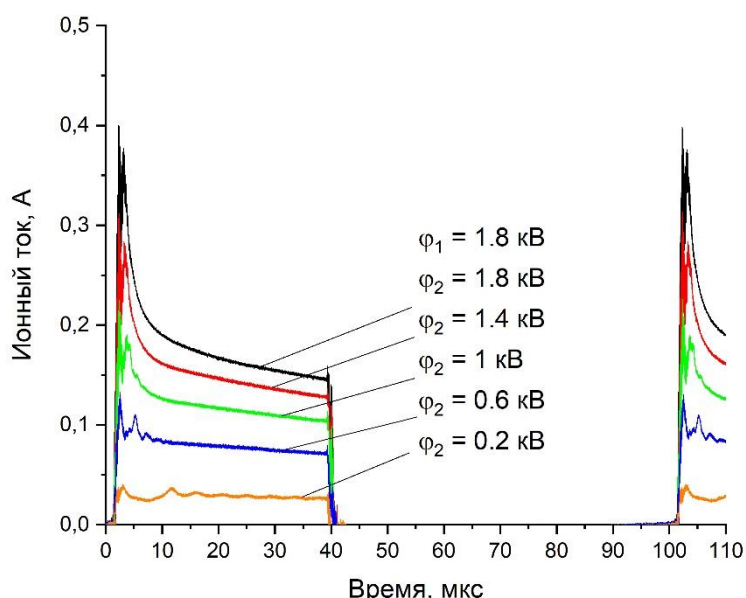


Рисунок 3.3 – Ионный ток на коллекторе при постоянной амплитуде импульсно-периодического потенциала смещения на первой сетки 1.8 кВ и изменяемом потенциале смещения на второй в диапазоне амплитуд от 0.2 до 1.8 кВ, частоте следования импульсов 10 кГц и коэффициенте заполнения импульса 40% (диаметр коллектора 40 мм)

В третьей и четвертой серии экспериментов исследовались особенности формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота при фиксированных амплитудах импульсно-периодических потенциалов смещения на втором

сеточном электроде 0.4 и 0.8 кВ в условиях варьирования амплитуды потенциалов смещения на первом сеточном электроде в диапазоне от 0.4 до 1.8 кВ в третьей серии и от 0.8 до 1.8 кВ в четвертой серии. На рисунке 3.4 представлены импульсы ионного тока, полученные на коллектор 12 мм. Отличительным результатом, можно отметить, отсутствие изменения формы и амплитуды ионного тока на коллектор при варьировании амплитудой потенциала смещения на первой сетке при неизменном потенциале на второй. Снижение амплитуды потенциала на второй сетке в два раза от 0.8 до 0.4 кВ приводит к примерно пропорциональному уменьшению среднего ионного тока в импульсе от 0.1 до 0.055 А.

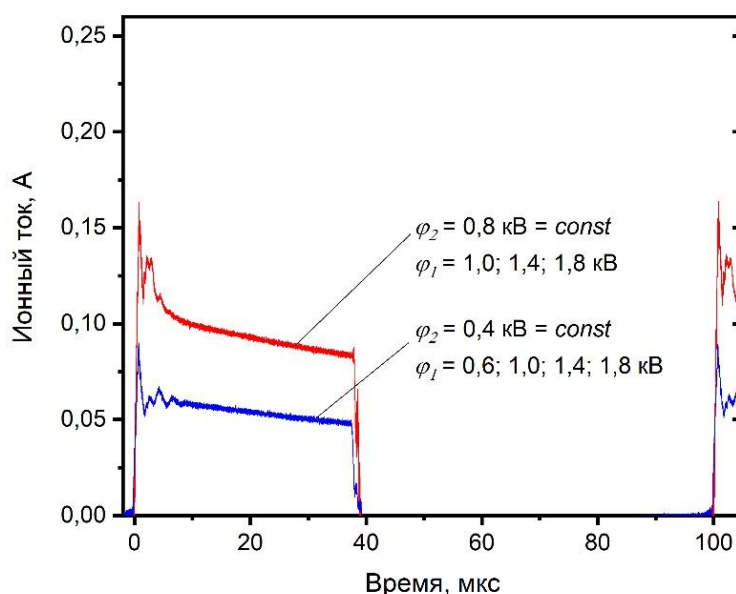


Рисунок 3.4 – Ионного тока на коллектор Исследование проводилось при частоте повторения импульсов 10 кГц, коэффициенте заполнения импульса 40%, токе разряда 55 А и остаточном давлении в камере 0.6 Па, диаметр коллектора 12 мм

На основании экспериментальных данных, полученных во второй, третьей и четвёртой сериях экспериментов, были получены плотности ионного тока в центре пучка в зависимости от различных вариантов включения потенциалов смещения на сеточных электродах системы формирования

высокоинтенсивных пучков. На рисунке 3.5 представлены максимальные плотности ионного тока пучка в зависимости от амплитуд потенциалов смещения на первом и втором сеточном электроде. Было отмечено, что при уменьшении энергии ионов от 1.8 кэВ до 0.2 кэВ, плотность ионного тока снижается от 165 до 30 мА/см<sup>2</sup>. При формировании пучков ионов азота с энергией 0.8 и 0.4 кэВ были достигнуты плотности ионного тока 95 и 58 мА/см<sup>2</sup>.

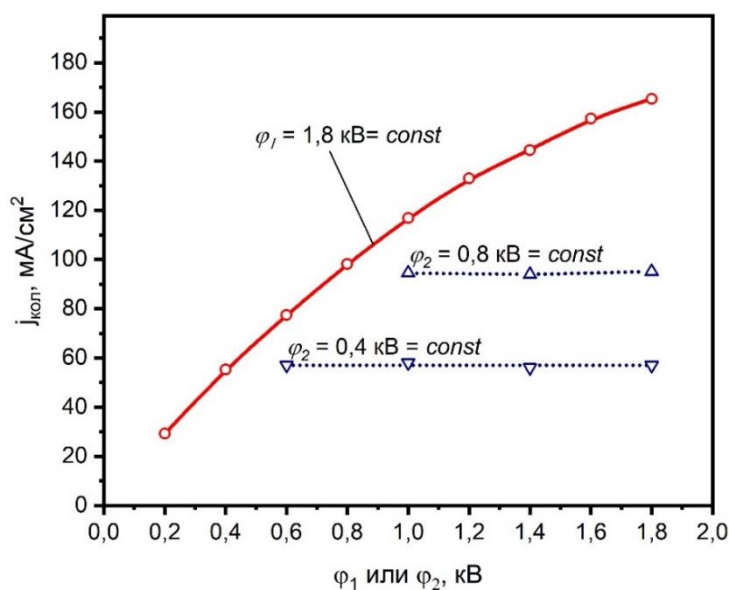


Рисунок 3.5 – Плотность ионного тока пучка в зависимости от амплитуд потенциалов смещения на первом и втором сеточном электроде

Пятая серия экспериментов была направлена на исследование формирования пучка ионов азота при импульсно периодических потенциалах смещения постоянной амплитуды на первой 2 кВ и второй 0.4 кВ сетках соответственно в зависимости от давления рабочего газа. На рисунке 3.6 представлены осциллограммы ионного тока в зависимости от времени. Диапазон давления рабочего газа был выбран исходя из возможностей работы источника плазмы и составил 0.12–0.6 Па. Результаты показали максимальную амплитуду ионного тока при давлении 0.6 Па и равную 0.06 А и минимальную при давлении 0.12 Па и равную 0.48 А соответственно. Можно также отметить, что

уменьшение амплитуды ионного тока максимально при уменьшении давления от 0.18 до 0.12 Па и составляет  $\Delta = 0.006$  А.

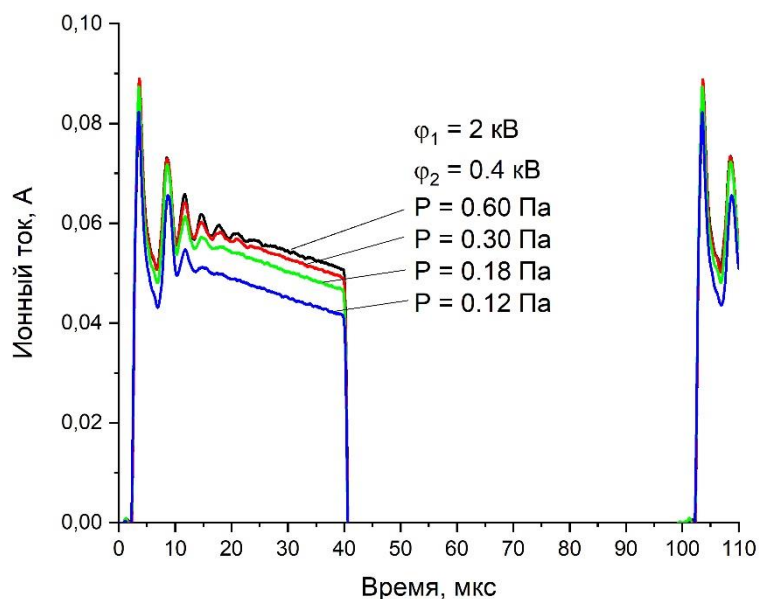


Рисунок 3.6 – Плотность ионного тока на коллекторе диаметров 12 мм в зависимости от давления рабочего газа. Исследование проводилось при частоте повторения импульсов 10 кГц, коэффициенте заполнения импульса 40% и токе разряда 55 А, диаметр коллектора 12 мм.

### 3.2 Имплантации ионов азота в сталь 40Х

Вторым этапом работ стало проведения исследования взаимодействия пучков ионов азота с энергиями 1.5, 0.8 и 0.4 кэВ с поверхностью твёрдого тела. В качестве мишени выступали образцы из стали 40Х. Материал мишени был выбран в связи с хорошими показателями стали после азотирования. Данная сталь также является распространённым конструкционным материалом.

На рисунке 3.7 представлены профили поверхности образца при бомбардировки ионами с энергией 1.5 кэВ (а), 0.8 кэВ (б) и 0.4 кэВ (в), полученные на профилометре «STIL 3D Micromesure», рисунок 2.8. На рисунке (а) представлен кратер, образованный ионным распылением с максимальной

глубиной 120 мкм. При уменьшении энергии ионов, наблюдалось существенное уменьшение распыления поверхности образца до глубины 55 мкм (б) и полное видимое отсутствие кратера в случае (в).

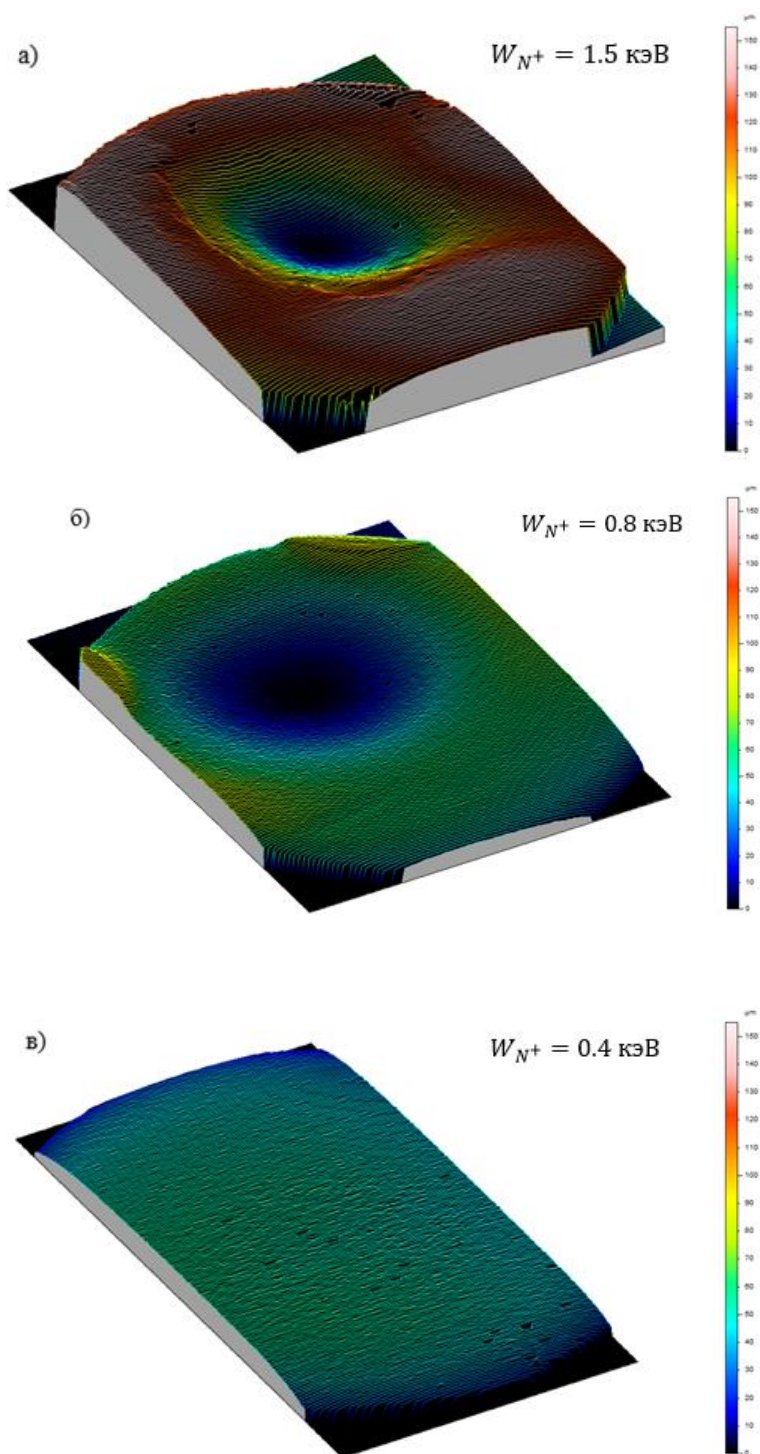


Рисунок 3.7 – Кратеры ионного распыления на поверхности образца после воздействия аксиальносимметричными пучками ионов азота при энергии ионов 1.5 кэВ (а), 0.95 кэВ (б), 0.4 кэВ (в).

Таким образом, была продемонстрирована возможность снижения ионного распыления при использовании фокусирующей системы типа «accel-decel».

На рисунке 3.8 представлены концентрационные профили распределения примеси азота, полученные методом энергодисперсионного микроанализа после модификации высокоинтенсивными пучками ионов азота с энергией ионов 1.5 кэВ, 0.8 кэВ и 0.4 кэВ. Было показано, что при энергии ионов 1.5 кэВ максимальная концентрация ионов азота в образце составляла 12 ат.%. При уменьшении энергии ионов до 0.8 кэВ, максимальная концентрация увеличилась с 12 до 16 ат.%. Дальнейшее уменьшение энергии ионов до 0.4 кэВ привело к концентрации примеси ионов азота на поверхности 16 ат.% и 17-18 ат.% на глубине порядка 20 мкм.

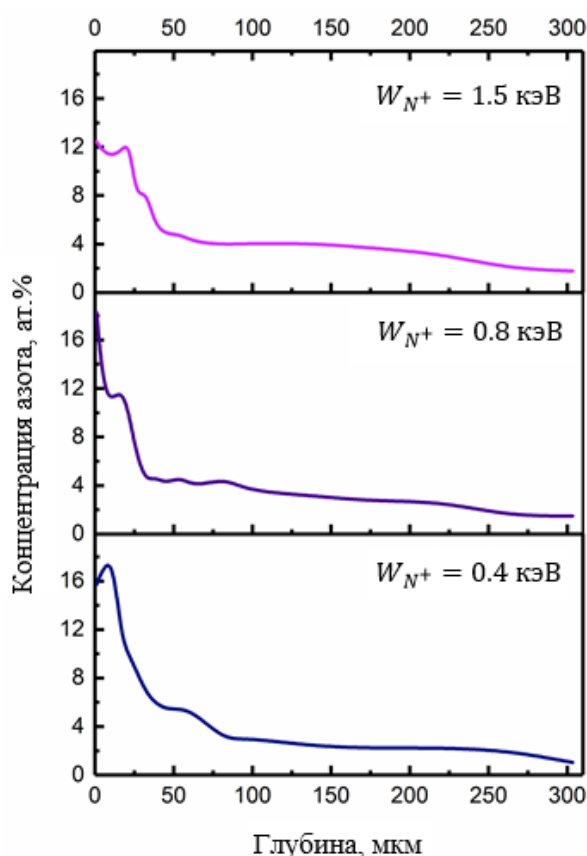


Рисунок 3.8 – Концентрационные профили примеси ионов азота по глубине в зависимости от энергии ионов

Выводы по главе «Ионная имплантация высокоинтенсивными пучками ионов азота низкой энергии»

В данной главе представлены результаты исследований по формированию пучков ионов азота с плотностью ионного тока в десятки мА/см<sup>2</sup> при энергиях ионов в диапазоне 0.2-1.8 кэВ. Были установлены закономерности формирования пучков ионов азота при постоянной амплитуде импульсов потенциалов смещения на первой или второй сетках в зависимости от амплитуды потенциалов смещения на второй (первой) сетках. Также было проведено исследование зависимости амплитуды ионного тока от давления рабочего газа, результат которого показал наибольшую амплитуду тока при давлении 0.6 Па.

Исследования взаимодействия пучков ионов азота с поверхностью образца показали уменьшение глубины кратера распыления от 120 мкм до отсутствия видимого образования кратера при уменьшении энергии ионов от 1.5 кэВ до 0.4 кэВ. Концентрационные профили показали увеличение максимальной концентрации примеси азота с 12 ат.% при энергии ионов 1.5 кэВ до 16-17 ат.% при энергии ионов 0.4 кэВ. Также была продемонстрирована возможность глубинного легирования примеси с глубиной вплоть до 300 мкм.



## 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-исследовательской работы, направленной на модификацию стали 40Х. Сталь 40Х является одним из распространённых конструкционных материалов, однако, недостаток в механических свойствах материала делает применение его ограниченным. В связи с этим, были определены ресурсная, финансовая и экономическая эффективность.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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

### 4.1 Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы

Научно-исследовательская работа посвящена модификации поверхности стали 40Х пучком ионов азота. 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.

## 4.2 Анализ конкурентных технических решений

В отличие от других методов, таких как лазерная обработка или за счёт сильнооточных электронных пучков и других, модификация материала в ионной имплантации происходит за счёт изменения элементного и фазового состава в поверхностном слое.

Метод ионной имплантации в связи с вышеописанными особенностями нашёл широкое применение в различных промышленных сферах. Так, при помощи легирования ионов титана Ti в подложку из алюминия, образуется интерметаллидный слой Al-Ti, который повышает коррозионную стойкость и трибологические свойства, а также повышает прочностные свойства. Другой отличительной областью применения ионной имплантации хотелось бы выделить модификация циркониевых сплавов Zr-1Nb, используемых в качестве основного конструкционного материала для оболочек ядерного топлива реакторов. Модификация, в данном случае, заключается в значительном снижении гидrogenизации посредством имплантации ионов титана за счёт захвата водорода ионно-модифицированным слоем. С другой стороны, имплантация ионов хрома в циркониевый сплав Zr-1Nb повышает стойкость 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 4.1.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (исследований)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>Ф</sub>	Б <sub>К1</sub>	К <sub>КФ</sub>	К <sub>К1</sub>
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
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
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>					
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

Продолжение таблицы 4.1

Критерий оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>Ф</sub>	Б <sub>К1</sub>	К <sub>КФ</sub>	К <sub>К1</sub>
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

Таким образом, конкурентоспособность разработки составила 4,015, в то время как у другого аналога 3.195, что свидетельствует о конкурентоспособности научно-технической разработки по таким показателям как: удобство в эксплуатации, механические характеристики, энергоэкономичность, надёжность, скорость получения модифицированного слоя, необходимость выполнения контроля за процессом модификации оператором, срок эксплуатации и срок выхода на рынок. Конкурентоспособность обусловлена, более высокими механическими показателями обрабатываемого материала.

### 4.3 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 4.2, и результирующую таблицу с выявлением возможностей и угроз НИР, таблица 4.3.

Таблица 4.2 – Интерактивная матрица проекта

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

Таблица 4.3 – SWOT анализ

	<b>Сильные стороны:</b>	<b>Слабые стороны:</b>
	<p>C1 – Широкий спектр предоставляемых возможностей (реализация нескольких типов релейной защиты, автоматики и функций);</p> <p>C2 – Длительный срок эксплуатации;</p> <p>C3 – Высокая эффективность работы защит (увеличенное быстродействие и чувствительность);</p> <p>C4 – Высокая точность обработки данных;</p> <p>C5 – Малые габариты оборудования;</p> <p>C6 – Малые объемы технического обслуживания оборудования;</p> <p>C7 – Удобство и простота настройки и эксплуатации;</p> <p>C8 – Возможность подключения устройства в общую информационную сеть.</p>	<p>Сл1 – Высокая стоимость микропроцессорных устройств РЗА;</p> <p>Сл2 – Низкая ремонтпригодность;</p> <p>Сл3 – Необходимость квалифицированных специалистов для обслуживания оборудования;</p> <p>Сл4 – Усложнение схем и алгоритмов работы защит;</p> <p>Сл5 – Постепенное устаревание программного обеспечения и необходимость своевременного обновления.</p>

Продолжение таблицы 4.3

<b>Возможности:</b>	<b>Сильные стороны и</b>	<b>Слабые стороны и</b>
<p><b>В1</b> – Государственная поддержка проектов по модернизации объектов промышленности;</p> <p><b>В2</b> – Использование оборудования отечественного производителя;</p> <p><b>В3</b> – Создание унифицированных проектов переоснащения оборудования РЗ типовых схем;</p> <p><b>В4</b> – Снижение стоимости микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) за счет удешевления технологии производства;</p> <p><b>В5</b> – Актуализация внедрения микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики.</p>	<p><b>Сильные стороны и возможности:</b></p> <p>1) Привлечение государственных и частных средств на модернизацию объектов энергетики;</p> <p>2) Использование высокотехнологичных, эффективных и быстродействующих устройств РЗ с большим сроком эксплуатации;</p> <p>3) Применение технологий цифровой подстанции для создания системы по типу SCADA.</p>	<p><b>Слабые стороны и возможности:</b></p> <p>1) Высокая стоимость проектов затрудняет повсеместное внедрение микропроцессорных устройств, ситуацию может улучшить государственное субсидирование проектов по перевооружению оборудования.</p> <p>2) Применение оборудования отечественных производителей, а также государственное субсидирование позволит снизить стоимость на микропроцессорные устройства релейной защиты (МУРЗ),</p> <p>3) Унификация и стандартизация проектов позволит упростить процесс проектирования, повысится совместимость и взаимозаменяемость оборудования.</p>
<b>Угрозы:</b>	<b>Сильные стороны и угрозы:</b>	<b>Слабые стороны и угрозы:</b>
<p><b>У1</b> – Рост стоимости импортных комплектующих;</p> <p><b>У2</b> – Появление новых конкурентных технических решений;</p> <p><b>У3</b> – Низкий спрос на рынке, обусловленный экономической ситуацией;</p> <p><b>У4</b> – Инертность рынка на переоснащение оборудования работающем на базе новых технологий.</p>	<p>1) Повышение стоимости импортного оборудования способствует повышению спроса на отечественное оборудование;</p> <p>2) Появление конкурентных технических решений в конечном итоге будет способствовать снижению стоимости и повышению качественных показателей;</p> <p>3) Снижение интенсивности спроса помимо убытка, будет способствовать развитию экономических стратегий по разработке технических решений в будущем.</p>	<p>1) Рост стоимости импортных компонентов может значительно повлиять на стоимость микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ), что может негативно сказаться на спросе в будущем;</p> <p>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.

#### 4.4 Организация и планирование работ

В данном разделе показано 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 [31].

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;
- изготовление 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 4.4.

Таблица 4.4 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Вес	Исполнители	Трудовой вклад
Разработка задания	0.1	Научный руководитель (НР)	НР – 100%
Теоретическое исследование	0.3	Научный руководитель (НР) Инженер (ИН)	НР – 50% ИН – 50%
Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	0.05	Научный руководитель (НР) Сотрудник-техник (СТ) Инженер (ИН)	НР – 45% СТ – 45% ИН – 10%
Построение 3Д моделей и создание схемы эксперимента	0.1	Инженер (ИН)	ИН – 100%
Изготовление исследуемых образцов	0.05	Инженер (ИН)	ИН – 100%
Экспериментальные исследования	0.2	Научный руководитель (НР) Сотрудник-техник (СТ) Инженер (ИН)	НР – 33% СТ – 34% ИН – 33%
Оценка результатов экспериментов	0.05	Научный руководитель (НР) Инженер (ИН)	НР – 50% ИН – 50%
Оформление отчёта по ВКР	0.1	Научный руководитель (НР) Инженер (ИН)	НР – 5% ИН – 95%
Подготовка к защите ВКР	0.05	Научный руководитель (НР) Инженер (ИН)	НР – 10% ИН – 90%
<b>Итого вклад</b>	1	Научный руководитель (НР) – 37.35% Сотрудник-техник (СТ) – 9.05% Инженер (ИН) – 53.6%	

Представленные цифры показывают вклад каждого участника. Наибольший вклад в работу был со стороны инженера.



#### 4.5 Продолжительность этапов работ

Для определения трудоёмкости реализации научного исследования выпускной квалификационной работы используется экспертный способ, основным показателем которого является человеко-день [32]. 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..

Произведём оценку трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя:

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

Произведём оценку трудоёмкости выполнения научного исследования для сотрудника – техника:

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

Произведём оценку трудоёмкости выполнения научного исследования для инженера:

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

После расчётов ожидаемой трудоёмкости работ, 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,  $K_d = 1$ .

Произведём расчёт продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя:

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

Произведём расчёт продолжительности работы выполнения научного исследования для сотрудника-техника:

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

Произведём расчёт продолжительности работы выполнения научного исследования для инженера:

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

Построим ленточный график проведения научных работ в форме диаграммы Ганта. Для построения диаграммы необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением:

$$T_{кд} = T_{рд} \cdot T_K, \quad (4.3)$$

где  $T_{кд}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;  $T_K$  – коэффициент календарности, определяющийся выражением 4.

$$T_K = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (4.4)$$

где  $T_{кал}$  – количество календарных дней в году;  $T_{вд}$  – количество выходных дней в году;  $T_{пд}$  – количество праздничных дней.

Рассчитаем коэффициент календарности по формуле 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 4.5.

Таблица 4.5 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работ	Трудоёмкость работ									Длит. работ в раб. дни $T_{рд}$			Длит. работ в кален. дни $T_{кд}$		
	$t_{min}$ , 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. отчёта 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
Итог							39.6	11.6	64.2	39.6	11.6	64.2	56.5	17.1	94.9

На основании таблицы 4.5, 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 4.6.

Таблица 4.6 – Календарный план-график (график Гантта) проведения ВКР

№ работ	Вид работ	Исполнитель	Т <sub>кд</sub> , чел.-дн	Продолжительность работ												
				Февр.			Март			Апр.			Май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Разработка задания	НР	2.1	■												
2	Теоретическое исследование	НР	26.6	■	■	■										
		ИН	26.6	■	■	■										
3	Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	НР	3.8				■									
		СТ	3.8				■									
		ИН	2.1				■									
4	Изготовление исследуемых образцов	ИН	2.1				■									
5	Эксперимент. исследования	НР	13.3				■	■	■							
		СТ	13.3				■	■	■							
		ИН	13.3				■	■	■							
6	Оценка результатов экспериментов	НР	8.6							■	■					
		ИН	8.6							■	■					



Таблица 4.7 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Сталь 40Х	м	1	7100	7100
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				16 368

По результатам таблицы 4.7 видно, что наибольшие расходы приходятся на сырьё и рабочий газ. Для выполнения ВКР использовались 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, затраты на которые не осуществлялись, так как уже были в наличии при лаборатории.

#### 4.6.2 Расчёт заработной платы

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

Среднедневная тарифная заработная плата рассчитывается по следующей формуле

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

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

В таблице 4.8 представлены расчёты заработной платы

Таблица 4.8 – 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 4.8 видно, что наибольшая заработная плата у научного руководителя.

#### 4.6.3 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 2020 год составляет 30.2%.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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

Расчет отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{\text{внеб.}} = 69915 \cdot 0.302 \approx 20114 \text{ руб.}$$

#### 4.6.4 Расчёт затрат на электроэнергию

Потребляемая мощность анализатора составляет 7 кВт/час. Длительность еженедельной работы на анализаторе составляет 2 часа. Стоимость электроэнергии в Томске составляет 5.748 рубля за 1 кВт/час. Следовательно, стоимость электропотребления за 5 месяцев составляет:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об.}} \cdot Ц_{\text{э}} \cdot t_{\text{об.}}, \quad (4.6)$$

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

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Время работы оборудования	Потребляемая мощность $P_{\text{об.}}$ , кВт	Затраты $C_{\text{эл.об.}}$ , руб.
Персональный компьютер	884.8 · 0.6	3	915.45
Комплексная технологическая установка	40	7	1609.44
Итого	-	-	2524.89

#### 4.6.5 Расчёт амортизационных расходов



Средства на приобретение плазменных источников не затрачивались, так как плазменные источники «Радуга» уже были приобретены кафедрой. Необходимо рассчитать амортизационные отчисления на данный вид оборудования.

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

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

где  $N_a$  – 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:

$$C_{AM} = \frac{C_{об} \cdot N_a \cdot t_{рф}}{F_d} = \frac{7\,000\,000 \cdot 0.1 \cdot 40}{200} = 140\,000 \text{ руб}, \quad (4.8)$$

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

Первоначальная стоимость персонального компьютера составляет 45 000 рублей. Из этого следует, что годовая сумма амортизации составит:

$$C_{AM} = \frac{C_{об} \cdot N_a \cdot t_{рф}}{F_d} = \frac{45\,000 \cdot 0.4 \cdot 884.8}{200} = 6680.5 \text{ руб}$$

#### 4.7 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:

$$I_{\text{ФИНр}}^{\text{ИСП}i} = \frac{\Phi_{\text{P}i}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.9)$$

где  $\Phi_{\text{P}i}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

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

$$I_{\text{P}i} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.10)$$

В таблице 4.10 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. Под исполнением 1 представлена методика качественного анализа материалов, заложенная в программе как базовая.

Таблица 4.10 – 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
Надёжность	0.2	4	4
Материалоёмкость	0.2	5	4
Интегральный показатель ресурсо-эффективности		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:

$$I_{\text{исп}} = \frac{I_{\text{Рi}}}{I_{\text{ИСПi}} \cdot I_{\text{ФИНр}}} \quad (4.11)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{д.п.}}}{I_{\text{исп}}}. \quad (4.12)$$

В таблице 4.11 представлена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 4.11 – Сравнительная эффективность

№	Показатели	Данный проект	Исполнитель 1
1	Интегральный финансовый показатель	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4.45	4.25
3	Интегральный показатель эффективности	4.45	4.25
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.05	0.95

Как видно из таблицы 4.11, разработанная методика более эффективна, чем стандартная.

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. В ходе проведения данного анализа было выявлена конкурентоспособность азотированной стали в связи с лучшими механическими характеристиками.

2. Проведён SWOT-анализ проекта, в ходе которого были выявлены потенциальные внутренние и внешние сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Из анализа выяснили, что потенциальных сильных сторон у проекта

больше, чем слабостей, что свидетельствует об перспективности разработок проекта.

3. Также установлено, что в календарных днях длительность работ для научного руководителя составило 56.5 дней, для сотрудника инженера 17.1, а для инженера 94.9 дней. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – это расчет уставок защит.

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

4. Величина отчислений во внебюджетные фонды составила 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. В работе были проведены исследования по распылению мишени и получены профили концентрации примеси в зависимости от глубины легирования. 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 [33]. 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 [33], 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 [34, 35]. 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 [33].

Пособия по временной нетрудоспособности, размеры пособий по временной нетрудоспособности и условия их выплаты устанавливаются [33, 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 [34].

## 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)	Тип фактора		Нормативные документы
	Вредный	Опасный	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	-	Требования к допустимым параметрам микроклимата регулируются СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [36].
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 [37] и СН 2.2.4/2.1.8.566-96.
3. Превышение уровня вибрации	+	-	Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий [38].
4. Опасность электрического тока	-	+	Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2017 [39]

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 переохладения снижается температура тела, происходит сужение кровеносных сосудов, возникают сбои в работе сердечно-сосудистой системы [40].

Санитарными нормами, установленными для производственных помещений [36] 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 таковым относятся работы, которые выполняются сидя и не требуют высокого физического напряжения.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые климатические параметры, согласно [36]

Период года	Температура, °С		Относительная влажность воздуха, %		Скорость движения воздуха, м/с	
	Опти м.	Допус т.	Опти м.	Допус т.	Опти м.	Допус т.
Холодный	22-24	18-26	40-60	75	0.1	не более 0.1
Тёплый	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 35дБ 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 неврозов. Воздействие шума уровнем свыше 80дБ может привести к потере слуха – профессиональной

глухоте. При действии уровней свыше 140дБ возможен разрыв барабанных перепонки, контузия, а при уровне более 160дБ наступает летальный исход.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, утверждённых [37].

Для определения допустимого уровня шума на рабочих местах используется ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шум. Общие требования безопасности.» [41]. Нормирование шума производится по комплексу показателей с учетом их гигиенической значимости на основании ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ [42]. 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 [37].

Таблица 5.3 – Допустимые уровни звукового давления на рабочем месте, согласно [46]

Вид деятельности	Частота, Гц							
	Уровень звукового давления, дБ							
Научная деятельность,	62	125	250	500	1000	2000	4000	8000
проектирование	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», [43]. В таблице 5.4 приведены предельно допустимые значения производственной локальной вибрации.

Таблица 5.4 – Предельно допустимые значения производственной локальной вибрации, согласно [43]

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	виброускорение		виброскорости	
	м/с <sup>2</sup>	дБ	м/с·10 <sup>-2</sup>	дБ
8	1.4	123	2.8	115
16	1.4	123	1.4	109
31.5	2.8	129	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 [44].

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 в воздействия тока, с	Предельно допустимые значения, не более		Продолжительность в воздействия 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 1.0	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 условиях 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 [46].

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 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

В разделе ВКР социальная ответственность 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 безопасности 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе на основании литературного обзора была выявлена проблема, препятствующая модификации материалов, связанная с распылением поверхности. Была показана зависимость ионного распыления от энергии падающих ионов. На основании этого была поставлена цель формирования высокоинтенсивных пучков ионов азота регулируемой энергии с плотностями тока десятки  $\text{mA}/\text{cm}^2$  и применения полученных пучков для ионной имплантации азота в сталь марки 40X с уменьшением ионного распыления.

Для регулирования энергией ионов была предложена система формирования сфокусированных пучков, основанная на «accel-decel» принципе, при варьировании амплитудами потенциалов смещения на сеточных электродах, которое позволило регулировать энергию ионов в диапазоне от 1.8 до 0.2 кэВ.

Были установлены закономерности формирования пучков ионов азота при постоянной амплитуде импульсов потенциалов смещения на первой или второй сетках в зависимости от амплитуды потенциалов смещения на второй (первой) сетках. Было показано, что снижении энергии ионов от 1.8 до 0,8 и 0.4 кэВ после ускорения в слое разделения зарядов максимальная плотность ионного тока в пучке в области фокуса системы формирования достигает значения 98 и 58  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , соответственно.

При исследовании взаимодействия пучков ионов азота с поверхностью образца из стали 40X было продемонстрировано практически полное отсутствие кратера ионного распыления на поверхности при снижении энергии ионов в пучке до 0,4 кэВ. Концентрационные профили показали увеличение максимальной концентрации примеси азота с 12 ат.% при энергии ионов 1.5 кэВ до 17 ат.% при энергии ионов 0.4 кэВ. Также была продемонстрирована возможность глубинного легирования примеси с глубиной вплоть до 300 мкм.

Проведенный комплекс исследований показал перспективность предложенной системы формирования высокоинтенсивных пучков ионов с регулируемой энергией при помощи двухсеточной системы, реализующей

«accel-decel» принцип, для применения в технологиях модификации свойств приповерхностных слоев различных материалов методом высокоинтенсивной имплантации ионов низкой энергии.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пранявичюс, Л. Модификация свойств твердых тел ионными пучками / Л. Пранявичюс, Ю. Дудонис. – Вильнюс: Мокслас, 1980. – 342 с.
2. Гусева, М.И. Ионная имплантация в металлах / М.И. Гусева // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1982. – № 4. – С. 27–50.
3. Риссел, Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге ;пер. с нем.; под ред. М.И. Гусевой. – М.: Наука, 1983. – 326 с.
4. Хирвонен, Дж. Ионная имплантация / Дж. Хирвонен. – М.: Металлургия, 1985. – 392 с.
5. Комаров, Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы / Ф.Ф. Комаров. – М.: Металлургия, 1990. – 216 с.
6. Броудай, И. Физические основы микротехнологии / И. Броудай, Дж. Мерей. – М.: Мир, 1985. – 496 с.
7. 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.
8. Gavrilo, N.V. Effect of the electron beam and ion flux parameters on the rate of plasma nitriding of an austenitic stainless steel / N.V. Gavrilo, A.I. Men'shakov // A.I. Tech. Phys. – 2012. – Vol. 57. – P. 399–404.
9. Анищик, В.М. Модификация инструментальных материалов ионными и плазменными пучками / В.М. Анищик, В.В. Углов. – Минск.: БГУ, 2003. – 191 с.
10. А.И. Рябчиков, Д.О. Сивин, П.С. Ананьин, А.И. Иванова, В.В. Углов, О.С. Корнева. Модификация стали 40Х при высокоинтенсивной имплантации ионов азота // Физика. – Т. 61, №2. – С. 60–66.
11. High-intensity low energy titanium ion implantation into zirconium alloy  
Ryabchikov, A.I., Kashkarov, E.B. Email Author, Pushilina, N.S., Syrtanov, M.S., Shevelev, A.E., Korneva, O.S., Sutygina, A.N., Lider, A.M. Applied Surface Science 2018 439, с. 106-112

12. A.I. Ryabchikov, P.S. Ananin, S.V. Dektyarev, D.O. Sivin, A.E. Shevelev, High intensity metal ion beam generation, *Vacuum*. 143 (2017) 447–453.
13. A.I. Ryabchikov. Physical mechanisms of macroparticles number density decreasing on a substrate immersed in vacuum arc plasma at negative high-frequency short-pulsed biasing / D.O. Sivin, A.I. Bumagina // *Applied Surface Science*. – 2014. – 305. – c.487-491
14. 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. – c. 1-7.
15. Baranov V.Yu. *Isotopes: properties, preparation, applications*. Izdat, Moscow, 2000.
16. O. B. Firsov, *ZhTEF*, 21, 1001 (1951).
17. A.I. Ryabchikov. Generation of high-intensity aluminum-ion beams/ D.O. Sivin, A.E. Shevelev// *Technical Physics*. – 2018. – №10. – c. 1-9.
18. A.I. Ryabchikov. Plasma-immersion formation of high-intensity gaseous ion beams/ D.O. Sivin, (and ect.)// *Vacuum*. – 2019. – c. 1-7.
19. A.I. Ryabchikov. High-current-density gas ion ribbon beam formation/ D.O. Sivin, (and ect.)// *Vacuum*. – 2018. – c. 1-5.
20. A.A. Youssef. Tribological properties of Ti-implanted duralumin and stainless steel/ P. Budzynski, J. Filiks, B. Kamienska, D. Maczka// *Vacuum*. – 2002. – №68. – c. 131–137.
21. A.I. Ryabchikov. High-intensity chromium ion implantation into Zr-1Nb alloy/ E.B. Kashkarov, (and ect.)// *Surf. and Coat. Technol.* – 2019. – c. 1-6.
22. Y. Umakoshi. Oxidation resistance of intermetallic compounds Al<sub>3</sub>Ti and TiAl/ M. Yamaguchi, T. Sakagami, T. Yamane// *Journal. Mater. Sci.* – 1989. – №24. – c. 1599–1603.
23. A.I. Ryabchikov. High-intensity low energy titanium ion implantation into zirconium alloy/ E.B. Kashkarov, (and ect.)// *Applied Surface Science*. – 2018. – №439. – c. 106-112.
24. S.J. Zinkle, G.S. Was, *Acta Mater.* 61 (2013) 735–758.

25. R.S. Daum, Y.S. Chu, A.T. Motta, J. Nucl. Mater. 392 (2009) 453–463.
26. E.B. Kashkarov, N.N. Nikitenkov, A.N. Sutygina, M.S. Syrtanov, O.V. Vilkhivskaya, et al., Surf. Coat. Technol. 308 (2016) 2–9.
27. Р. Бериш. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой. / Н.Н. Andersen (and ect.). – Издательство «Мир», Москва. – 1984. – с. 35-56.
28. Л. Фельдман, Д. Майер. Основы анализа поверхности и тонких плёнок. – Издательство «Мир», Москва. – 1986. – с. 78-86.
29. A.I. Ryabchikov. Modification of the microstructures and properties of 40X13 martensitic steel during super high-dose high-intensity nitrogen implantation/ D. O. Sivin, (and ect.)// Surf. and Coat. Technol. – 2020. – с. 1-7.
30. Денисов В.В. Генерация низкотемпературной плазмы в сильном несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом. – Томск, 2018. – 166.
31. Oechsner H., Zs. Phys., 261, 37 (1973).
32. Шульмин В.А. Экономическое обоснование в дипломных проектах: учебное пособие для вузов / В.А. Шульмин, Т.С. Усынина. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 192 с.
33. Кнышова Е.Н. Экономика организации: учебник / Е.Н. Кнышова, Е. Е. Панфилова. – Москва: Форм Инфа-М, 2012 – 334 с.: ил. – Профессиональное образование
34. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От. 01.04.2019)
35. Федеральный закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» от 24.07.1998 N 165-ФЗ (последняя редакция)
36. Федеральный закон «Об основах обязательного социального страхования» от 16.07.1999 N 165-ФЗ (последняя редакция)
37. СанПин 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений



- 38.СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки
- 39.СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий
- 40.Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2017
- 41.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.
- 42.ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. «Шуи. Общие требования безопасности.»ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная болезнь. Общие требования.
- 43.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.
- 44.СН 2.2.4/2.1.8.566. «Санитарные нормы. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий»
- 45.ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
- 46.ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
- 47.СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений.