

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 03.04.02 «Физика»
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Высокоинтенсивная имплантация ионов низкой энергии в условиях компенсации ионного распыления облучаемой поверхности

УДК 532.2:539.1:621.793.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ01	Вахрушев Димитрий 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	Рыжакина Т.Г.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой – руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	д.т.н., профессор		

Томск – 2022 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла.
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У) -4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-3	Способностью к активной социальной мобильности, организации научно-исследовательских и инновационных работ;
ОПК(У)-4	Способностью адаптироваться к изменению научного профиля своей профессиональной деятельности, социокультурных и социальных условий деятельности;
ОПК(У)-5	Способностью использовать свободное владение профессионально-профилированными знаниями в области компьютерных технологий для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами направленности (профиля) подготовки;
ОПК(У)-6	Способностью использовать знания современных проблем и новейших достижений физики в научно-исследовательской работе;
ОПК(У)-7	Способностью демонстрировать знания в области философских вопросов естествознания, истории и методологии физики.

Профессиональные компетенции	
ПК(У)-2	Способностью свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.
ПК(У) -3	Способностью принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности.
ПК(У)-6	Способностью методически грамотно строить планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать теоретические и практические разделы учебных дисциплин в соответствии с утвержденными учебно-методическими пособиями при реализации программ бакалавриата в области физики.
ПК(У)-7	Способностью руководить научно-исследовательской деятельностью в области физики обучающихся по программам бакалавриата.
ДПК(У)-1	Способностью планировать и проводить фундаментальные исследования в проектах в области ядерно-физических исследований, взаимодействия излучения с веществом, а также модернизация современных и создание методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел и критически оценивать полученные результаты.
ДПК(У)-2	Способностью обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.

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) 03.04.02 «Физика»
 Отделение школы (НОЦ) Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ01	Вахрушеву Димитрию Олеговичу

Тема работы:

Высокоинтенсивная ионная имплантация ионов низкой энергии в условиях компенсации ионного распыления облучаемой поверхности

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

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 является влияние высокоинтенсивной имплантации пучков ионов азота и алюминия с энергией 1.4 кэВ в случае компенсации ионного распыления за счёт осаждения распылённого материала при специально разработанном держателе для образцов.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	— обзор литературных источников; — подготовка и шлифовка образцов нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и титана марки ВТ1-0; — подготовка и разработка отдельных узлов экспериментального стенда с системой формирования высокоинтенсивных пучков ионов и специально-разработанным держателем образцов для обеспечения компенсации ионного распыления; — проведение комплекса исследований воздействия высокоинтенсивных пучков ионов азота на сталь марки 12Х18Н10Т и пучков ионов алюминия на титан марки ВТ1-0 в условии самокомпенсации ионного распыления и без неё; — анализ экспериментальных результатов ионной имплантации пучков ионов азота в сталь марки 12Х18Н10Т и пучков ионов алюминия в титан марки ВТ1-0.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Рыжакина Татьяна Гавриловна
Социальная ответственность	Федорчук Юрий Митрофанович
Иностранный язык	Лахотюк Любовь Андреевна

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

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ ВО ВНУТРЕННИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРОТЯЖЁННЫХ ОТВЕРСТИЙ

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ01	Вахрушев Димитрий Олегович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ01	Вахрушев Дмитрий Олегович

Школа	ИШПР	Отделение	Отделение Экспериментальной Физики
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика конденсированного состояния

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
Влияние ионной имплантации на модификацию свойств материалов и компенсацию ионного распыления	Работа с научной литературой, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив разработки проекта с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта
2. Планирование и формирование бюджета разработки	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение бюджета научного исследования
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности разработки	Проведение оценки экономической эффективности, ресурсоэффективности и сравнительной эффективности различных вариантов исполнения
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. График проведения и бюджет проекта 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности разработки	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	31.01.2021
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рыжакина Татьяна Гавриловна	Кандидат экономических наук		31.01.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ01	Вахрушев Дмитрий Олегович		31.01.2021

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ01	Вахрушев Димитрий Олегович

ШКОЛА	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение экспериментальной физики
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	03.04.02 Физика конденсированного состояния

Тема дипломной работы: «Высокоинтенсивная ионная имплантация ионов низкой энергии в условиях компенсации ионного распыления облучаемой поверхности»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Комплекс оборудования для создания вакуума, генерации плазмы и импульсов потенциалов смещения. Работы проводились на базе НЛВИИ ИШФВП ТПУ.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов • Природа воздействия • Действие на организм человека • Нормы воздействия и нормативные документы (для вредных факторов) • СИЗ коллективные и индивидуальные 1.2. Анализ выявленных опасных факторов : • Термические источники опасности • Электробезопасность • Пожаробезопасности	1. Вредные факторы: 1.1 Недостаточная освещенность; 1.2 Нарушения микроклимата, допустимые параметры; 1.3 Шум, вибрация, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 1.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 2. Опасные факторы: 2.1 Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R _{заземления} , СКЗ, СИЗ; Проведен расчет освещения рабочего места; представлен рисунок размещения светильников на потолке с размерами в системе СИ; 2.2 Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации.
2. Экологическая безопасность: • Выбросы в окружающую среду • Решения по обеспечению экологической безопасности	Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, вторцвет- и чермет, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника, обрезки монтажных проводов,) и способы их утилизации;

3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: • перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; • разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; • разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.	Рассмотрены 2 ситуации ЧС: 1) природная – сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте); 2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии, промышленного шпионажа), представлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства в том и другом случае.
4. Перечень нормативно-технической документации.	– ГОСТы, СанПиНы, СНиПы

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	26.02.2022 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		18.04.2022 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ01	Вахрушев Димитрий Олегович		18.04.2022 г.

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

Школа – Инженерная школа ядерных технологий

Уровень образования Магистратура

Направление подготовки – Физика конденсированного состояния

Отделение школы (НОЦ) – Отделение экспериментальной физики

Период выполнения _____

Форма представления работы:

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

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	Аналитический обзор литературы	15
	Подготовка и разработка отдельных узлов экспериментального стенда и специально-разработанным держателем образцов для обеспечения компенсации ионного распыления	15
	проведение комплекса исследований воздействия высокоинтенсивных пучков ионов азота на сталь марки 12X18H10T и пучков ионов алюминия на титан марки BT1-0 в условии самокомпенсации ионного распыления и без неё	20
	Анализ экспериментальных результатов	15
	Социальная ответственность	15
	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
	Заключение	5

Составил преподаватель:

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

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой – руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	д.т.н., профессор		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертационная работа 155 страниц, 51 рисунок, 28 таблиц, 81 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: высокоинтенсивные пучки ионов азота, высокоинтенсивные пучки ионов алюминия, высокоинтенсивная ионная имплантация, ионное распыление, компенсация ионного распыления.

Объектом исследования является влияние высокоинтенсивной имплантации пучков ионов азота и алюминия с энергией 1.4 кэВ в случае компенсации ионного распыления за счёт осаждения распылённого материала при специально разработанном держателе для образцов.

Целью данной работы является выявление особенностей высокоинтенсивной имплантации ионов низкой энергии в случае компенсации ионного распыления поверхности мишени за счёт осаждения распыленного материала при облучении внутренней поверхности отверстий из нержавеющей стали марки 12X18H10T и титан марки BT1-0 пучками ионов азота и алюминия, соответственно.

В данной работе впервые показана возможность имплантации ионов азота и алюминия с помощью сфокусированных высокоинтенсивных пучков ионов низкой энергии в условиях компенсации ионного распыления облучаемой поверхности за счёт осаждения распылённого материала в случае обработки внутренней поверхности протяжённых отверстий.

Область применения: результаты исследований могут быть применены для модификации внутренних поверхностей протяжённых отверстий промышленных компонентов, таких как трубы, поршневые кольца и другие.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в разработке и создании покрытия, позволяющего повышать время эксплуатации конструкционных материалов промышленных компонентов, таких как трубы, поршневые кольца и другие.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	13
ГЛАВА 1. ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ	17
1.1 Общие принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов газов и металлов	17
1.2 Высокоинтенсивная имплантация ионов газов	28
1.3 Высокоинтенсивная имплантация ионов металлов	30
1.4 Ионное распыление поверхности твёрдого тела	33
1.5 Ионная имплантация для модификации труб и отверстий	41
1.6 Выводы по первой главе	44
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	45
2.1 Экспериментальная установка	45
2.2 Источники плазмы азота и алюминия	48
2.3 Система формирования высокоинтенсивных ионных пучков	51
2.4 Методика высокоинтенсивной ионной имплантации газов и металлов во внутренние поверхности протяжённых отверстий	55
2.5 Методики исследований ионно-легированных образцов	60
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ ВО ВНУТРЕННИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРОТЯЖЁННЫХ ОТВЕРСТИЙ	62
3.1 Особенности воздействия высокоинтенсивных пучков ионов в условиях самокомпенсации ионного распыления и при её отсутствии	62
3.2 Модификация внутренних поверхностей протяжённых отверстий из стали 12Х18Н10Т пучком ионов азота	67

3.3 Модификация внутренних поверхностей протяжённых отверстий из титана пучком ионов алюминия	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
ГЛАВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ. РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	80
4.1 Предпроектный анализ	81
4.2 Инициация проекта	88
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом	90
4.4 Бюджет научного исследования	93
4.5. Операционные затраты	99
4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности	101
Выводы по главе «Финансовый менеджмент. Ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	109
ГЛАВА 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	110
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	110
5.2 Производственная безопасность	113
5.3 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований	114
5.3.1 Анализ вредных факторов	114
5.3.2 Анализ опасных факторов	122
5.4 Пожарная опасность	123
5.5 Экологическая безопасность	125
5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	126
Выводы по главе «Социальная ответственность»	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	129
Приложение А	137

ВВЕДЕНИЕ

Разрушение поверхностных слоёв материалов является основным фактором ограничения использования материалов в экстремальных условиях. Одним из наиболее значимых методов по модификации поверхности материалов является метод ионной имплантации. Ионная имплантация представляет собой метод по внедрении ионизованных атомов или молекул в поверхность твёрдого тела. В качестве ионизованных частиц могут выступать как ионы металлов, так и газов включая инертные газы. Значимость данного метода заключена в возможности модификации широкого круга материалов, таких как: металлы, полупроводники и даже диэлектрики [1-5]. Методу ионной имплантации характерна возможность контролируемой модификации материалов за счёт времени облучения, энергии ионов и других параметров. Важной особенностью метода является модификация за счёт изменения элементного и фазового состава обрабатываемого материала, а также отсутствие адгезии модифицированного слоя [1, 4, 5]. Данный ряд достоинств выделяет метод ионной имплантации от других, таких как лазерная обработка, облучение сильноточными электронными пучками или нанесение тонкоплёночных покрытий.

Главная проблема метода ионной имплантации связана с ограниченной глубиной ионно-модифицированного слоя, зачастую не превышающей несколько долей микрометров. Слои такой толщины получаются при обычной (лучевой) ионной имплантации, которой характерны формирование пучков ионов с энергией ионов в диапазоне 10-100 кэВ, плотности ионного тока 1-100 мкА/см² [1, 3, 6].

Для решения основной проблемы ионной имплантации, связанной с малой толщиной модифицированного слоя для полупроводниковых материалов, разрабатывались методы имплантации ионов с повышением энергии ионов до порядков единиц-сотен мегаэлектронвольт [5]. Однако такие методы не подходили для модификации металлов с экономической

точки зрения. Более того, Р. Вэй, в работе [7] продемонстрировал, что основным фактором, влияющим на глубину залегания примеси, является высокая плотность ионного тока, а не энергия ионов. Так, при энергии ионов азота всего 1 кэВ, удалось добиться формирования ионно-модифицированного слоя толщиной до 10 мкм [7] и 18-20 мкм [8] при плотностях тока порядка 1-5 мА/см².

В связи с этим, для обработки металлов разрабатывались методы, основанные на радиационно-стимулированной диффузии имплантируемой примеси в твёрдом теле. Такие методы получили название «сильноточной» [7-9] и «высокоинтенсивной» имплантации ионов [10, 11, 12]. Для стимулирования диффузии, обрабатываемый материал нагревается до температур, ускоряющих диффузионное перемешивание атомов внедрённой примеси. Такой подход позволял увеличить глубину легирования примеси на порядок. Однако, увеличение глубины легирования примеси в условиях значительного нагрева всего изделия сопровождается ростом зёрнистой структуры и ухудшением эксплуатационных свойств.

Развитие ионной имплантации произошло с появлением систем формирования пучков на основе плазменно-иммерсионной экстракции ионов, с их последующей баллистической фокусировкой. Такие системы обеспечили возможность увеличения плотности тока ионов до нескольких десятков и сотен мА/см² [10]. Очень высокие плотности ионного тока способствуют реализации сверхвысокодозовой имплантации и формирования глубоких ионно-легированных слоёв за короткие времена. Такой метод, показал возможность многократного улучшения эксплуатационных свойств различных материалов.

В тоже время, комплекс выполненных исследований при использовании описанных систем выявил ряд ключевых научных проблем, связанных с ионным распылением поверхности при экстремально высокодозовой имплантации [12, 13]. Значительная эрозия поверхности способствует уменьшению толщины ионно-легированного слоя за счёт

ионного распыления поверхности, что снижает энергетическую эффективность метода и существенно уменьшает глубину диффузии внедряемой примеси. В ряде случаев, толщина слоя распыления может достигать и даже превышать ширину ионно-модифицированного слоя.

Ранее, в рамках бакалаврской работы, были проведены исследования по минимизации ионного распыления за счёт уменьшения энергии ионов азота при высокоинтенсивной ионной имплантации в сталь 40Х. Полученные результаты показали существенное уменьшение ионного распыления вплоть до полного исчезновения образования видимого кратера в диапазоне разрешимости профилометра STIL 3D Micromeasure при энергиях ионов 0.4 кэВ. Однако, уменьшение энергии ионов приводило к значительному уменьшению амплитуды плотности ионного тока на поверхности образца, что резко снижало температуру имплантации. Снижение температуры имплантации негативно влияло на радиационно-стимулированную диффузию примеси и не позволяло нагревать образец до необходимых температур.

Целью данной работы является выявление особенностей высокоинтенсивной имплантации ионов низкой энергии в случае компенсации ионного распыления поверхности мишени за счет осаждения распыленного материала при облучении внутренней поверхности отверстий из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т и титан марки ВТ1-0 пучками ионов азота и алюминия, соответственно.

Для выполнения поставленной цели были предложены следующие задачи:

- подготовка и разработка отдельных узлов экспериментального стенда с системой формирования высокоинтенсивных пучков ионов и специально-разработанным держателем образцов для обеспечения компенсации ионного распыления;

- проведение комплекса исследований воздействия высокоинтенсивных пучков ионов азота на сталь марки 12Х18Н10Т и пучков ионов алюминия на титан марки ВТ1-0 в условиях самокомпенсации ионного распыления и без неё;
- анализ экспериментальных результатов ионной имплантации пучков ионов азота в сталь марки 12Х18Н10Т и пучков ионов алюминия в титан марки ВТ1-0.

На защиту выносится следующее положение:

Воздействие на внутреннюю поверхность отверстий высокоинтенсивных пучков ионов низкой энергии позволило реализовать метод высокоинтенсивной имплантации ионов в условиях компенсации ионного распыления облучаемой поверхности за счёт осаждения распылённого материала. Экспериментально показано, что импульсно-периодическое воздействие пучком ионов азота с энергией 1.4 кэВ, длительностью импульса 10 мкс, частотой 40 кГц на сталь марки 12Х18Н10Т в течение 60 мин в условиях компенсации ионного распыления приводит к формированию ионно-легированных слоёв толщиной до 12 мкм, а пучками ионов алюминия со средней энергией 2.2 кэВ приводит к формированию ионно-легированных слоёв до 7.5 мкм.

ГЛАВА 1. ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ

1.1 Общие принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов газов и металлов

В данной главе будут рассмотрены основные особенности генерации, как плазмы металлов, так и плазмы газов. Представлено общее состояние исследований формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов и их применение для модификации свойств металлов.

Для генерации плазмы металлов в данной работе использовался вакуумно-дуговой испаритель на основе самостоятельного вакуумно-дугового разряда. Стационарное горение дуги между катодом и анодом обеспечивалось за счёт динамического равновесия между процессами распада и возникновения катодных пятен. Для генерации плазмы газов использовался плазмогенератор на основе несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом «PINK».

Можно выделить следующие достоинства формирования плазмы из вакуумно-дугового разряда: наличие высокой направленной скорости движения плазменного потока, высокая плотность ионного тока, а также присутствие в плазме многозарядных ионов.

К недостаткам можно отнести наличие в плазменных потоках не только заряженных частиц, но также и не ионизованных массивных частиц катодного материала, называемых макрочастицами. Наличие макрочастиц в плазменном потоке формируется за счёт взрывоэмиссионных процессов [21]. Размеры, количество и агрегатное состояние макрочастиц существенно зависят от материала катода [23]. При этом, размеры макрочастиц могут быть от долей до единиц микронметров. Агрегатное состояние макрочастиц может быть, как в виде капель, так и в виде твёрдых осколков.

В работе [22] было показано, что максимальный поток макрочастиц, эмитируемых с поверхности катода, распространяется под углом 10-30° относительно оси катода. Однако, даже в направлении оси катода, наблюдается значительное количество макрочастиц. Также на процессы формирования макрочастиц влияет характер вакуумно-дугового разряда (импульсного или непрерывного), тока и длительности разряда, температуры катода и других. Наличие макрочастиц в плазменных потоках ведёт к загрязнению обрабатываемой поверхности, что значительно снижает технологические возможности метода модификации поверхности твёрдых тел [24].

На рисунке 1.1 представлена система формирования пучков ионов. Данная система основана на плазменно-иммерсионном извлечении ионов из плазмы при формировании слоя разделения зарядов, последующем ускорении ионов в слое, баллистической фокусировкой в эквипотенциальном пространстве дрейфа, предварительно заполненной плазмой и транспортировкой до коллекторного узла [13].

В представленной работе использовались как плазмогенератор металлов с алюминиевым катодом, так и плазмогенератор «PINK» при генерации плазмы азота.

Форма сеточного электрода в виде части сферы позволяла осуществлять баллистическую фокусировку пучков ионов, нормально ускоренных относительно поверхности сеточного электрода.

Ускорение ионов и их транспортировка в эквипотенциальном пространстве дрейфа осуществлялись при помощи импульсного потенциала смещения, который одновременно прикладывался к сеточному электроду, сплошному цилиндрическому электроду и коллектору.

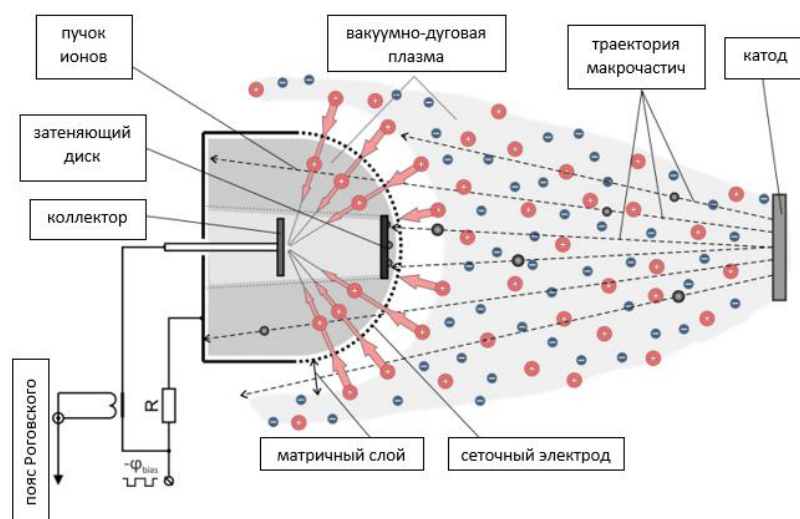


Рисунок 1.1 – Схема формирования и транспортировки пучка, [13]

Существуют системы плазменных фильтров, направленные на устранение проблемы наличия в плазменном потоке макрочастиц. Например, фильтры с криволинейным плазмоводом [25]. Фильтрация в таких фильтрах выполняется за счёт искривления траектории движения плазменных потоков за счёт приложения внешних магнитных полей. Эффективность транспортировки в таких случаях может составлять лишь несколько процентов. Альтернативный подход был предложен в работе [26]. Был показан прямоточный плазменный фильтр с магнитным островом. Такая система позволяла проводить хорошую очистку плазменного потока от макрочастиц с эффективностью до 90%. Однако, эффективность транспортировки плазменной компоненты в таких случаях не превышала 10%. Настоящим прорывом в данной проблеме стало предложенное в работе [13] решение. Для очистки ионного пучка от макрочастиц вакуумно-дугового разряда в данном случае был применён способ удаления макрочастиц из области воздействия ионного пучка на мишень, основанного на эффекте типа «солнечное затмение». На внешнем сеточном электроде системы формирования пучков по оси симметрии был установлен дополнительный дисковый экран, рисунок 1.1. Установленный экран препятствует попаданию

макрочастиц на поверхность мишени в зоне обработки ионным пучком, рисунок 1.2. При этом ток ионного пучка снижался не более чем на 10%.

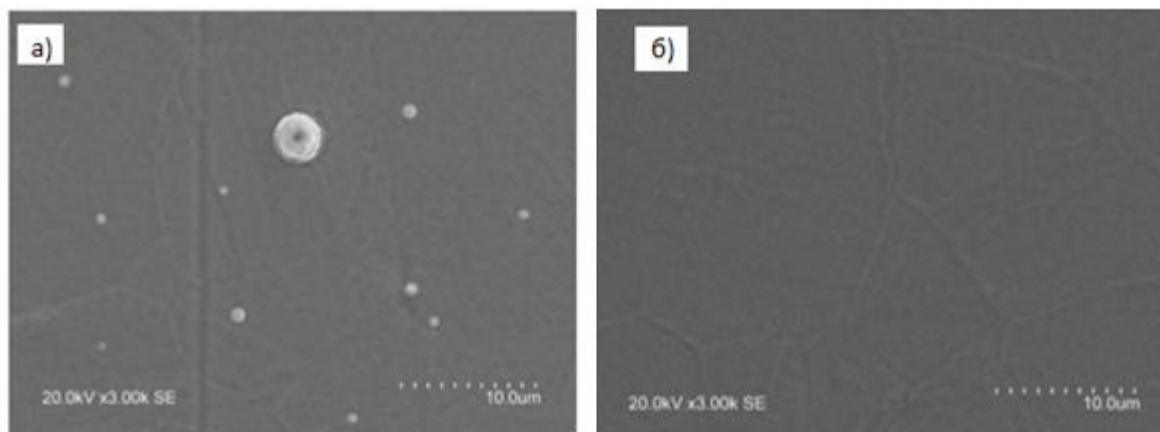


Рисунок 1.2 – Поверхность коллектора после обработки пучком ионов титана: а) без дискового электрода; б) с дисковым электродом, [13]

В работе [13] была показана возможность формирования пучков ионов титана с низкой энергией (2.6 кэВ), но высокой плотностью тока до 1 A/cm^2 с продолжительностью импульсов до 8 мкс. Однако, увеличение длительности импульсов может привести к уменьшению амплитуды ионного тока на коллекторе. Так, в работе [27] была продемонстрирована возможность развития пучковой неустойчивости при длительностях импульса до 30 мкс, рисунок 1.3.

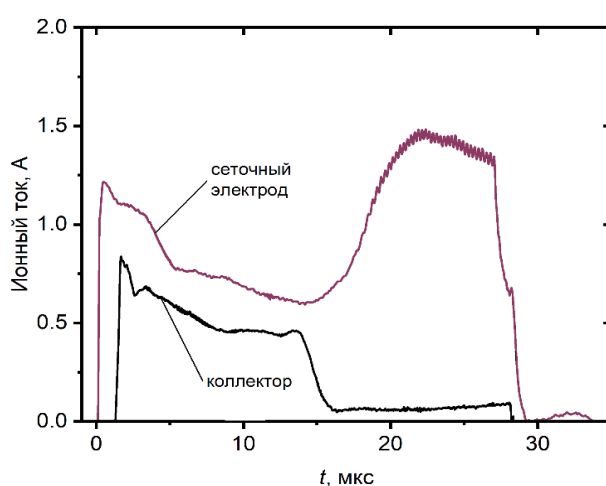


Рисунок 1.3 – Осциллограмма ионного тока на коллекторе (нижняя кривая) и сеточном электроде (верхняя кривая) в случае возникновения неустойчивости пучка ионов титана при большой длительности, [27]

Наблюдаемое ухудшение эффективности транспортировки пучка ионов происходит при невыполнении условия нейтрализации пространственного заряда в области дрейфа, что и приводит к пучковой неустойчивости. Таким образом, было установлено формирование в вакуумном зазоре виртуального анода.

Исследования показали существование вероятности развития пучковой неустойчивости при длительности импульса более 15 мкс, рисунок 1.3. Как видно из осциллограмм, на протяжении первых 15 мкс ток пучка на коллекторе стабилен, однако после увеличения длительности импульса наблюдается срыв ионного тока на коллекторе.

Увеличение вероятности срыва может быть связано с уходом из пучка, плазменных электронов. Применение импульсно-периодических режимов формирования ионных пучков из плазмы непрерывной вакуумной дуги должно обеспечивать возможность предварительной инжекции плазмы в пространство дрейфа внутри потенциального электрода с целью компенсации пространственного заряда. Однако, как было обнаружено, должно выполняться условие предварительного заполнения плазмой пространства дрейфа:

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

где v_0 – скорость направленного движения плазменного потока; R – длина вакуумного зазора; τ – длительность импульсов смещения; f – частота импульсов смещения.

Одним из методов борьбы с пучковой неустойчивостью является приложение большей амплитуды потенциалов смещения [28], рисунок 1.4. На представленных осциллограммах видно, что при увеличении амплитуды потенциалов смещения, наблюдалась постепенная стабилизация ионного тока. Так уже при амплитуде импульсов потенциалов смещения 1.6 кВ наблюдалась стабильная транспортировка пучка ионов. Однако, увеличение

амплитуды потенциалов смещения означает одновременное увеличение энергии ионов в фокусируемом пучке, что не всегда допустимо в рамках проведения исследований. Существуют различные методы модификации системы формирования пучков для решения описанной проблемы с увеличением энергии ионов. Эти методы подразумевают установку дополнительного сеточного электрода вблизи коллектора или внешнего сеточного электрода. Такая система основана на принципе «accel-decel» и впервые была применена в рамках фокусировки пучка для управления энергией ионов при высокоинтенсивной ионной имплантации в ранее бакалаврской работе [29].

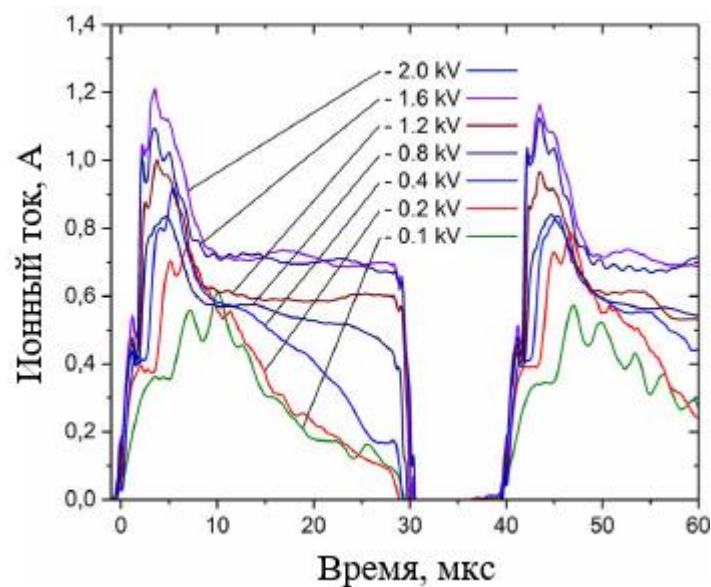


Рисунок 1.4 – Осциллограмма ионного тока на коллекторе в зависимости от амплитуды потенциалов смещения [28]

Таким образом, увеличение ускоряющего напряжения приводит к уменьшению вероятности срывов транспортировки ионного пучка, что в свою очередь влечёт за собой увеличение ширины слоя разделения заряда по закону 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 Z – среднее зарядовое состояние ионов, M – масса иона, j – плотность ионного тока насыщения плазмы, φ – ускоряющее напряжение смещения; d – толщина стационарного слоя разделения заряда, e – заряд электрона.

Ширина слоя разделения зарядов d имеет влияние на формирование пучка ионов. В случае 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 [30]. Другой важной проблемой, связанной с использованием мелкоструктурного сеточного электрода с размерами ячеек сетки порядка 100 мкм является разительное изменение пропускной способности сетки при формировании плазмы из вакуумно-дугового разряда за счёт осаждения макрочастиц на сеточный электрод [28], рисунок 1.5.

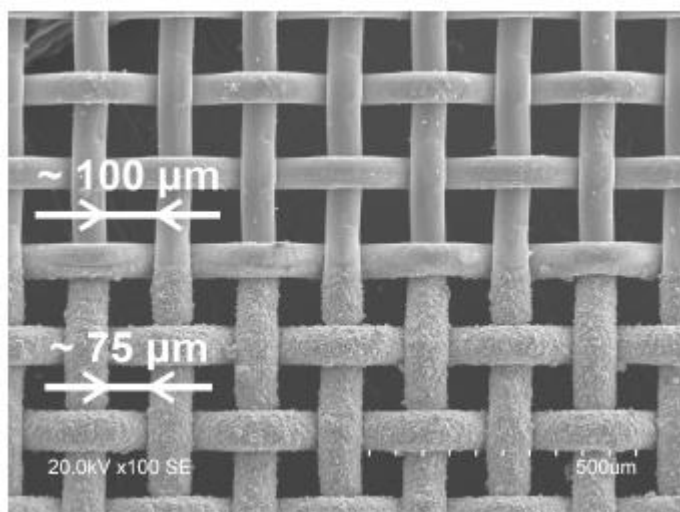


Рисунок 1.5 – Внешний вид необлученной части сетки (верхняя часть сетки) и части, использованной в экспериментах, после облучения в течении 180 минут (нижняя часть сетки), [28]

Другим методом борьбы с провисанием ионного тока является наработка пучковой плазмы в области дрейфа за счёт ионизации молекул газа. Были проведены исследования при изменении остаточного давления

воздуха в вакуумной камере в диапазоне от 10^{-3} Па до 10^{-1} Па, рисунок 1.6 [27].

При увеличении давления наблюдалась постепенная стабилизация пучка ионного тока на коллекторе с полной стабилизацией транспортировки пучка при давлении 10^{-1} Па.

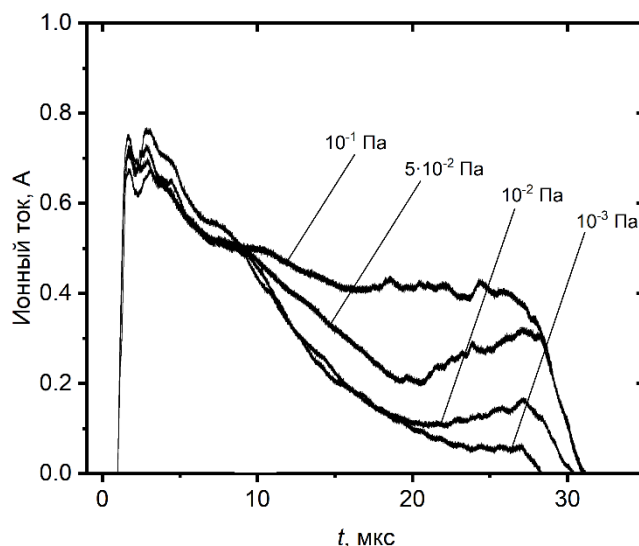


Рисунок 1.6 – Осциллограммы ионного тока на коллекторе в зависимости от давления рабочего газа в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-1} Па при разности потенциалов смещения 2 кВ, [27]

Соответственно факт стабилизации ионного тока на коллекторе объясняется уменьшением времени наработки до 100 мкс при давлении рабочего газа 10^{-2} Па и 10 мкс при 10^{-1} Па.

Вместо наработки плазмы из рабочего газа, можно использовать дополнительный эмиттер электронов. Так, в работах [28, 31] использовалась вольфрамовая нить, установленная в области дрейфа пучка внутри системы формирования пучка. На рисунке 1.7 продемонстрированы осциллограммы ионного тока на коллекторе диаметром 1.15 см в зависимости от амплитуды потенциалов смещения. На представленном рисунке видно, что даже при амплитуде потенциалов смещения на сеточный электрод 0.2 кВ наблюдается стабильное формирование ионного тока на протяжении всего импульса.

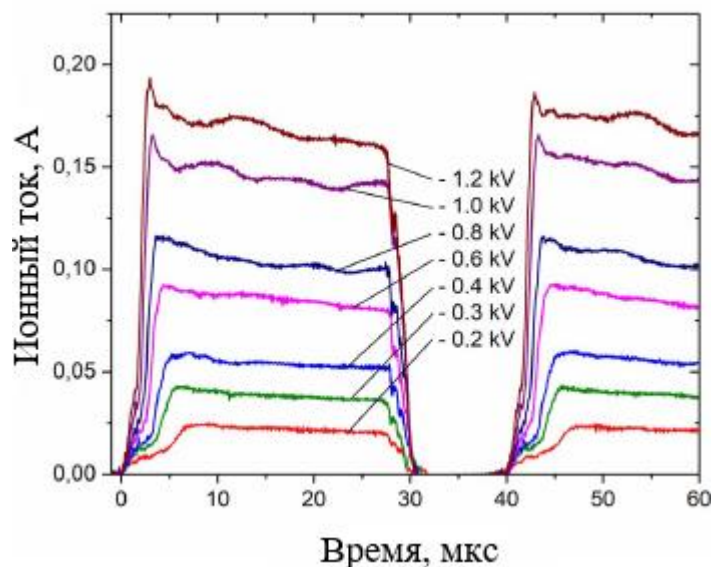


Рисунок 1.7 – Осциллограммы ионного тока в зависимости от амплитуды потенциалов смещения при добавлении термоэлектронного эмиттера [28]

В работе [33] было показано, что максимальная фокусировка пучка ионов кремния находится не в геометрическом фокусе системы формирования пучка, а смещена на несколько сантиметров. Позже это подтвердилось в работе [32], рисунок 1.8.

Как видно из рисунка, максимум плотности ионного тока соответствует расстоянию между вершиной сеточного электрода и коллектором 85 мм. При этом геометрический фокус пучка составлял 75 мм.

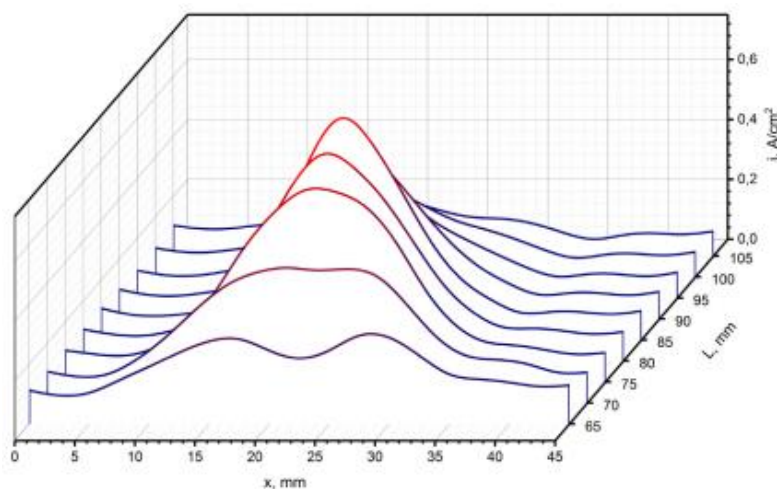


Рисунок 1.8 – Профиль плотности ионного тока пучка ионов кремния с радиусом сеточного электрода 75 мм [32]

Такое смещение максимальной фокусировки пучка относительно геометрического фокуса вызвано внутренним взаимодействием положительно заряженных ионов в области пространства дрейфа, приводящих к уширению пучка.

В случае применения газоразрядной плазмы можно рассмотреть некоторые особенности формирования высокоинтенсивных пучков ионов низкой энергии. В работе [34] была показана возможность формирования пучков ионов с различной длительностью импульса вплоть до 80 мкс при частотах следования импульса потенциала смещения 10, 20 и 30 кГц, рисунок 1.9, а также стабильного формирования аксиально-симметричных пучков ионов газов с плотностью тока до сотен мА/см^2 , рисунок 1.10.

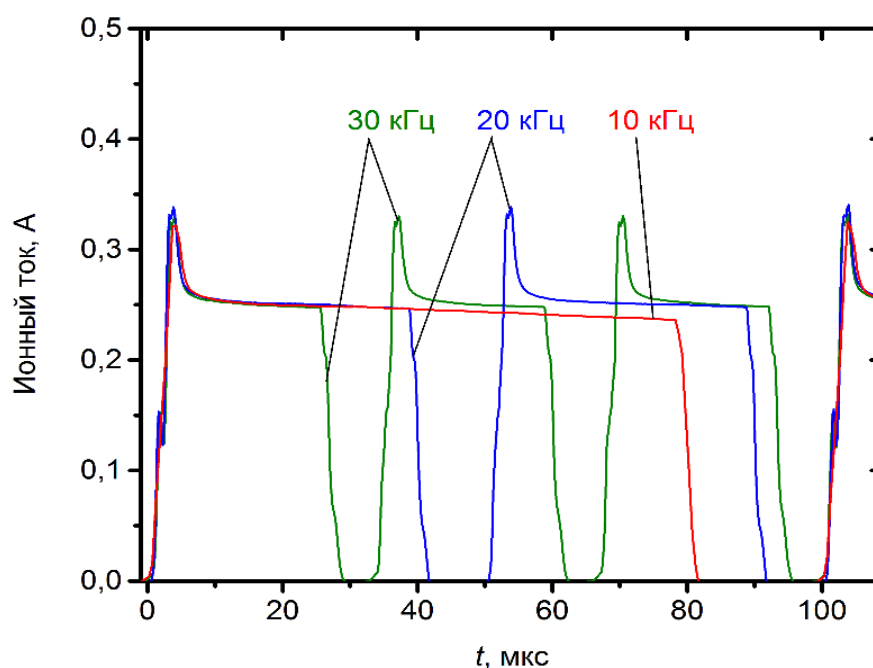


Рисунок 1.9 – Осциллограммы тока пучка ионов азота при частотах следования импульса потенциала смещения 10, 20 и 30 кГц, [34]

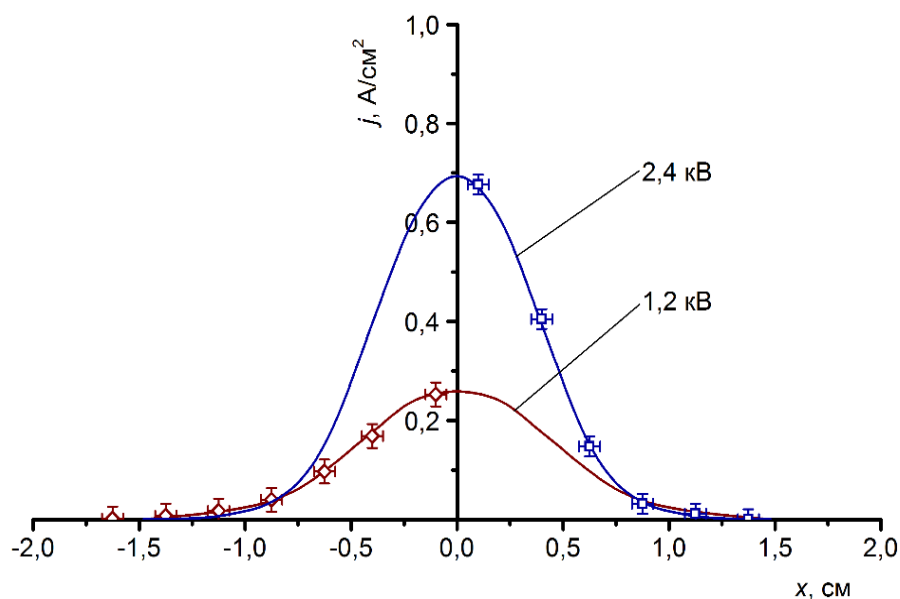


Рисунок 1.10 – Радиальные распределения плотности ионного тока по сечению пучка ионов азота с энергией ионов 1,2 и 2,4 кэВ в плоскости коллектора, [34]

Помимо аксиально-симметричных пучков возможно формирование ленточных импульсно-периодических пучков ионов. В работе [35] показано формирование пучков ионов азота и аргона низкой энергии с максимальной амплитудой тока 1.3 А и 0.8 А соответственно, рисунок 1.11. Результаты работы подтвердили возможность стабильной фокусировки пучка на протяжении всего импульса потенциала смещения вплоть до 80 мкс.

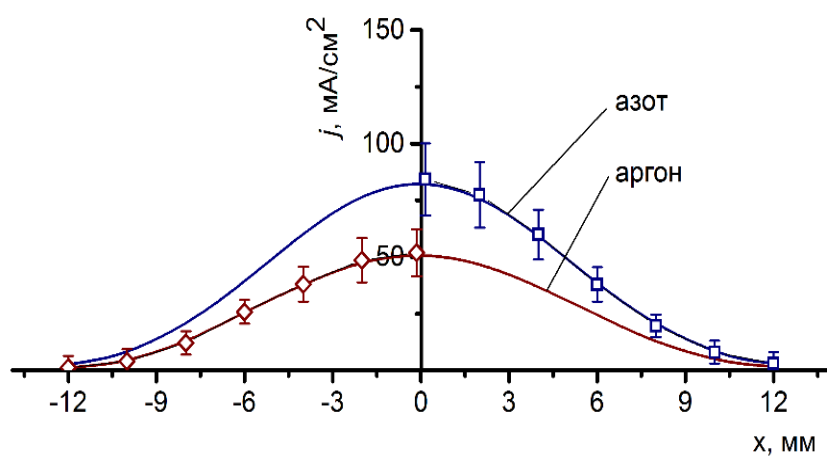


Рисунок 1.11 - Распределение плотности ионного тока по сечению пучков ионов азота и аргона, [35]

Отличительной особенностью ленточных пучков является меньшая величина плотности тока по сравнению с аксиально-симметричными, но большей областью обработки материала, что может быть весомо в производственных масштабах.

1.2 Высокоинтенсивная имплантация ионов газов

Модификация материалов за счёт воздействия пучками ионов газов представляет интерес в связи с повышением механических и трибологических характеристик обрабатываемой поверхности, таких как твёрдость и износостойкость. Отличие метода ионной имплантации от других, таких как азотирование из газовой фазы сопровождается меньшим промежутком времени модификации материала [36]. Однако, проблема метода классической (лучевой) ионной имплантации связана с ограниченной глубиной ионно-модифицированного слоя, обычно не превышающих нескольких долей микрон. В работе [7] Р. Вэй продемонстрировал, что плотность ионного тока имеет доминирующее влияние на формирования глубоко-легируемых слоёв, а не энергия ионов. Большая энергия ионов является негативным фактором, влияющим на распыление обрабатываемой поверхности, причём максимальный вклад в распыление поверхности ионным пучком наблюдается в области средних энергий (десятки-сотни кэВ). Однако, даже в области низких энергий (<10 кэВ) можно наблюдать значительное ионное распыление. Так, в работе [37] были представлены результаты кинетического моделирования по методу Монте-Карло процесса распыления пучками ионов азота тяжёлых d-металлов, группы Ir, Os, W ионами азота N^+ в диапазоне низких энергий 0.5-2.5 кэВ. Результаты показали наличие ионного распыления, а также тенденцию к его уменьшению при снижении энергии ионов.

На основе изложенного, были проведены исследования по модификации приповерхностных слоёв сталей 40X [10] и 40X13 [11], используя высокоинтенсивные низкоэнергетические пучки ионов азота.

Так, в работе [10] максимальная глубина ионно-модифицированного слоя наблюдалась при температуре обработки 500 °С (плотность ионного тока 0.3 А/см²) и составляла 180 мкм на небольшом расстоянии от центра кратера облучения. При этом, в центре кратера (область максимальной плотности ионного тока 0.5 А/см²) глубина ионно-модифицированного слоя составляла 70 мкм. Разительное уменьшение глубины модифицированного слоя связано с ионным распылением даже в области низких энергий.

В работе [11] по облучению высокохромистой стали 40X13 пучком ионов азота, исследования также показали максимальную глубину залегания примеси 75 мкм в центре пучка, при температуре обработки 500 °С. Модификация позволила увеличить микротвёрдость образца в 2-3 раза относительно исходного материала всего за час обработки.

Продолжая вышеописанные исследования, в рамках бакалаврской работы были проведены исследования по минимизации ионного распыления за счёт уменьшения энергии ионов азота в диапазоне 1.5-0.4 кэВ при плотностях ионного тока десятки мА/см² при высокоинтенсивной ионной имплантации в сталь 40X. Полученные результаты показали существенное уменьшение глубины кратера распыления от 120 мкм вплоть до полного отсутствия видимого образования кратера в диапазоне разрешимости профилометра STIL 3D Micromeasure при энергиях ионов 0.4 кэВ, рисунок 1.12. Также концентрационные профили показали увеличение максимальной концентрации примеси азота с 12 ат.% до 17 ат.% при энергии ионов 0.4 кэВ.

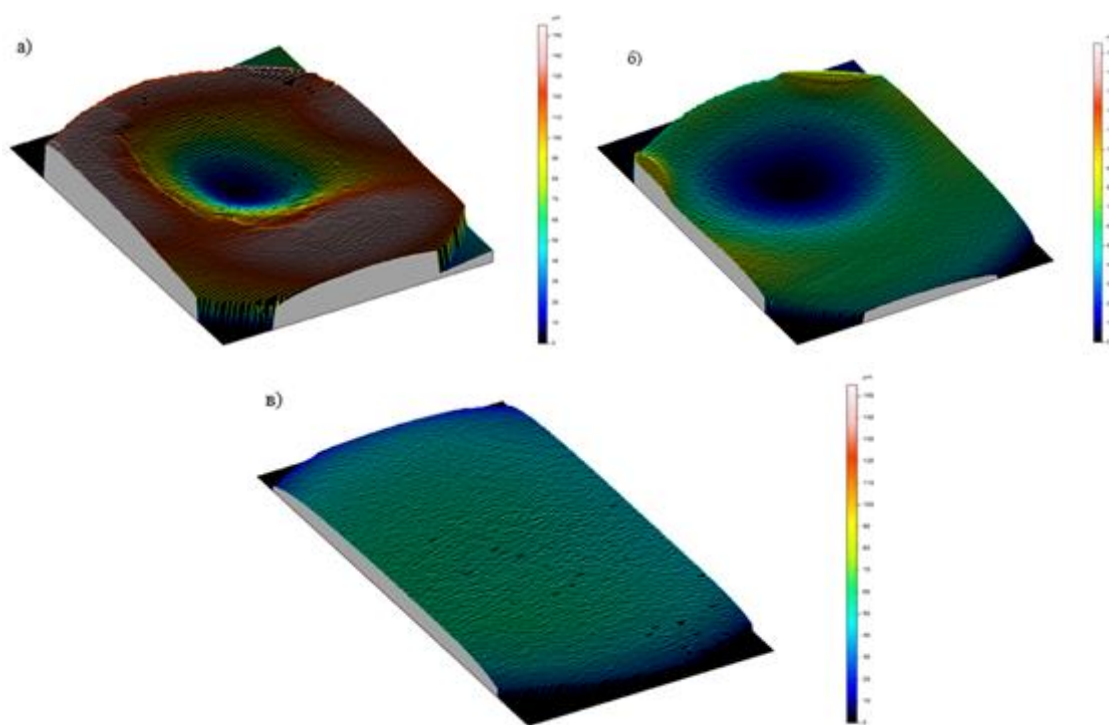


Рисунок 1.12 – Кратеры ионного распыления на поверхности стали 40Х
после воздействия пучками ионов азота при энергии ионов
а) 1.5 кэВ; б) 0.8 кэВ; в) 0.4 кэВ

Также можно выделить работы в ещё более низком диапазоне энергий (50-500 эВ) [38]. Целью автором было исследование механизмов повреждения поверхностей после ионной бомбардировки. Описанные условия энергетического диапазона и характера взаимодействия ионов с поверхностью могут быть применимы на практике при изучении взаимодействия солнечного ветра с элементами спутников [39]. Для экспериментов использовались плёнки переходных металлов (Pd, Ru, Mo, W) толщиной 80-100 нм. В работе были проведены измерения выхода распыления. Результаты показали наличие ионного распыления.

1.3 Высокоинтенсивная имплантация ионов металлов

Модификация при помощи пучков ионов металлов имеет особый интерес в связи с возможностью формирования ряда интерметаллидных фаз на поверхностном слое обрабатываемых материалов, имеющих уникальные

свойства модификации материалов, таких как стойкость к окислению, к наводораживанию, а также повышению механических характеристик.

В виду низкого нейтронного сечения, высокой температуры плавления, а также высокой коррозионной стойкости циркониевые сплавы широко используются в качестве основного конструкционного материала для оболочек ядерного топлива водо-охлаждаемых реакторов. Однако было отмечено, что циркониевые сплавы имеют низкую стойкость к окислению в паровой среде в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA), когда температура оболочки может превышать 1100–1200 °С, что приводит к высокой скорости коррозии и образованию большого количества водорода [40]. Выделившийся водород поглощается оболочками топлива, что вызывает водородное охрупчивание материала [41]. Таким образом, работа [42] была направлена на исследование высокоинтенсивной имплантации ионов Cr^+ на структурно-фазовое состояние, элементный состав и свойства стойкости к окислению сплава Zr-1Nb. Была показана диффузия хрома на глубины несколько десятком мкм, что способствовало увеличению стойкости к окислению сплава на 40-45% при испытаниях на высокотемпературное окисление в паре при температуре окисления 1000-1200 °С. Однако, из-за формирования специфической морфологии интерметаллидного соединения, известного как фазы Лавеса ZrCr_2 было показано, что окисление может происходить намного быстрее в локальных областях с низким содержанием хрома, что приводит к ухудшению защитных свойств поверхностного оксидного слоя. В таком случае, стойкость к окислению можно считать незначительной по сравнению с покрытиями из чистого хрома.

Можно выделить ещё одну работу [12], направленную на модификацию поверхности циркониевого сплава Zr-1Nb в зависимости от доз облучения ионами титана лежащих в диапазоне $(5,4\text{--}9,56) \cdot 10^{20}$ ион/см². Значительное снижение гидрогенизации сплава Zr-1Nb после имплантации ионов титана было достигнуто за счёт захвата водорода ионно-модифицированным слоем [43]. Также было обнаружено, что толщина

модифицированного слоя оказывает существенное влияние на скорость диффузии и количество захваченного водорода. Модификация поверхности циркониевого сплава осуществлялась за счёт изменения фазового состава, объясняемого растворением Ti в решетке циркония, сопровождающимся искажениями решетки и появлением макро-деформаций в интерметаллических фазах. Так, средняя твёрдость циркониевого сплава с имплантированным титаном была увеличена в 1,5 раза по сравнению с необработанными образцами. В данной работе не было установлено значительного изменения коэффициента трения. Профили следов износа показали увеличение износостойкости с увеличением дозы облучения. Однако, чрезмерное увеличение дозы облучения способствовало обратной тенденции к ухудшению износостойкости.

Другим важным металлом, требующим модификации, является алюминий. Алюминий и его сплавы широко используются в качестве конструкционных материалов ввиду отличных свойств данного материала, таких как: высокая тепло- и электропроводность, высокая коррозионная стойкость и другие. Однако, недостатками алюминия можно назвать низкую твёрдость и износостойкость данного материала.

В работе [44] была проведена модификация алюминиевой подложки высокоинтенсивными низкоэнергетическими пучками ионов титана в диапазоне температур 623-823 К. Авторами было показано образование интерметаллидной фазы Al_3Ti при температуре обработки 823 К, что способствовало увеличению твёрдости и износостойкости на порядок.

В работе [45] были проведены исследования по модификации титановой подложки высокоинтенсивными низкоэнергетическими пучками ионов алюминия в диапазоне температур 300-900 К. Авторы отмечают отсутствие диффузионного проникновения примеси алюминия в глубину титанового образца и соответственно отсутствие образования каких-либо интерметаллидных фаз при температурах 300-500 К. Однако, с увеличением температуры наблюдалось формирование интерметаллидных фаз $\alpha_2 - Ti_3Al$

(ГПУ решётка) и Al–Ti. С увеличением температуры, глубина залегания примеси достигала максимума при 700 К и составляла 25 мкм, дальнейшее увеличение температуры обработки снижало глубину модифицированного слоя ввиду значительного ионного распыления с образованием кратера распыления вплоть до 300 мкм, рисунок 1.13. Износостойкость увеличилась в 2.5 раза по сравнению с необработанными образцами. Исследования микротвёрдости не показали значительного улучшения после ионной обработки.

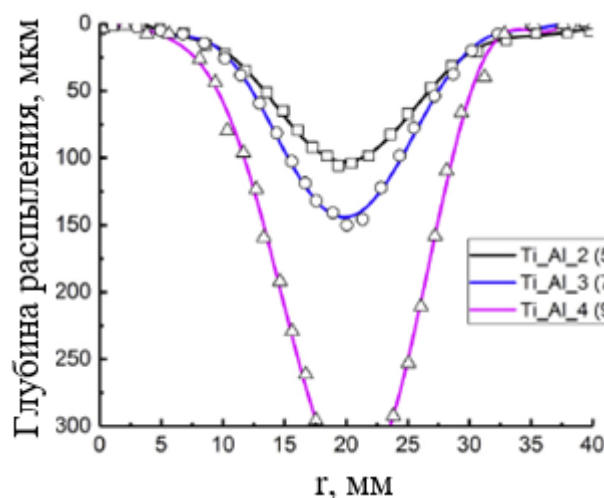


Рисунок 1.13 – Профиль ионного распыления после облучения титана пучками ионов алюминия в зависимости от режима облучения, [45]

Γ, мм

Наличие существенного ионного распыления, негативно сказывается на формировании ионно-легированных слоёв. Поэтому уменьшение вклада ионного распыления поверхности является важной задачей для достижения глубоко легированных слоёв.

1.4 Ионное распыление поверхности твёрдого тела

Говоря об ионной имплантации всегда стоит понимать многофакторность процесса модификации материалов. Исходя из современных задач по модификации материалов высокоинтенсивными пучками ионов с плотностью ионного тока порядка единиц А/см^2 наблюдается повышение температуры обработки. Повышенные температуры

благоприятно влияют на диффузию по законам Фика. С другой стороны, высокоинтенсивной имплантации присущ эффект ионного распыления. Толщина слоя распыления материала при определённых параметрах соизмерима и может даже превосходить толщины модификации материала.

В случае бомбардировки твёрдого тела высокоинтенсивными пучками либо пучками тяжёлых ионов, скорость образования дефектов и интенсивность распыления велики, так что развивающийся рельеф поверхности определяется процессом эрозии.

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

$$Y = \frac{\text{число удалённых атомов}}{\text{число падающих частиц}}. \quad (1.3)$$

Распыление пучком ионов относится к физическому процессу, которому соответствует механизм передачи импульса атомам мишени с их последующим вылетом при условии преодоления барьера, связанного с поверхностными силами связи со стороны мишени.

В случае длительной бомбардировки, важно иметь ввиду, что на распыление поверхности тратится лишь небольшая часть энергии ионов, остальная передаётся мишени в виде тепла или расходуется на образование объёмных радиационных нарушений. Соответственно высокоинтенсивной имплантации с высокими дозами облучения соответствуют большая температура обработки и существенные поверхностные и объёмные нарушения.

Первые экспериментальные исследования в области ионного распыления были проведены Круксом, Гранквистом и Холборном и Остином. С тех пор было установлено, что распыление на поверхности является результатом каскада атомных столкновений в граничных, т.е. поверхностных слоях твёрдого тела.

Развивающаяся теория каскадных столкновений действительно показала, что в пределе высоких энергий иона коэффициент распыления пропорционален потерям энергии на единицу пути и соответственно зависит от характеристик иона (заряда, массы, энергии и угла падения), а поток низкоэнергетических выбитых атомов изотропен [46, 47]. Поэтому обычно, распыления характеризуют по типу падающих частиц, типу распыляемой мишени и условий распыления.

В случае металлических мишеней, наиболее распространённым механизмом распыления является распыление за счёт прямого выбивания (процессы упругих столкновений, определяемые законами сохранения энергии и импульса). Распыление условно можно разделить на три качественно разных случая: режим первичного выбивания атомов; режим линейных каскадов и режим тепловых пиков.

Режиму первичного выбивания условно соответствует диапазон энергий падающих ионов единицы-десятки эВ.

Режиму линейных каскадов соответствует диапазон энергий падающих ионов единицы-десятки кэВ, для всех типов ионов, кроме тяжёлых элементов.

Режиму тепловых пиков соответствует область МэВ энергий для тяжёлых частиц.

Исходя из цели данной работы, по величине энергии ионов единицы кэВ рассмотрим подробнее режим линейных каскадов.

Как было сказано ранее, режиму линейных каскадов соответствует число атомов отдачи пропорциональное ядерным потерям энергии на единицу толщины [48, 49, 66]. Тогда коэффициент распыления Y можно представить следующим образом:

$$Y = \lambda \cdot F_D(E, \theta), \quad (1.4)$$

где λ – константа зависящая от характерных свойств материала мишени, но не зависит от параметров, характеризующих ион, функция

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

В приведённых теоретических выкладках были введены следующие допущения: 1) было введено предположение об изотропности низкоэнергетических атомов каскада; 2) поверхность мишени не вносит существенного вклада в развитие каскада столкновений; 3) не учитывались объёмные силы связи атомов мишени; 4) не учитывались ориентационные эффекты, связанные с кристаллической структурой мишени.

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

$$P(E_0, \theta_0) = \begin{cases} 1 & \text{при } E_0(\cos\theta_0)^2 > U_0 \\ 0 & \text{при } E_0(\cos\theta_0)^2 \leq U_0 \end{cases}, \quad (1.5)$$

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

В таком случае, формулу λ можно выразить как:

$$\lambda = \frac{\Gamma_m}{8(1-2m)} \cdot \frac{1}{NC_m U_0^{1-2m}}, \quad (1.6)$$

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 (1.6) преобразуется к более простому виду:

$$\lambda = \frac{3}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{NC_0 U_0}, \quad (1.7)$$

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

Второй множитель в формуле (1.4) можно найти из соотношения:

$$F_D(E, \theta) = \alpha \left(\frac{M_2}{M_1}, \tilde{\theta} \right) NS_n(E), \quad (1.8)$$

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

Вклад от $\alpha(M_2/M_1)$ может быть найден из рисунка 1.14. На примере работы [10], отношение масс атома мишени железа и иона азота составляет: $M_2/M_1=4$, тогда $\alpha \approx 0.66$. В данном случае учитывались только упругие столкновения, что позволило рассматривать параметр α как независимую величину от энергии падающих ионов. При учёте же электронного торможения, можно наблюдать медленное уменьшение параметра α с ростом энергии. Также параметр α зависит и от угла падения и тем больше, чем больше угол падения. Об этом будет говориться позднее. Также стоит отметить зависимость роста параметра α с увеличением отношения масс M_2/M_1 . Последний факт обусловлен рассеянием иона на больший угол при уменьшении массы иона. Таким образом, эффективность распыления мишени ионами лёгких элементов выше, чем тяжёлых.

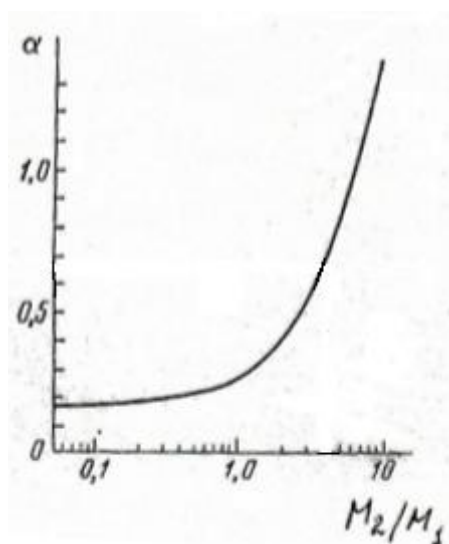


Рисунок 1.14 – зависимость величины α от отношения масс M_2/M_1 , [48]

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: передачи энергии электронам и передачи энергии атомам. Пик сечения ядерных потерь приходится при значениях энергии 0.1 – 10 кэВ. Величина энергии ионов в работе [10] составляла 1.2 кэВ.

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

$$S_n(E) = 4\pi a Z_1 Z_2 e^2 \frac{M_1}{M_1 + M_2} s_n(\varepsilon), \quad (1.9)$$

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

$$\varepsilon = \frac{M_2 E}{M_1 + M_2} \frac{a}{Z_1 Z_2 e^2}, \quad (1.10)$$

где $a \approx \frac{0.885 a_0}{\sqrt{Z_1^{\frac{2}{3}} + Z_2^{\frac{2}{3}}}} \approx 0.133 \text{ \AA}$ – радиус экранирования Томаса-Ферми для ионов

азота и атомов мишени железа. В работе проводилась модификация стали, а не чистого железа, что может быть важно при точном расчёте коэффициента распыления, однако здесь я предлагаю провести лишь оценку коэффициента распыления. $a_0 = 0.529 \text{ \AA}$ – радиус Бора, E – энергия налетающего иона.

Для оценки ядерных потерь можно воспользоваться упрощённой формулой

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_n = N \frac{\pi^2}{2} Z_1 Z_2 e^2 a \alpha \frac{M_1}{M_1 + M_2}. \quad (1.11)$$

Тогда общее выражение для коэффициента распыления с учётом формулы (1.11) будет:

$$Y = \frac{3}{8} \cdot \frac{1}{c_0 U_0} \cdot Z_1 Z_2 e^2 a \frac{M_1}{M_1 + M_2} \quad (1.12)$$

Подставляя значения $U_0 = 3$ [эВ] (энергия связи атома в кристаллической решётке), $e^2 = 14.4$ [эВ · Å], получим $Y \approx 3.19$.

В случае учёта потерь энергии на электронное возбуждение следует обратить внимание на сечение торможения (формула Бете [50]) используемая в случае больших скоростей ионов:

$$S_e = \frac{4\pi e_1^2 Z_2 e^2}{mv^2} \left(\ln \frac{2mv^2}{I} + \text{поправочные члены} \right), \quad (1.13)$$

где e_1 – заряд частицы, e – заряд электрона, средний потенциал ионизации. В случае низких скоростей ионов лучше воспользоваться формулой Линхарда и Шарфа [51]:

$$S_e = 4 \cdot \xi_e e^2 a_0 \cdot \frac{Z_1 Z_2}{\sqrt{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}}} \cdot \frac{v}{\frac{e^2}{h}}, \quad (1.14)$$

где ξ_e – некоторая функция атомного номера Z_1 [52].

При бомбардировке тяжёлыми ионами с энергией десятки кэВ, была обнаружена зависимость коэффициента распыления от угла падения [53]:

$$\frac{Y(\theta)}{Y(0^\circ)} = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (1.15)$$

где θ – угол падения.

В случае падения ионов небольшой массы и малых энергий, наблюдалась более сильная зависимость увеличения коэффициента распыления от угла падения чем (1.15). Но при всех исследованиях, наибольшая величина коэффициента распыления наблюдалась в области углов 60° - 80° от нормали к поверхности и быстро убывала при приближении к скользящему углу падения [48], рисунок 1.15.

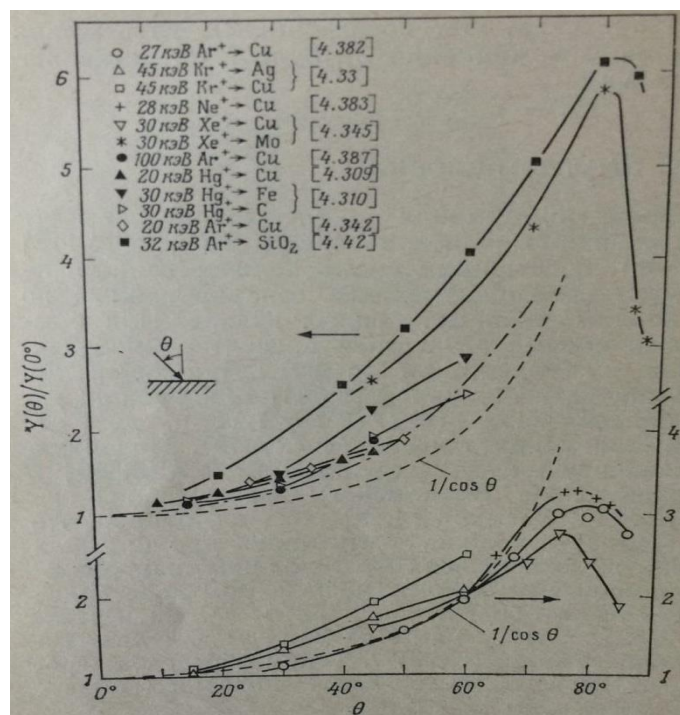


Рисунок 1.15 – Коэффициент распыления поликристаллической мишени в зависимости от угла падения ионов, [48]

Основным усложнением при учёте распыления многокомпонентных мишеней (сплавов) исследователями было показано необязательно стехиометрическое распыление. Причём этот эффект зависит от массы иона, его энергии, температуры мишени, дозы облучения, а также различиями в поверхностной и химической энергиях связи атомов мишени. Первым, данный эффект наблюдался Гилламом в 1959 году [54]. Однако, при больших дозах облучения, соответствующих поставленной задаче, состав поверхности мишени становится таким же, как и состав объёма мишени. То есть наблюдается равновесное стехиометрическое распыление сплавов.

Температура мишени обычно не вносит существенного влияния в коэффициент распыления [55]. Однако, в области температур, близких к температуре плавления наблюдалось увеличение коэффициента распыления. Более того, за счёт температуры твёрдого тела и под действием ионной бомбардировки может изменяться шероховатость поверхности, что приводит к изменению коэффициента распыления для неровностей, сравнимыми с

размерами отдельных каскадов или превышающими их. Такие различия в коэффициентах распыления проявляют отдельные кристаллиты поликристаллических материалов.

1.5 Ионная имплантация для модификации труб и отверстий

На сегодняшний день, актуальной задачей является модификация внутренних поверхностей протяжённых отверстий промышленных компонентов, таких как трубы, поршневые кольца и другие. В рамках традиционной ионной имплантации, выполнение этой задачи является затруднительной, однако, существует ряд работ, направленных на исследование модификации внутренних поверхностей методом «Plasma Source Ion Implantation (PSII)», за счёт установления внутри обрабатываемой детали дополнительного электрода. На примере работы [14] была продемонстрирована возможность применения данного метода для модификации поверхности высоко хромированной стали 40Cr пучками ионов азота с энергией 30 кэВ, дозами облучения $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, плотностью ионного тока 30 мкА/см². Глубина легирования примеси в данном случае не превышала десятки-сотни нанометров, рисунок 1.16.

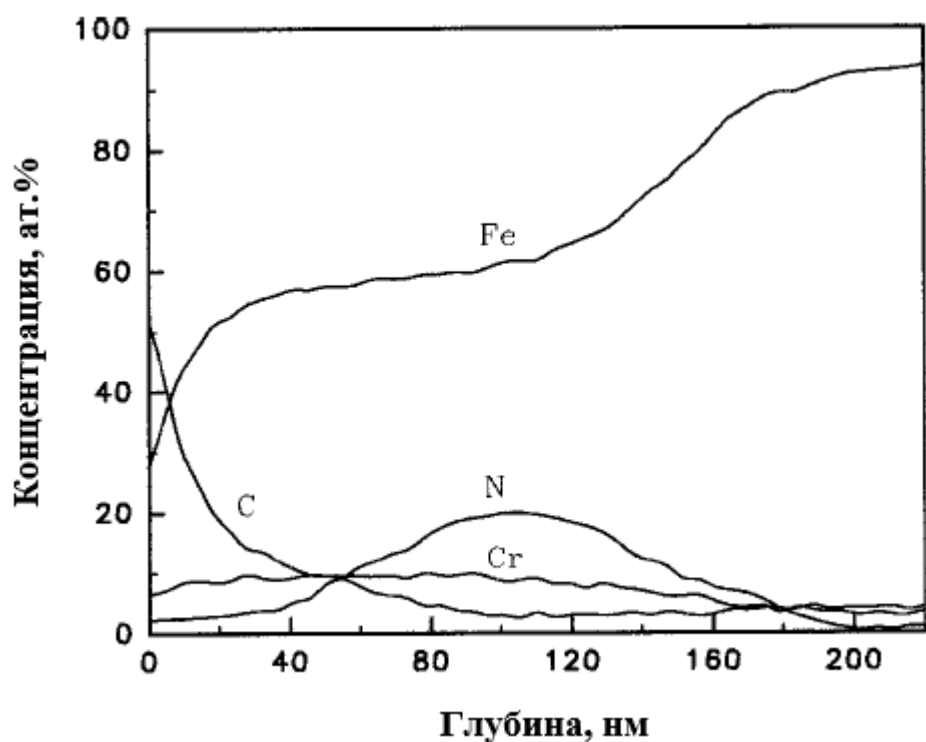


Рисунок 1.16 – Концентрационный профиль глубины азота после имплантации, [14]

Однако, такие методы были применимы только при работе с газовой плазмой и не решали проблему с неравномерным профилем обработки ввиду неравномерного профиля доз облучения [15-17].

Для преодоления вышеописанных трудностей была предложена модификация метода PSII, заключающаяся в установке распыляемого катода внутри обрабатываемой поверхности и внедрении дополнительного сеточного электрода для создания однородной плазмы при помощи высокочастотного разряда [18]. В работе была показана возможность разделения областей генерации плазмы и ускорения пучка ионов, что позволило снизить плазменную нестабильность и неравномерность распределения доз облучения вдоль образца.

Одним из главных достоинств предложенного подхода стала возможность обработки внутренних поверхностей за счёт металлической плазмы на примере титана. Однако, важно отметить, что толщина модифицированного слоя в данном случае не превышала десятков

нанометров, что является существенным недостатком метода. Предложенные работы были направлены на модификации внутренних поверхностей металлов с внутренним диаметром порядка 100 мм и длиной 150 мм методом PSII. Дальнейшее развитие метода PSII для модификации внутренних поверхностей было направлено на облучение труб метровой протяжённостью и внутренними диаметрами 35 мм [19] и протяжённостью 30 мм с внутренним диаметром пару миллиметров [20]. В обеих работах авторам удалось показать возможность применение метода PSII для модификации внутренних поверхностей трубок с заданными параметрами с глубинами залегания примеси не более десятков нанометров.

Все описанные ранее работы имеют существенный недостаток, связанный с небольшой глубиной залегания примеси, порядка десятков-сотен нанометров. Более эффективным методом, позволяющим формировать модифицированные слои с толщинами единицы-десятки микрометров является метод высокоинтенсивной ионной имплантации. Данный метод будет применён для модификации протяжённых отверстий в настоящей диссертационной работе.

1.6 Выводы по первой главе

В данной главе были рассмотрены основные особенности генерации как плазмы металлов, так и плазмы газов. Рассмотрена система формирования пучка ионов, основанная на плазменно-иммерсионном извлечении ионов из плазмы их последующей фокусировкой в область пространство дрейфа и транспортировки до коллекторного узла. Рассмотрен недостаток формирования плазмы вакуумно-дуговым разрядом, заключающийся в образовании большого количества микрокапельных фракций и методом очистки пучка ионов. Установлено, что для формирования пучков ионов металлов характерно возникновение пучковой неустойчивости, связанной с формированием виртуального анода вблизи коллектора. Рассмотрены способы борьбы с пучковой неустойчивостью.

Представлено общее состояние исследований формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов и их применение для модификации свойств металлов. Выявлена основная проблема ионной имплантации, препятствующая глубинному легированию примеси за счёт ионного распыления. Рассмотрены основные принципы и особенности ионного распыления.

Представлен ряд работ, направленный на ионную модификацию труб и отверстий. Таким образом, установлено, что ранние работы по модификации труб и отверстий проводились при пучках ионов с плотностью ионного тока порядка микроампер на сантиметр квадратный, энергии ионов порядка десятков кэВ и дозами облучения порядка 10^{17} ион на сантиметр квадратный. Такие пучки позволяли получать модифицированные слои толщиной порядка десятков-сотен нанометров. Применение пучков ионов газов и металлов низкой энергии с плотностями ионного тока порядка сотен миллиампер на сантиметр квадратный, и дозами облучения порядка 10^{21} ион на сантиметр квадратный не проводились.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной главе были рассмотрены принципы проведения эксперимента и работы экспериментального оборудования. Экспериментальное оборудование включало в себя систему вакуумной откачки, источники генерации плазмы газов и металлов, генераторы высокочастотных импульсов, система формирования пучков ионов, а также станок для нарезки образцов «Brilliant 201», шлифовально-полировальная машина «Saphir 320». Для исследования поверхности образцов использовался оптический бесконтактный трехмерный профилометр «STIL 3D Micromesure». Исследование распределение имплантируемой примеси по глубине производилось с помощью растрового электронного микроскопа «Hitachi S-3400 N». В главе был рассмотрен и предложен крепёж для образцов, позволяющий проводить имитацию трубы и протяжённых отверстий.

2.1 Экспериментальная установка

Исследования проводились на комплексной установке, схема которой изображена на рисунке 2.1. Установка предназначена для ионно-плазменной обработки материалов. На установке предусмотрена возможность использования разных типов источников плазмы газов или металлов.

Приведённая схема установки включает в себя основные три блока элементов.

Первый блок включал в себя баллоны с рабочим газом аргоном и азотом; регулирующие подачу газа клапаны (VR4) и (VR5); источники питания накала (ИПН) и разряда (ИПР); сам источник генерации газовой плазмы. Данный блок был ответственен за создание и транспортировку плазмы до системы формирования пучков ионов.

Второй блок включал в себя вакуумную систему откачки, а именно: вакуумная камера, позволяющая получать предельный вакуум вплоть до

10^{-3} Па; форвакуумный (N1) насос марки «ISP-1000» со скоростью откачки 1000 л/мин; высоковакуумный (NR) насос марки «Turbo-V 1000 Navigator» со скоростью откачки 1000 л/с; вакуумный затвор (VT); клапан напуска атмосферы (VR3) и проходные клапаны (VR1) и (VR2); термодатные вакуумметры (P1) и (P3) использовались для контроля форвакуума, а ионизационный вакуумметр (P2) использовался для контроля высокого вакуума. Давление остаточной атмосферы в рабочем объёме в случае генерации плазмы азота составляло 0.6 Па. В случае генерации плазмы алюминия, остаточное давление в рабочем объёме составляло порядка 10^{-3} Па.

Третий блок включал в себя систему формирования пучков, состоящую из цилиндрического и сеточного электродов. Внутри системы формирования устанавливался коллектор, представляющий собой шестигранный держатель и закреплённые на нём шесть образцов для имитации протяжённого отверстия.

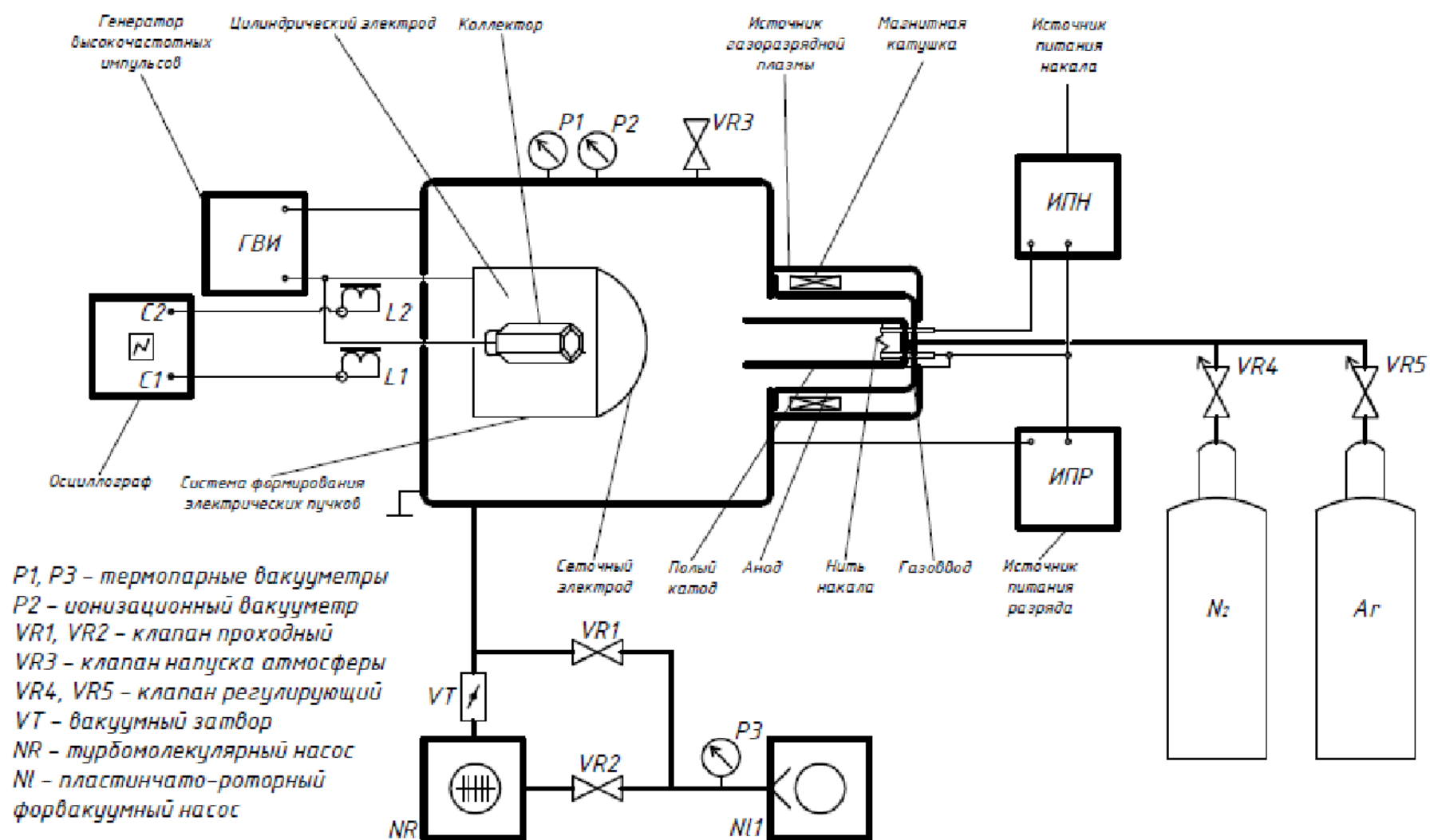


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки

2.2 Источники плазмы азота и алюминия

В работе были проведены две серии экспериментов с использованием пучков ионов металлов и газов.

В качестве генератора плазмы азота использовался плазмогенератор на основе несамостоятельного дугового разряда с накалимым катодом «PINK», разработанный в институте сильноточной электроники СО РАН [56]. На рисунке 2.2 представлено схематичное изображение «PINK».

Катод выполнен из вольфрамовой проволоки диаметром 2-3 мм, длиной 180 мм, изогнутой в виде буквы «М». Катодный узел из плазмогенератора изолирован от его корпуса диэлектрическим фланцем и находился под катодным потенциалом. Рабочий газ в плазмогенератор подавался натекателем через газовый ввод.

Эмитируемые накалимым катодом электроны движутся вдоль силовых линий магнитного поля в направлении анода, роль которого выполняли заземлённые стенки вакуумной камеры. Эксперименты проводились при давлении рабочего газа в камере 0.6 Па. Напуск рабочего газа производился в катодную полость приводит к формированию вблизи накалимого катода 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 является как накаленная катодная нить, так и соединённая с ней катодная полость, и полым анодом с площадью равной площади внутренней поверхности вакуумной камеры. Плазма, генерируемая таким разрядом, заполняла анодную полость, являясь рабочей средой для системы формирования высокоинтенсивных пучков ионов.

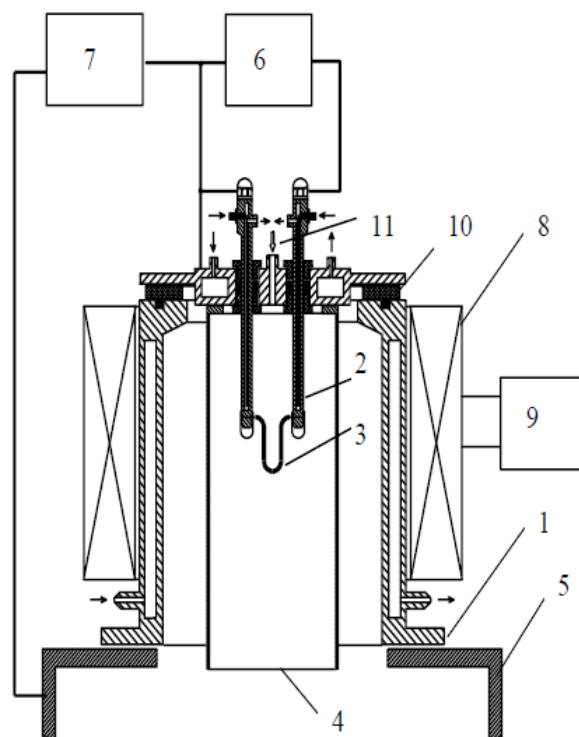


Рисунок 2.2 – Схема плазмогенератора «PINK». 1– водоохлаждаемый корпус; 2 – электроввод; 3 – катод накаливания; 4 – цилиндрический полый катод; 5 – анод (стенки вакуумной камеры); 6 – источник питания накала; 7 – источник питания разряда; 8 – магнитная катушка; 9 – источник питания магнитной катушки; 10 – изолятор; 11 – газоввод

В качестве генератора металлической плазмы использовался вакуумно-дуговой испаритель на основе вакуумно-дугового разряда с аксиально-симметричным магнитным полем с алюминиевым катодом, схема которого представлена на рисунке 2.3.

Генератор работал в непрерывном режиме при токах разряда 130 А.

При вакуумно-дуговом разряде происходит образование взрывозмиссионных процессов, возникающих при дуговом пробое между поверхностью катода и поджигающим электродом. Результатом взрывозмиссионных процессов является формирование так называемых эктонов, представляющих собой лавины заряженных частиц. Возникновение

эктонов сопровождается формированием катодных пятен, представляющих собой центры плазменной эмиссии на поверхности катода.

Важной особенностью формирования плазмы металлов при вакуумно-дуговом разряде является наличие большой направленной скорости движения плазменного потока. Наличие направленного движения плазменного потока может быть объяснено за счёт газодинамической модели, объясняющей этот эффект за счёт ион-ионного и электрон-электронного градиентов давления [57].

В данной работе применялся водоохлаждаемый алюминиевый катод, который располагался вдоль оси испарителя в области магнитного поля. Для генерации плазмы применялся источник питания вакуумно-дугового испарителя и электрически синхронизированный с ним источник питания поджигающего электрода. Вакуумно-дуговой разряд формировался между катодом и анодом, представляющим собой стенки вакуумно-дугового испарителя и внутреннюю поверхность вакуумной камеры. Катод имеет форму усечённого конуса для стабилизации движения катодного пятна по торцевой части катода. Форма катода в виде усечённого конуса позволяет стабилизировать движение катодного пятна по торцевой рабочей поверхности катода в продольном магнитном поле стабилизирующей катушки вакуумно-дугового испарителя. Фокусирующая магнитная катушка использовалась для фокусировки плазменного потока на выходе плазменного источника.

При работе с плазмой алюминия важно помнить о постоянной очистке анодной поверхности от алюминиевого напыления ввиду того, что плёнки оксидов алюминия, покрывающие весь анод, не проводят электрический ток, от чего возможно прерывание горения дуги между катодом и анодом.

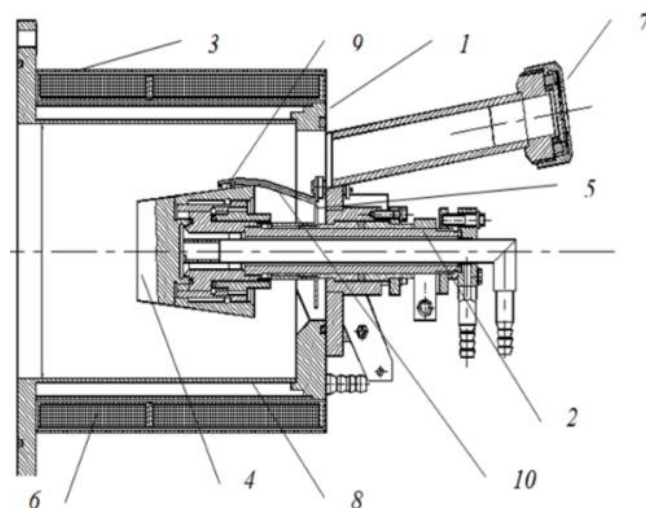


Рисунок 2.3 – Схема формирования пучков ионов на основе плазмы вакуумно-дугового разряда: 1 - корпус; 2 – держатель катода; 3 – защитный кожух катушек; 4 – катод; 5 – экран; 6 – катушки; 7 – смотровое окно; 8 – анод; 9 – токоограничивающий элемент; 10 – поджигающий электрод, [58]

2.3 Система формирование высокоинтенсивных ионных пучков

Для формирования ионного пучка использовался генератор прямоугольных высокочастотных импульсов смещения отрицательной полярности. Амплитуда потенциалов смещения равнялась 1.4 кВ при частоте следования импульсов 40 кГц и длительностях импульсов 5, .75 и 10 мкс. На рисунке 2.4 представлена осциллограмма импульса потенциала смещения на системе формирования пучков ионов длительностью 10 мкс.

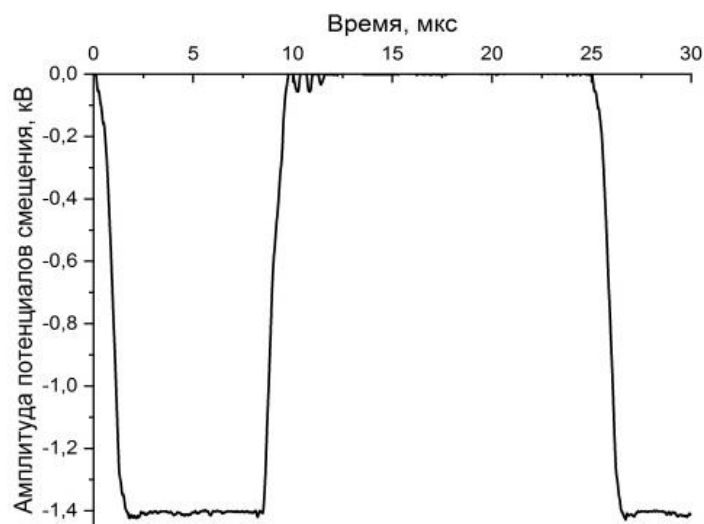


Рисунок 2.4 – Осциллограмма импульса потенциала смещения на системе формирования пучков ионов, длительностью 10 мкс

Импульсы потенциалов смещения подавались на систему формирования высокоинтенсивных пучков ионов, внешний вид и схема, которой представлена на рисунке 2.5. Система формирования включает в себя следующие элементы: электрически соединённые сеточный и сплошной цилиндрический электроды и коллекторный узел. Такая система позволяет создавать внутри системы эквипотенциальное пространство дрейфа. Фокусирующий сеточный электрод был выполнен в форме части сферы, радиусом 200 мм, с размером ячейки сетки $0,5 \times 0,5 \text{ мм}^2$ и прозрачностью 30%. Размер ячейки был выбран в соответствии с литературным обзором в параграфе «Общие принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов газов и металлов». Сеточный электрод был сделан из нержавеющей стали. Система устанавливалась в рабочей камере вдоль оси цилиндрического полого катода плазмогенератора на расстоянии 150 мм между выходом плазмогенератора и сеточным электродом.

При подаче потенциала смещения на фокусирующую систему формировался слой разделения заряда около сеточного электрода. Внутри слоя под действием электрического поля происходит ускорение ионов и отталкивание отрицательно заряженных электронов. Ширина стационарного

слоя разделения заряда описывается законом Чайлда-Ленгмюра. Данный закон показывает, что ширина слоя разделения зарядов прямо пропорциональна амплитуде потенциала смещения на сеточном электроде в степени $3/2$ (формула 1.2). В условиях, когда ширина слоя сравнима с размерами ячейки сетки, наблюдается ухудшение условий фокусировки пучка. В данной работе амплитуда потенциалов смещения способствовала формированию слоя разделения зарядов порядка нескольких сантиметров, что позволяло осуществлять эффективную фокусировку пучков ионов. Ускоряясь, ионы пучка баллистически фокусируются и проникают в эквипотенциальное пространство дрейфа. Внутри эквипотенциального пространства происходит транспортировка пучка до коллекторного узла. Эквипотенциальное пространство ограничивалось цилиндрическим сплошным электродом. Для условия компенсации пространственного заряда внутри области транспортировки пучка, система формирования предварительно погружалась в плазму. Импульсный режим генерации потенциалов смещения способствовал проникновению внутрь области транспортировки пучка плазмы в промежутки между импульсами.

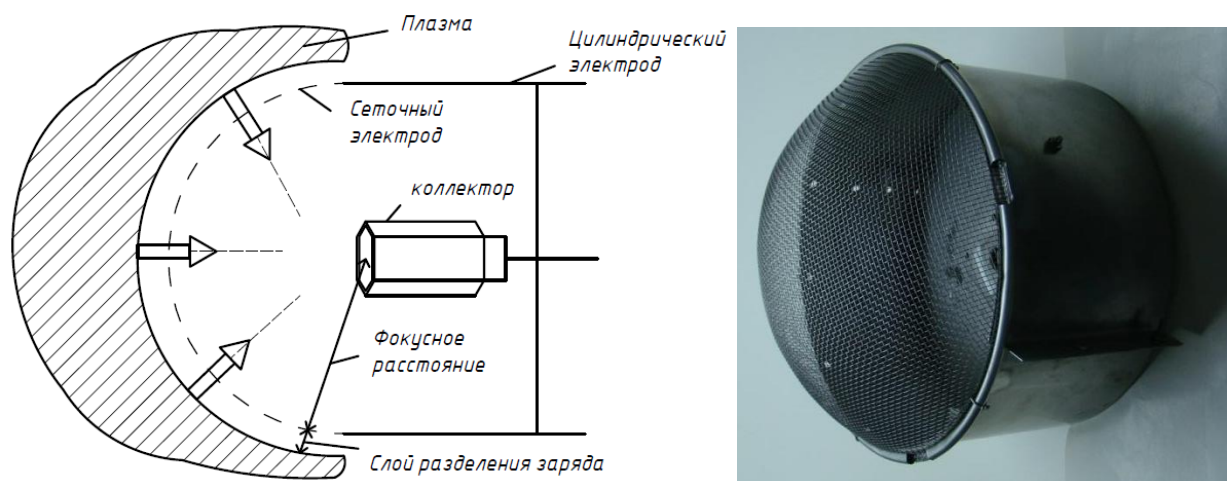


Рисунок 2.5 – Схема и внешний вид системы формирования и транспортировки пучка ионов

На рисунке 2.6 представлен вид коллекторного узла. Коллекторный узел включал в себя следующие элементы: шестигранный держатель для

образцов, дополнительные вводы для термопары и эмиттера электронов. В соответствии с литературным обзором в параграфе «Общие принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов газов и металлов» дополнительные вводы для термоэмиттера устанавливались для случая использования вакуумно-дугового испарителя при создании плазмы алюминия. Коллекторный узел устанавливался внутри системы формирования пучка таким образом, чтобы фокус пучка находился в области образцов.

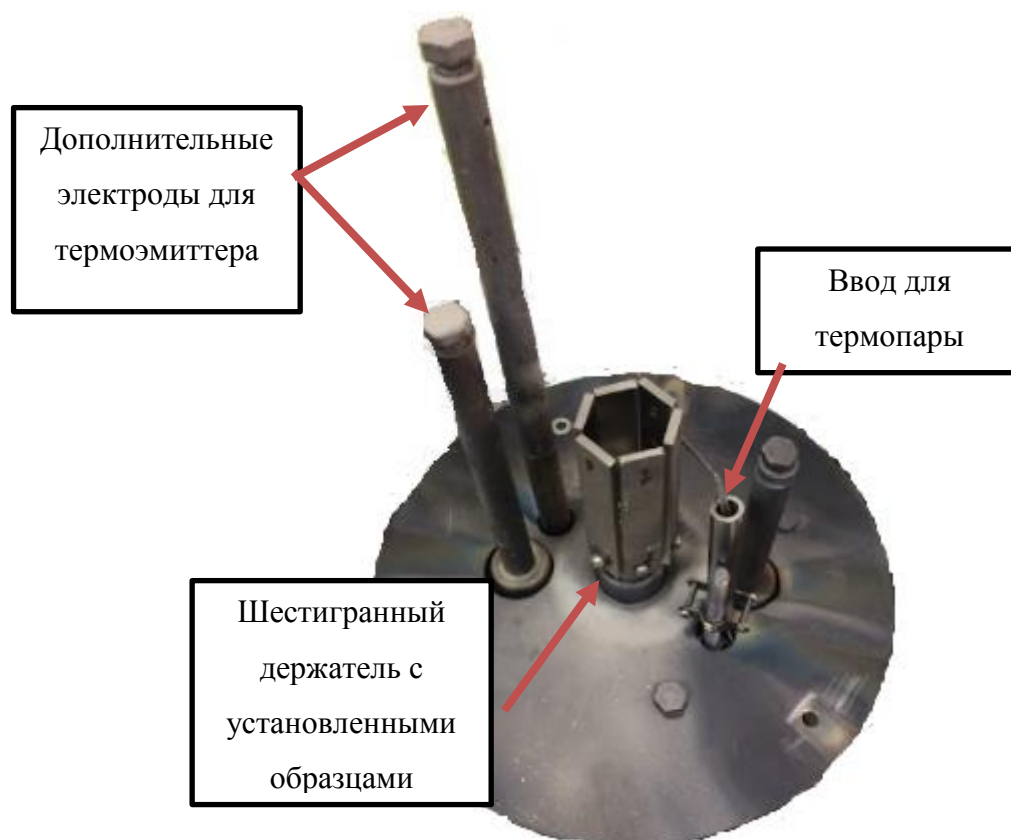


Рисунок 2.6 – Коллекторный узел

В работе использовался дополнительный дисковый электрод на сеточном электроде для удаления микрокапельных фракций в случае использования вакуумно-дугового источника при формировании плазмы алюминия, рассмотренный в литературном обзоре, параграфе «общие принципы формирования высокоинтенсивных пучков ионов газов и металлов» [13].

2.4 Методика высокоинтенсивной ионной имплантации газов и металлов во внутренние поверхности протяжённых отверстий

Держатель для образцов был сконструирован в виде шестигранника для расположения образцов в форме трубы, рисунок 2.7.

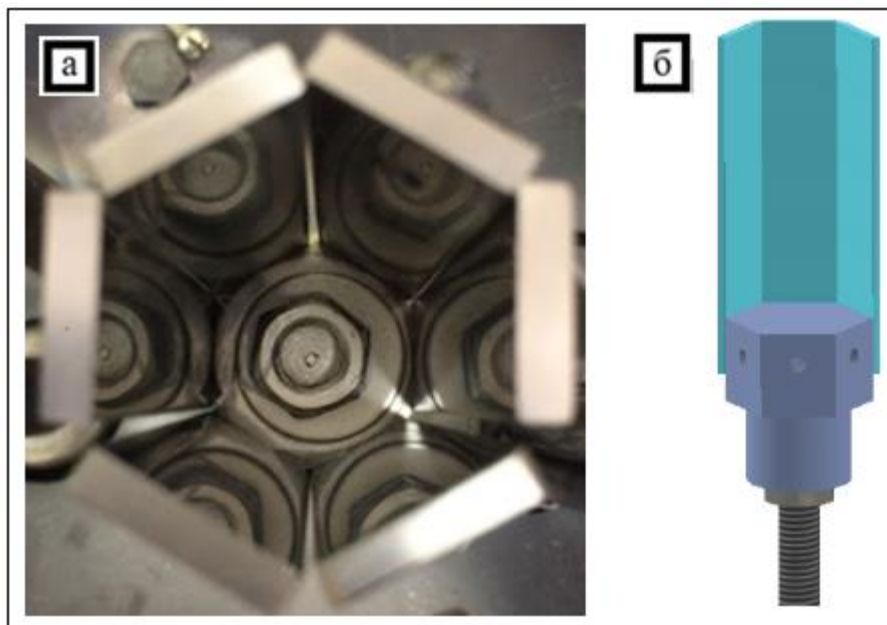


Рисунок 2.7 – Расположение образцов перед экспериментом. а) вид сверху; б) вид сбоку

Расстояние между противоположными пластинами составляло 20 мм. Дополнительная установка термоэммиттера была необходима в случае плазменной обработки пучками ионов алюминия для компенсации пространственного заряда в области баллистической фокусировки пучка ввиду кулоновского взаимодействия между ионами.

Система измерения сигналов ионного тока на коллекторе и сеточном электроде представляла собой следующие элементы: калиброванные пояса Роговского и осциллограф. Пояса Роговского использовались для регистрации ионных токов. Импульсные сигналы с поясов Роговского измерялись цифровым четырёхканальным осциллографом LeCroy

Waverunner 6050A. Внешний вид передней панели осциллографа представлен на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – 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. На рисунке 2.9 представлена осциллограмма ионного тока на коллекторном узле при длительности импульса 10 мкс. Амплитуда переднего фронта, значительно превышающая среднюю амплитуду ионного тока на осциллограмме связана с переходными процессами формирования слоя разделения заряда. В связи с этим слабо ускоренные ионы в начальный момент времени приложения импульса потенциала смещения, имеют меньшую скорость передвижения чем ионы, ускоренные после стационарного формирования слоя разделения зарядов. Таким образом, ионы, ускоренные в каждый последующий момент времени вплоть до полного формирования слоя разделения зарядов, имеют большую скорость передвижения нежели ионы в момент до этого. Это означает, что передний фронт ионного тока связан с количеством ионов, ускоренных на протяжении всего времени формирования слоя разделения заряда. После формирования стационарного слоя разделения зарядов,

ускорение ионов происходит на одинаковую величину, что и наблюдается на осциллограмме как постепенный выход на плато амплитуды ионного тока.

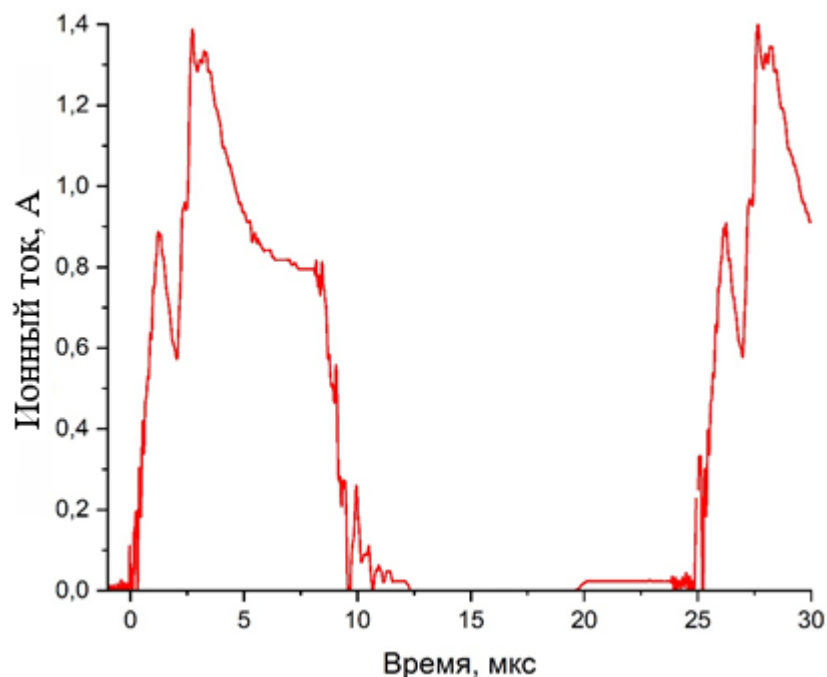


Рисунок 2.9 – Осциллограмма ионного тока на коллекторном узле при длительности импульса 10 мкс

В качестве материала для исследований ионного распыления были выбраны нержавеющая сталь и титан. Нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т (аналог AISI 321) была выбрана ввиду распространённости этого материала в качестве конструкционного. Титан марки BT1-0 был выбран ввиду его широкого использования в машиностроении, приборостроении, изделий криогенной техники и других.

Исходная подготовка образцов перед имплантацией заключалась в нарезке образцов размером 65х13 мм и толщиной 3 мм на станке «Brilliant 201», рисунок 2.10. В процессе резки применялось водяное охлаждение. В качестве материала отрезного круга использовался карбид кремния SiC.



Рисунок 2.10 – Станок Brilliant 201

После нарезки образцов, для заданных условий держателя образцов на коллекторном узле, были сделаны отверстия вблизи одного из краёв образцов.

После подготовки образцы были отшлифованы на шлифовально-полировальной машине «Saphir 320», рисунок 2.11 (а) при помощи наждачной бумаги с размерами зёрен абразива от 40 до 3,5 мкм. Внешний вид образцов представлен на рисунке 2.11 (б).

После окончательной полировки на сукне в присутствии алмазной суспензии с минимальным размером абразивного зерна до 1 мкм среднеарифметическая шероховатость поверхности образцов составляла примерно 0.2 мкм.

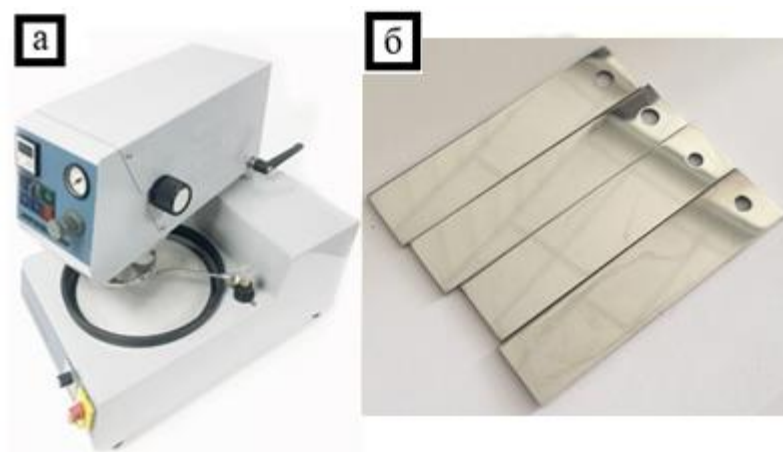


Рисунок 2.11 – Шлифовально-полировальная машина Saphir 320 (а), внешний вид образцов (б)

Для оценки температуры образцов во время экспериментов использовалась термопара хромель-алюмель (ХА). Термопара была выбрана за счёт широкого диапазона измеряемых температур от -200°C до 1300°C , возможности проведения измерений в условиях вакуума и относительно небольшой стоимости [59]. Важная задача при работе с термопарой заключается в необходимости полного исключения взаимодействия термопары с плазменным потоком для достоверного измерения температуры. Решение данной задачи было выполнено при помощи защиты термопары специальной изоляцией из не проводящих тока материалов. В таких условиях, термопара оказывалась защищённой от взаимодействия с плазменным потоком и дополнительно увеличивалась надёжность конструкции, уменьшая риск деформации термопары.

Термопара подводилась через ввод, установленный на коллекторном узле, после чего крепилась с обратной стороны от обрабатываемой поверхности образца.

В соответствии с литературным обзором в параграфе «Высокоинтенсивная имплантация ионов газов», была выбрана оптимальная температура обработки стали пучками ионов азота для глубинного легирования, равная $400-600^{\circ}\text{C}$.

Дальнейшее увеличение температуры приводит к разложению нитридов железа, ответственных за повышение твёрдости стали. Таким образом, перегрев образцов негативно сказывается на механических характеристиках исследуемых образцов.

2.5 Методики исследований ионно-легированных образцов

Исследования микроструктуры и формы кратеров ионного распыления на поверхности образцов после ионной обработки высокоинтенсивными пучками ионов титана проводились с помощью оптического бесконтактного трехмерного профилометра «STIL 3D Micromesure». Внешний вид профилометра представлен на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Профилометр STIL 3D Micromesure

Исследование распределение примеси азота по глубине производилось с помощью растрового электронного микроскопа «Hitachi S-3400 N» с энергодисперсионной приставкой «Bruker XFlash 4010» и сканирующего электронного микроскопа «LEO EVO-50XVP» с энергодисперсионным микроанализатором «INCA-Energy» (Oxford Instruments). Внешний вид комплекса представлен на рисунке 2.13. Для проведения металлографических исследований образцы нарезались на несколько частей и закреплялись в специальном держателе, формируя так называемые поперечные шлифы, которые помещались в исследуемой области микроскопа, рисунок 2.14.



Рисунок 2.13 – Растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N

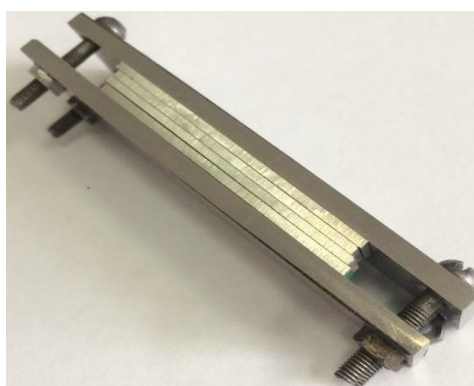


Рисунок 2.14 – Крепёж для образцов

Нарезанные образцы специально закрепляются таким образом, чтобы внешняя часть отставала от крепежа на некоторое расстояние для дальнейшей шлифовки, дабы минимизировать негативный вклад в формирование структуры образца при нарезании. Для более чёткого выявления металлографической структуры шлифы подвергались травлению в смеси азотной, соляной кислот и глицерина.

Концентрационные профили были получены вдоль исследуемых образцов на расстоянии 40 мм с шагом 5 мм.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ ВО ВНУТРЕННИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРОТЯЖЁННЫХ ОТВЕРСТИЙ

3.1 Особенности воздействия высокоинтенсивных пучков ионов в условиях самокомпенсации ионного распыления и при её отсутствии

Экспериментальные исследования по самокомпенсации ионного распыления при облучении пучками ионов азота проводились при плотности ионного тока порядка сотен mA/cm^2 , фиксированной энергии пучка ионов 1.4 кэВ, давлении рабочего газа 0.6 Па и частоте следования импульсов 40 кГц. В данной работе, амплитуды ионного тока на коллекторе были достигнуты 0.9 и 1.2 А. Результаты исследований, представленные в данной главе, были опубликованы в статье [60].

Система формирования пучков ионов устанавливалась в рабочей камере вдоль оси цилиндрического полого катода плазмогенератора на расстоянии 150 мм между выходом плазмогенератора и сеточным электродом.

Для оценки распыления образцов в условии отсутствия её компенсации, был проведён эксперимент, где на шестигранном держателе образцов устанавливалось не шесть образцов, а только два. К первому образцу с обратной стороны была установлена хром-алюмелевая термопара для оценки температуры, а второй образец использовался для дальнейших исследований.

Эксперимент проводился при длительности импульсов 5 мкс и токе разряда 30 А на протяжении 120 минут, что соответствовало температуре поверхности образца 400 °С. Поверхность образца исследовалась до и после проведения эксперимента на профилометре «STIL 3D Micrimeasure». По данным профилометра было установлено образование кратера распыления с максимальной глубиной 90 мкм, рисунок 3.1.

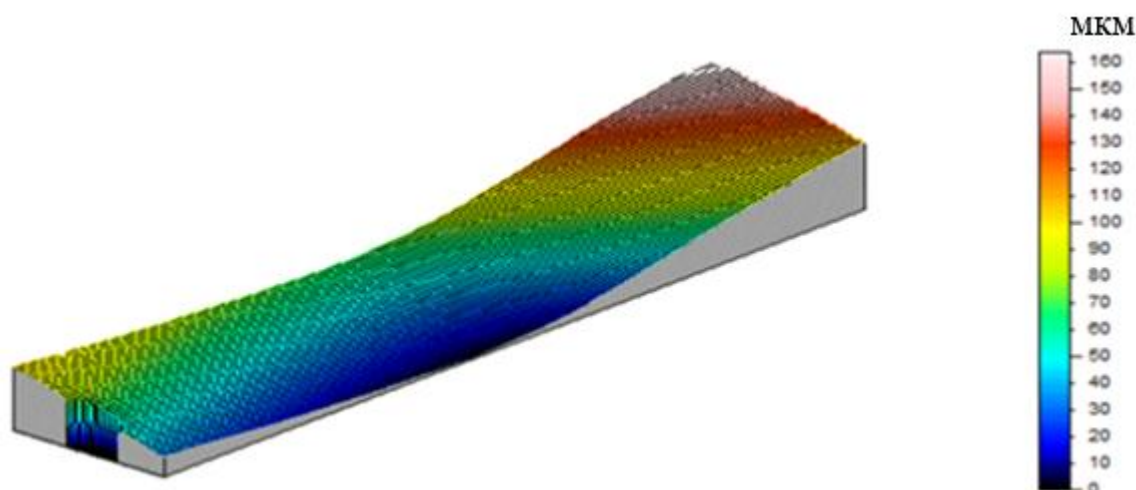


Рисунок 3.1 – Поверхность исследуемого образца после ионного распыления при длительности импульсов 5 мкс, амплитуде потенциалов смещения 1.4 кэВ, токе разряда 30 А, частоте следования импульсов 40 кГц и рабочем давлении 0.6 Па

Полученные данные можно сравнить с результатами ранее проведённых исследований по модификации нержавеющей стали пучком ионов азота при нормальном падении пучка [61]. В приведённой работе было установлено образование кратера менее 5 микрометров, что разительно отличается от нашего случая. Разительное повышение интенсивности ионного распыления при увеличении угла падения ионов связано с увеличением коэффициента ионного распыления, рассмотренного в литературном обзоре в параграфе «ионное распыление поверхности твёрдого тела». Исходя из геометрии расположения образцов относительно фокуса пучка, в данной работе был установлен диапазон возможных углов фокусировки пучка ионов на мишень от 40° до 90° .

Следующей частью работы было исследование компенсации ионного распыления за счёт осаждения материала при использовании всех шести образцов на шестигранном держателе.

В таблице 3.1 приведены основные параметры режимов высокоинтенсивной имплантации пучков ионов азота в условии самокомпенсации ионного распыления.

Таблица 3.1 – Основные режимы ионной имплантации пучков ионов азота при компенсации ионного распыления

№	Параметры импульсов смещения			Амплитуда ионного тока, А	Время обработки, мин	Ток разряда, А	Температура образца, °С
	Продолжительность импульсов смещения, мкс	Амплитуда, кВ	Частота, кГц				
1	5	1.4	40	0.9	120	30	400
2	7.5				80		515
3	10				60		570
4	10			1.2	50	50	615

Для поддержания одной и той же дозы облучения при смене длительности импульса (5, 7.5, 10 мкс), время обработки материала также изменялось пропорционально (120, 80, 60 минут).

Для исследования глубины кратеров ионного распыления на поверхности образца, в условии самокомпенсации распылённого материала были получены профили поверхности образца, соответствующие режимам ионной имплантации 1, 2 и 3, таблица 3.1.

Результаты измерений представлены в виде гистограммы, рисунок 3.2. На приведённой гистограмме видно, что серии экспериментов при одинаковой дозе облучения, но разным длительностям импульса соответствуют максимальные глубины кратера после ионной имплантации от 9 до 14 мкм. Можно отметить увеличение глубины кратера распыления при увеличении длительности импульса. Данная тенденция ранее была описана в работе [65] и была связана с увеличением температуры образца во время ионной имплантации.

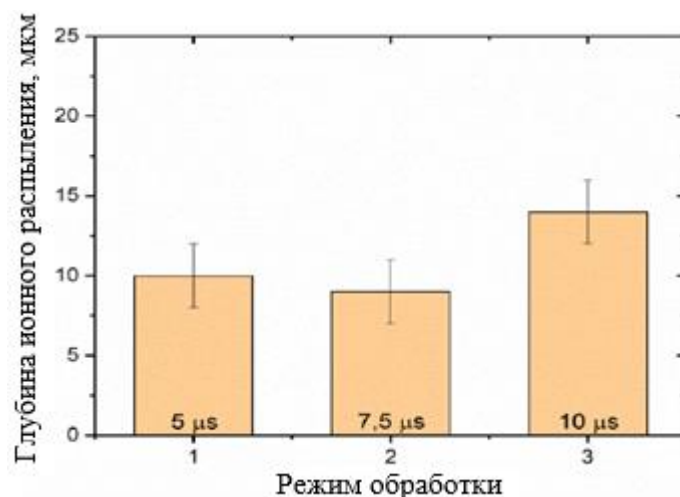


Рисунок 3.2 – Максимальная глубина образования кратера после бомбардировки пучками ионов азота при длительностях импульса 5, 7.5 и 10 мкс, соответствующие режимам обработки 1, 2 и 3, в условии компенсации ионного распыления

Также было проведено исследование глубины образования кратера в условии самокомпенсации ионного распыления при режиме обработки 4. На рисунке 3.3 приведено 3D изображение поверхности образца после ионной бомбардировки.

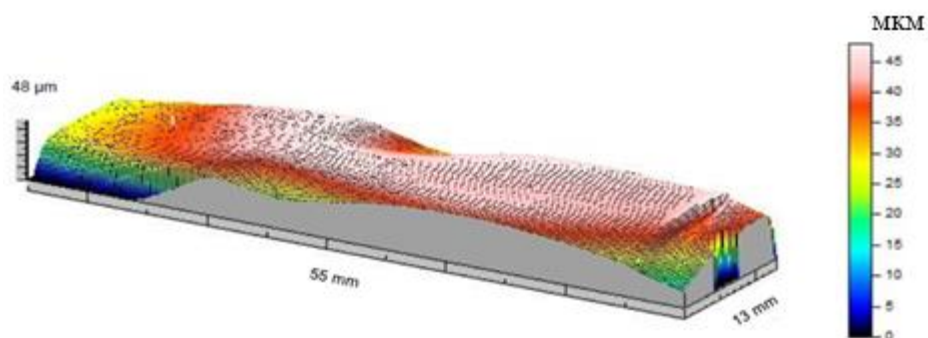


Рисунок 3.3 – Поверхность исследуемого образца после ионного распыления при длительности импульсов 5 мкс, амплитуде потенциалов смещения 1.4 кэВ, токе разряда 50 А, частоте следования импульсов 40 кГц и рабочем давлении 0.6 Па

На приведённом 3D изображении видно, что максимальная глубина ионного распыления не превышала 14 мкм.

Концентрационный профиль залегания примеси азота по глубине образца в условии отсутствия компенсации ионного распыления были получены при помощи растрового электронного микроскопа «Hitachi S-3400 N», рисунок 3.4. Результаты, показанные на рисунке 3.4, демонстрируют толщину слоя залегания примеси 1 мкм.

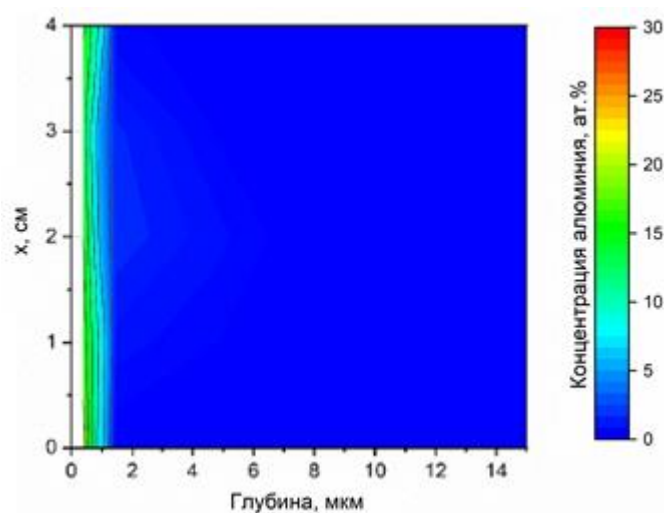


Рисунок 3.4 – Концентрационный профиль залегания примеси азота по глубине образца в условии отсутствия компенсации ионного распыления при длительности импульсов 5 мкс, токе разряда 30 А, длительности обработки 120 минут, температуре поверхности образца 400 °С

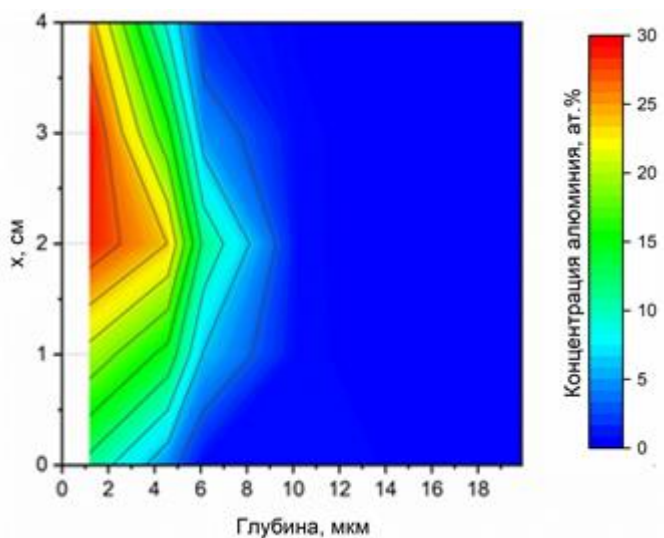


Рисунок 3.5 – Концентрационный профиль распределения азота по глубине в условии самокомпенсации ионного распыления при длительности импульсов 5 мкс, токе разряда 30 А, длительности обработки 120 минут, температуре поверхности образца 400 °С

Результаты, показанные на рисунке 3.5, демонстрируют неоднородную толщину слоя залегания примеси азота с максимальной глубиной 9 мкм. При этом максимальная концентрация азота составила 30 ат.%. Наибольшая толщина слоя залегания примеси наблюдалась на расстоянии два сантиметра от края образца. Данной области соответствует максимальная плотность ионного тока.

Сравнивая результаты экспериментов в условии компенсации ионного распыления и её отсутствия, можно видеть, что в случае использования всех шести образцов на шестигранном держателе глубина образования кратера составляла порядка 9-14 мкм. В то время как глубина кратера распыления, в случае использования лишь двух образцов, составляет порядка 90 мкм, что в десять раз больше. На концентрационных профилях было продемонстрировано, что в случае отсутствия компенсации ионного распыления практически не происходит азотирования в виду ионного распыления поверхности и удаления примеси. Использование всех шести образцов на шестигранном держателе способствует увеличению максимальной глубины залегания примеси в шесть-девять раз.

3.2 Модификация внутренних поверхностей протяжённых отверстий из стали 12X18Н10Т пучком ионов азота

Для исследования глубины легирования примеси азота были получены концентрационные профили распределения примеси азота по глубине, рисунок 3.6 при длительностях импульсов 5, 7.5 и 10 мкс. Экспериментальные исследования по самокомпенсации ионного распыления при облучении пучками ионов азота проводились при плотности ионного тока порядка сотен mA/cm^2 , фиксированной энергии пучка ионов 1.4 кэВ, давлении рабочего газа 0.6 Па и частоте следования импульсов 40 кГц.

В работе [32] было показано, что наилучшая фокусировка пучка ионов происходит не в области геометрического фокуса системы формирования

пучка, а на 2-3 см позади него. Таким образом, было выбрано два режима облучения имитируемой трубы, где фокус пучка располагался у торцевого края трубы, а также смещён на 30 мм вдоль оси системы таким образом, что фокус пучка оказывался внутри обрабатываемого протяжённого отверстия.

По представленным концентрационным профилям видно, что преимущественно, наибольшая глубина легирования примеси для всех случаев наблюдалась на расстоянии 2 см от края образца. Такое распределение примеси азота было связано с выбором фокуса пучка у входа в шестигранную трубу.

Максимальная глубина залегания примеси при длительностях 5, 7.5 и 10 мкс составляла 9 мкм для всех случаев и температуре поверхности 400, 515 и 570 °C соответственно.

Наибольшая концентрация примеси вплоть до 30 ат.% была получена в образцах модифицированных в течение 120 и 80 минут высокоинтенсивными пучками ионов азота с длительностью импульсов 5 и 7.5 мкс, соответственно (рисунок 3.6а и 3.6б). В случае обработки в течении 60 минут с длительностью импульсов 10 мкс, максимальная концентрация составляла 22 ат.%.

Примечательно, что при обработке в течении 60 минут и длительности импульсов 10 мкс, наблюдалось более равномерное распределение примеси, что соответствовало гомогенной обработке стали (рисунок 3.6с). Таким образом, можно отметить, что данному режиму, несмотря на меньшую концентрацию примеси азота, соответствует более равномерное распределение примеси. Данному режиму соответствовало наименьшее время модификации образцов (60 минут) из всех предложенных режимов обработки в данной серии экспериментов.

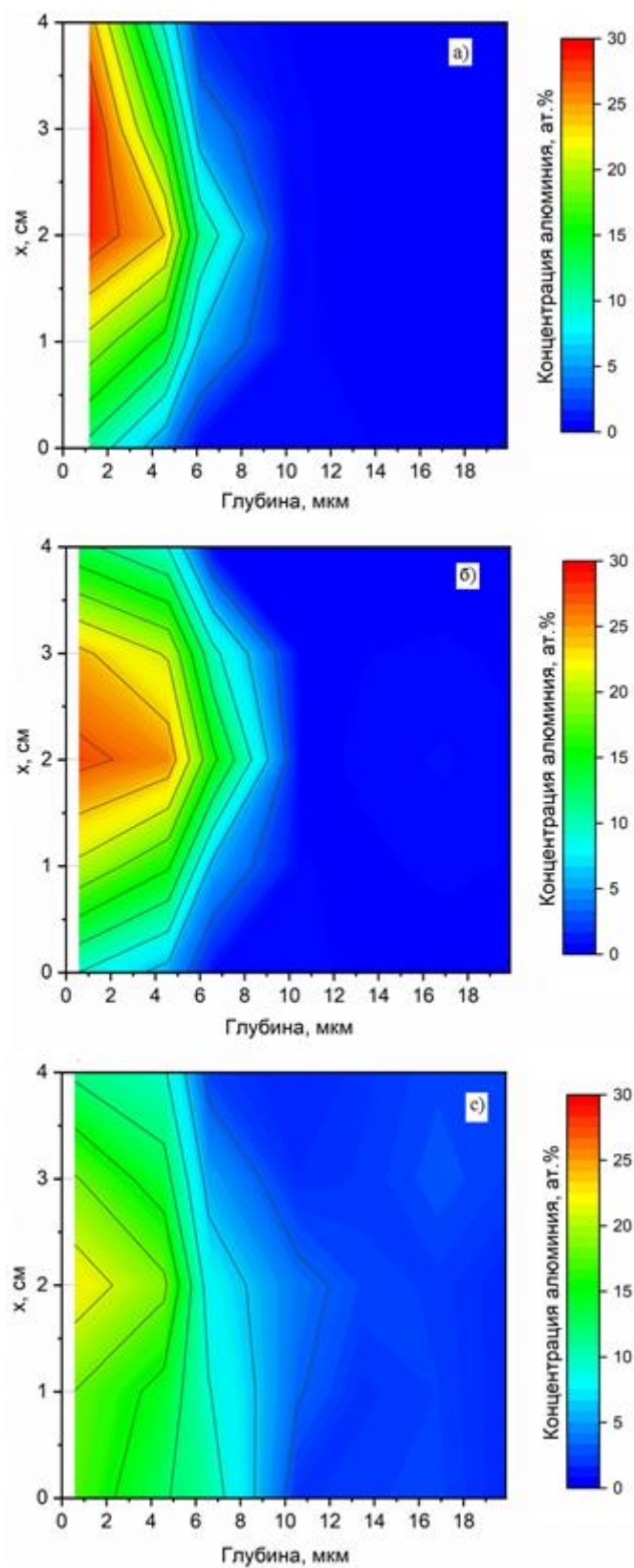


Рисунок 3.6 – Концентрационные профили распределения азота по глубине в
условии самокомпенсации ионного распыления, токе разряда 30 А,
длительностях импульса и температуре образцов: а) – 5 мкс, 400 °C;
б) – 7.5 мкс, 515 °C; в) – 10 мкс, 570 °C

С целью увеличения плотности плазмы, ток разряда был увеличен до 50 А, что приводит к увеличению плотности генерируемой плазмы. Это способствует увеличению количества фокусируемых ионов на коллекторный узел. Увеличение числа ионов на коллекторном узле соответствует большей дозе облучения за тот же промежуток времени. Большие дозы способствуют увеличению диффузии за счёт градиента концентрации примеси. При этом коллектор с шестигранной трубой был смещён вдоль оси системы формирования пучка относительно фокуса на 3 см, таким образом, что фокус пучка ионов сместился внутрь обрабатываемой трубы. При данном режиме обработки была получена температура поверхности образца 615 °С.

На рисунке 3.7 представлен концентрационный профиль распределения азота в образце по глубине при токе разряда 30 А (а) и 50 А (б), при длительности импульса 10 мкс.

Смещение коллектора привело к смещению максимума глубины распределения примеси азота на 10 мм глубже вдоль имитируемой трубы. Глубина залегания примеси увеличилась до 12 мкм после увеличения тока разряда до 50 А.

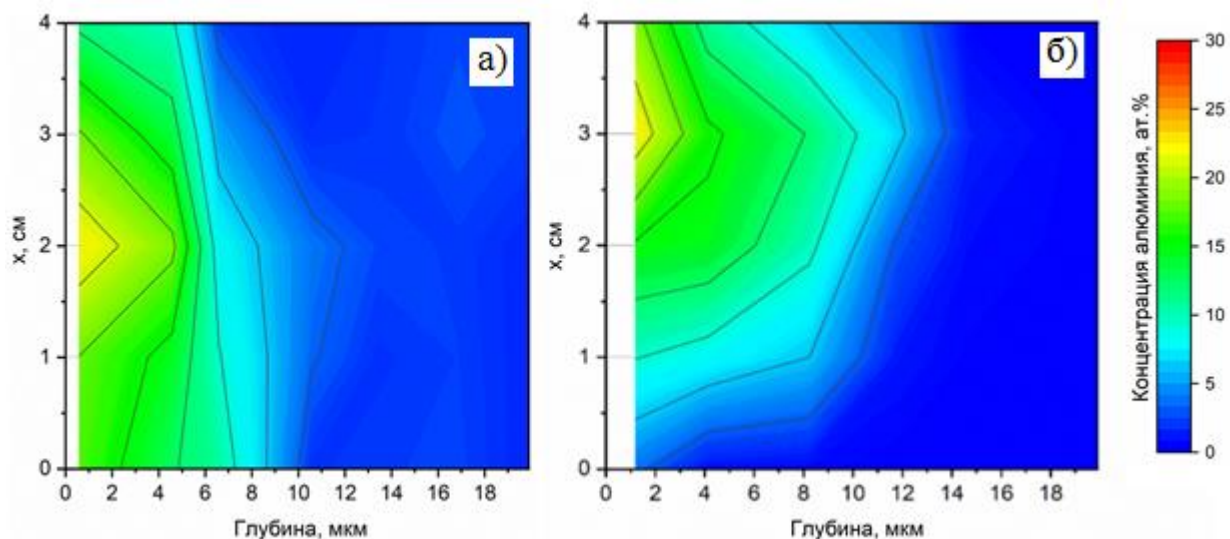


Рисунок 3.7 - Концентрационный профиль азота по глубине при токе разряда 30 А (а) и 50 А (б), при длительности импульсов 10 мкс,

Таким образом, можно предложить подход обработки всей длины имитируемой трубы при условии передвижения коллектора вдоль оси системы формирования пучка, что приведёт к модификации более протяжённых отверстий.

Ионно-плазменная обработка поверхности образца приводит к образованию модифицированных слоёв. Для наглядного представления полученных модифицированных слоёв были получены SEM-изображения при длительности импульсов 10 мкс, токе разряда 30 и 50 А. На рисунке 3.8 представлены SEM-изображения шлифа образца после травления в случае тока разряда 30 А на расстоянии 3, 2 и 1 см от края образца. На представленных изображениях виден ионно-модифицированный слой с наибольшей толщиной в области 1 см от края образца, что соответствует данным, приведённым на рисунке 3.7.

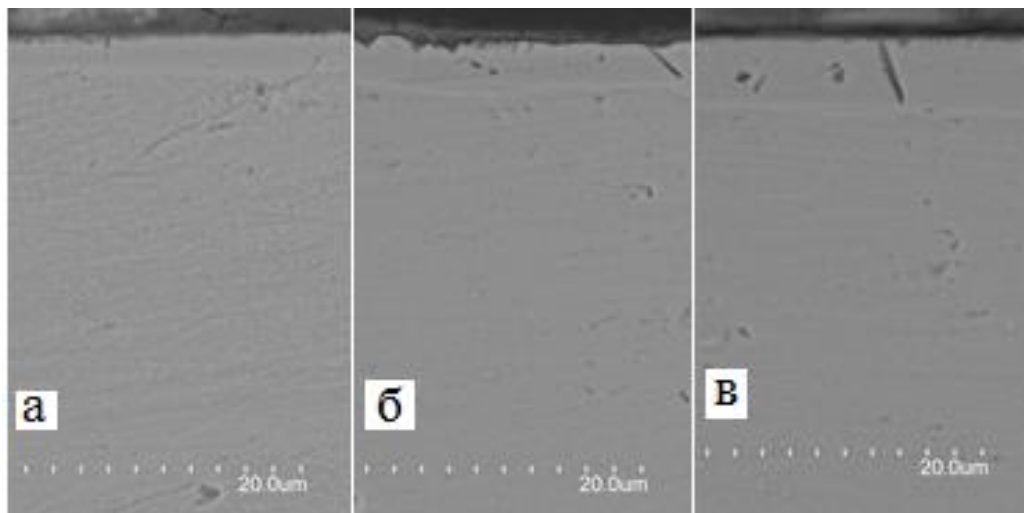


Рисунок 3.8 – SEM-изображение шлифа образца после травления в случае тока разряда 30 А, длительности импульсов 10 мкс на расстоянии от края образца: а) 3 см, б) 2 см и в) 1 см

На рисунке 3.9 представлены SEM-изображения шлифа образца после травления в случае тока разряда 50 А на расстоянии 3, 2 и 1 см от края образца. На представленном изображении также видно образование модифицированного слоя после ионной имплантации. Максимальная

толщина образованного слоя соответствует области 3 см от края образца, что соответствует данным, представленным на рисунке 3.7.

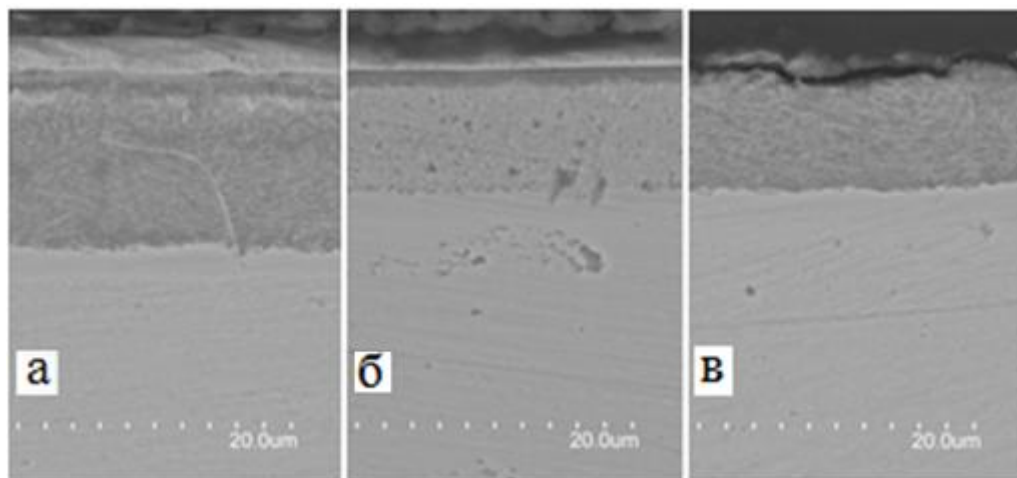


Рисунок 3.9 – SEM-изображение шлифа образца после травления в случае тока разряда 50 А, длительности импульсов 10 мкс на расстоянии от края образца: а) 3 см, б) 2 см и с) 1 см

Интересным было проверить возможность одновременной модификации внутренней и торцевой поверхности образцов за счёт частичного падения пучка ионов на торцевую поверхность. На рисунке 3.10 представлено SEM-изображение шлифа образца после травления в случае тока разряда 50 А с краю образца. На представленном изображении виден край образца, переходящий в торец. Можно отметить наличие модифицированного слоя вдоль всей поверхности образца, причём толщина торцевого модифицированного слоя больше внутренней поверхности имитируемой трубы и составляет порядка 16 мкм.

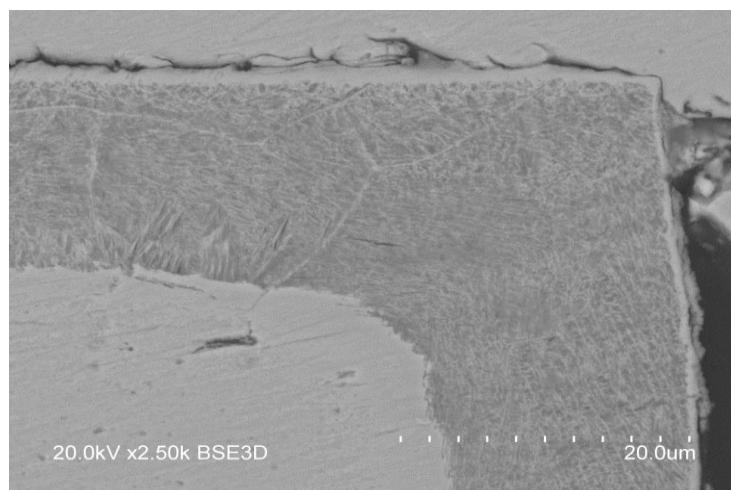


Рисунок 3.10 - SEM-изображение шлифа образца после травления в случае тока разряда 50 А, длительности импульсов 10 мкс с краю образца

На рисунке 3.11 представлены результаты картирования модифицированного слоя, полученного при токе разряда 50 А, на расстоянии 3 см от края образца. Полученные результаты позволили увидеть распределение примеси азота вдоль всего модифицированного слоя, толщиной 12 мкм. Полученные результаты коррелируются с данными, представленными на рисунке 3.9.

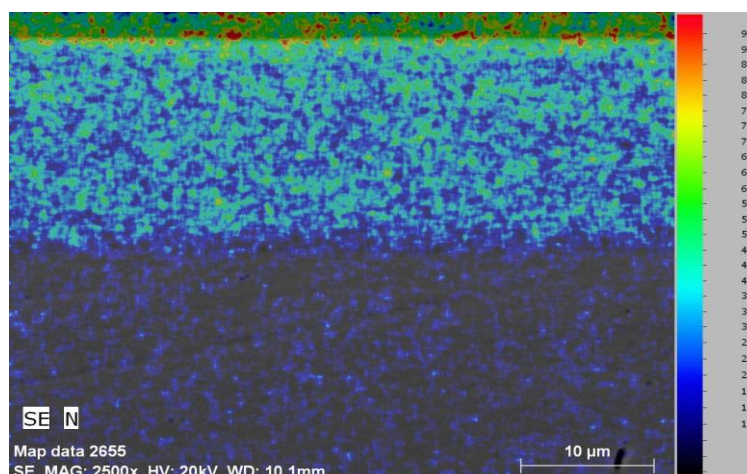


Рисунок 3.11 – Микроструктура модифицированного слоя в случае тока разряда 50 А

3.3 Модификация внутренних поверхностей протяжённых отверстий из титана пучком ионов алюминия

Для исследований особенностей и закономерностей высокоинтенсивной имплантации ионов металлов во внутреннюю поверхность протяжённых отверстий в условии самокомпенсации ионного распыления и его отсутствия были использованы две конструкции модификации держателя образцов, рисунок 3.12.

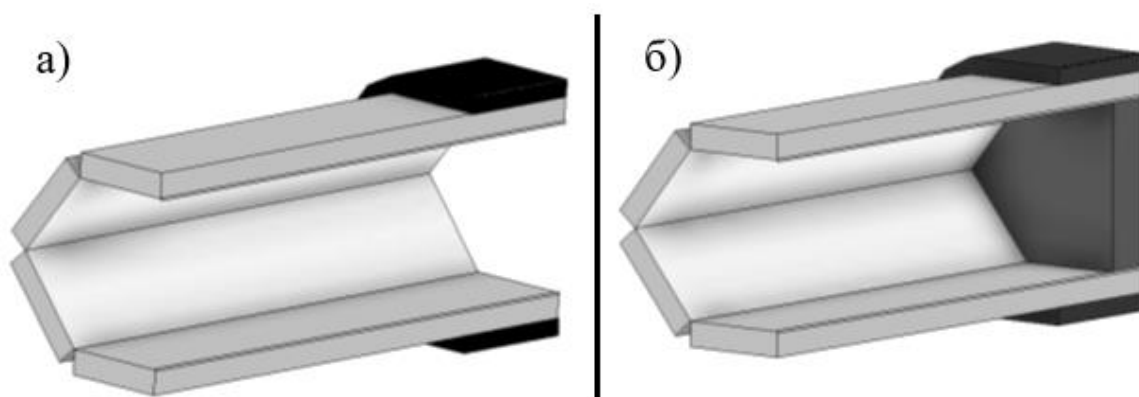


Рисунок 3.12 – Модификация держателя образцов: а) без дна;
б) с наличием дна

Данная модификация держателя позволила моделировать обработку как сквозного отверстия длиной 55 мм без влияния распыления дна держателя, так и обработку «стакана» глубиной 45 мм. Расстояние между противоположными пластинами, закреплёнными в держателе составляло 20 мм. Во всех экспериментах, шестигранный цилиндр устанавливался таким образом, что фокус пучка находился у входа в цилиндр, то есть на расстоянии 130 мм от сеточного электрода. Эксперименты проводились при амплитуде потенциалов смещения 1.4 кВ, частоте следования импульсов потенциалов смещения 40 кГц, токе разряда 130 А и длительности импульсов 10 мкс. Стационарная температура образцов в процессе ионной обработки составляла 810 °С. Полное время обработки во всех экспериментах составляло 60 минут.

В качестве образцов использовались пластины из титана марки ВТ1-0 с размерами $55 \times 13 \times 2.5$ мм³. В качестве легирующего материала использовался алюминий. Модификация титановой подложки пучками ионов алюминия была выбрана в качестве продолжения работы [45], рассмотренной в литературном обзоре в параграфе «высокоинтенсивная имплантация ионов металлов».

На первом этапе исследовалось влияние высокоинтенсивной имплантации ионов алюминия для обработки внутренней поверхности сквозного отверстия в условии значительного ионного распыления поверхности образцов без его компенсации, рисунок 3.9б. Для проведения эксперимента на шестигранном держателе использовалось всего два образца из шести. В данном варианте компенсация ионного распыления за счёт осаждения продуктов распыления с других элементов и дна держателя пластин исключалась. На рисунке 3.13 представлены концентрационные профили распределения алюминия по глубине титанового образца в случае отсутствия компенсации ионного распыления. На представленном рисунке практически не наблюдается легированного слоя, что связано с существенным ионным распылением поверхности. Представленные здесь результаты коррелируются с результатами, полученными при обработке материалов пучками ионов газов, показанными на рисунке 3.4. При данной обработке соблюдалась та же ориентация образцов, что и в случае обработки пучками газов, соблюдались те же углы падения ионов. Небольшим отличием обработки пучками ионов газов от металлов является наличие тонкого легированного слоя с толщиной порядка одного микрометра. Это связано с меньшими размерами ионов азота в сравнении с ионами алюминия, что способствует большим глубинам легирования примеси и меньшим коэффициентом распыления, рисунок 1.14. Другим фактором может служить возможность диффузии атомов азота из остаточной атмосферы после проведения эксперимента.

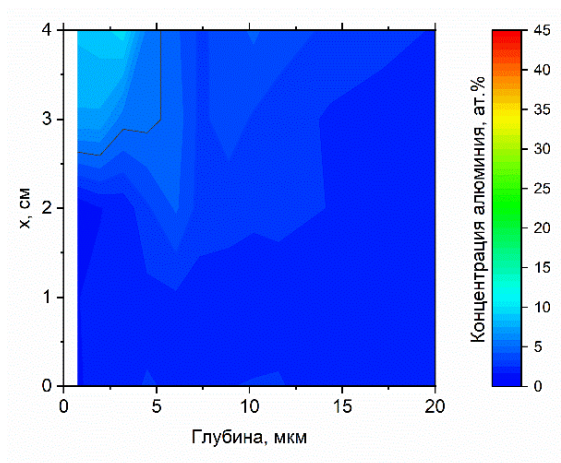


Рисунок 3.13 – Концентрационные профили распределения примеси алюминия по глубине титанового образца в случае отсутствия компенсации ионного распыления при, токе разряда 130 А, длительности импульсов 10 мкс и температуре 810 °С

Следующим этапом выполнено исследование высокоинтенсивной имплантации внутренней поверхности сквозного отверстия ионами алюминия в условии компенсации ионного распыления. На рисунке 3.14 представлены концентрационные профили распределения алюминия по глубине титанового образца, представляющего внутреннюю поверхность сквозного отверстия.

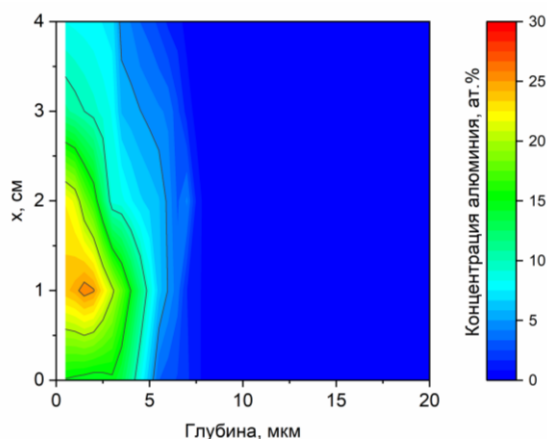


Рисунок 3.14 – Концентрационные профили распределения примеси алюминия по глубине титанового образца в случае самокомпенсации ионного распыления при токе разряда 130 А, длительности импульсов 10 мкс и температуре 810 °С

В случае обработки поверхности полного сквозного отверстия наблюдалось формирование имплантированного слоя по всей длине отверстия с максимальной глубиной залегания примеси примерно 7.5 мкм и концентрацией свыше 20 ат.%. Можно отметить неравномерное распределение примеси по длине отверстия. Так, уже на расстоянии 25 мм от входа в отверстие наблюдалось резительное падение концентрации алюминия с более 20 ат.% до не более 10 ат.% равно как и уменьшение глубины залегания примеси.

Полученные результаты проникновения примеси алюминия во внутренние поверхности обрабатываемого отверстия существенно отличаются от результатов обработки в отсутствие компенсации ионного распыления за счёт осаждения распылённого материала. Из данных на рисунке 3.13 видно, что в случае обработки двух пластин наблюдалось отсутствие формирования легированного слоя. В данном случае концентрация алюминия не превышала 5 ат.%.

Помимо обработки сквозных отверстий были проведены исследования по модификации внутренних поверхностей стакана в случае компенсации ионного распыления за счёт осаждения распылённого материала. Была выполнена модификация модельных образцов титана при аналогичных условиях обработки с использованием шестигранного стакана с такой же геометрией, как и у сквозной трубы, но с установленным дном из титановой пластины толщиной 2,5 мм. На рисунке 3.15 представлены концентрационные профили распределения алюминия по глубине титанового образца, представляющего внутреннюю поверхность стакана.

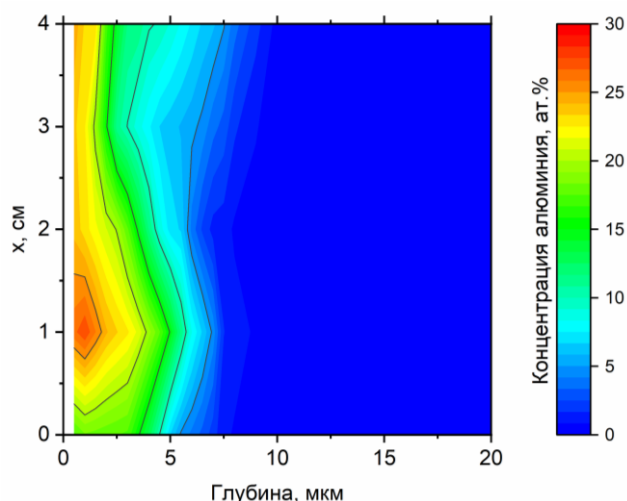


Рисунок 3.15 - Концентрационные профили распределения примеси алюминия по глубине титанового образца, представляющего внутреннюю поверхность стакана при токе разряда 130 А, длительности импульсов 10 мкс и температуре 810 °С

На рисунке 3.15 видно, что максимальная глубина проникновения алюминия в матрицу титана достигает примерно 7,5 мкм на расстоянии примерно 10 мм от входа отверстия. В качестве отличия можно отметить то, что при приближении к дну стакана не наблюдается существенного снижения максимальной концентрации и глубины ее проникновения. Напротив, на глубине 40 мм от входа, то есть вблизи дна стакана, результаты воздействия демонстрируют хоть и незначительное, но увеличение толщины ионно-легированного слоя по сравнению с аналогичными данными, полученными при модификации сквозного отверстия. Это увеличение толщины может быть связано с осаждением распылённого материала не только с противоположных стенок отверстия, но и с дна стакана. Сравнивая данные с результатом, полученным при обработке сквозного отверстия такой же конфигурации, сразу можно отметить, что максимальная концентрация алюминия, а также положение максимума глубины проникновения примеси совпадают в обоих вариантах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые показана возможность имплантации ионов азота и алюминия с помощью сфокусированных высокоинтенсивных пучков низкой энергии в условиях компенсации ионного распыления облучаемой поверхности за счёт осаждения распылённого материала в случае обработки внутренней поверхности протяжённых отверстий.

Экспериментально показано, что взаимное осаждение распыленного материала на противоположные стороны элементов поверхности отверстий приводит к существенной компенсации ионного распыления и увеличению толщины ионно-модифицированного слоя.

В случае импульсно-периодической имплантации ионов азота энергией 1.4 кэВ и частотой 40 кГц, длительностью импульса 10 мкс при температуре мишени 570 °С в течение 60 мин были получены ионно-легированные слои в стали 12Х18Н10Т с максимальной толщиной 9 мкм и достаточно однородным распределением примеси по длине отверстия 40 мм, диаметром 20 мм.

Высокоинтенсивная имплантация ионов алюминия со средней энергией 2.2 кэВ при температуре мишени 810 °С в течение 60 мин во внутреннюю поверхность протяжённого отверстия в титане ВТ1-0 позволила сформировать ионно-легированный слой по всей длине отверстия с максимальной глубиной залегания примеси примерно 7.5 мкм и концентрацией свыше 20 ат. %.

Показана возможность однородного ионного легирования внутренней поверхности отверстия как за счет подбора оптимального режима облучения, так и благодаря динамическому перемещению облучаемой детали относительно фокуса ионного пучка.

ГЛАВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ. РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-технического исследования, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- организовать работы по научному исследованию;
- осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- оценить коммерческий потенциал и перспективность проведения научного исследования;
- рассчитать бюджет проводимого научно-технического исследования;
- произвести оценку социальной и экономической эффективности исследования.

Научно-исследовательская работа посвящена модификации поверхности образцов из стали 12X18H10T и титана пучком ионов азота и алюминия соответственно. 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.

4.1 Предпроектный анализ

Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

В данном проекте сегментами рынка являются:

- Департамент архитектуры и строительства Томской области;
- Металлургические компании;
- Компании, нацеленные на производство бритв, ножниц и т.д.
- Научно-исследовательские организации, университеты.

Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

В данном научном исследовании анализируется возможность самокомпенсации ионного распыления при обработке металлических материалов и модификация поверхностных слоёв образцов в условиях моделирования трубы и протяжённых отверстий.

В таблице 4.1 приведена оценка конкурентов, где Ф – разрабатываемый проект, к1 – исследование, проведенное инженером-экологом в научно-исследовательском институте, к2 – исследование, проведенное организацией, ионной имплантацией и модификацией материалов.

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение механических свойств материалов	0,14	5	3	4	0,7	0,42	0,56
2. Скорость получения модифицированного слоя	0,18	4	4	4	0,72	0,72	0,72
3. Необходимость контроля выполняемых процессов оператором установки	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
4. Возможность дальнейшей модификации	0,15	4	4	4	0,6	0,6	0,6
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,12	5	4	4	0,6	0,48	0,48
2. Цена	0,14	5	3	2	0,7	0,42	0,28
3. Время	0,12	4	5	3	0,48	0,6	0,36
Итого	1	32	27	24	4,55	3,84	3,45

Критерии оценки подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Вес показателей в сумме должны составлять 1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i$$

где: К – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

По приведённым данным анализа конкурентов можно видеть, что конкурентоспособность разработки составила 4.55, в то время как у аналогов соответствующие величины 3.84 и 3.45, что говорит конкурентоспособности

научно-технической разработки по таким показателям как: повышение механических свойств материалов; скорость получения модифицированного слоя; необходимость контроля выполняемых процессов оператором установки и возможностью дальнейшей модификации. Однако уязвимость разрабатываемого проекта в том, что требуется больше времени на его выполнение.

SWOT-анализ

SWOT – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта (таблица 4.2). Применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Анализ проводится в 3 этапа.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны C1. Низкая цена обработки материалов C2. Впервые в мире показана возможность модификации труб и протяжённых отверстий за счёт самокомпенсации ионного распыления C3. Достаточно высокая точность результатов C4. Широкий спектр модификаций материалов за счёт комбинационного облучения мишени разным типом элементов C5. Быстрота обработки материала, порядка одного часа	Слабые стороны Сл1. Низкая ремонтпригодность оборудования Сл2. Высокая стоимость технологичного оборудования Сл3. Необходимость создания высокого вакуума при модификации материалов при помощи вакуумно-дугового источника плазмы
Возможности B1. Расширение участия в государственных проектах поддержки по модернизации объектов промышленности в рамках РНФ B2. Привлечение средств частных компаний, связанных с созданием или эксплуатацией промышленных материалов	Угрозы У1. Рост стоимости и блокировка каналов импортных комплектующих У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды.

Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 4.3. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

	Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1.	C2.	C3.	C4.	C5.
	B1.	+	+	+	+	0
	B2.	+	+	+	0	+
	Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1.		Сл2.		Сл3.
	B1.	-		-		+
	B2.	0		-		+
	Сильные стороны проекта					
Угрозы		C1.	C2.	C3.	C4.	C5.
	У1.	+	+	+	-	0
	У2.	-	-	-	-	-
	Слабые стороны проекта					
Угрозы		Сл1.		Сл2.		Сл3.
	У1.	-		-		-
	У2.	+		0		+

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

Таблица 4.4 –SWOT-анализ

	Сильные стороны C1. Низкая цена обработки материалов C2. Впервые в мире показана возможность модификации труб и протяжённых отверстий за счёт самокомпенсации ионного распыления C3. Достаточно высокая точность результатов C4. Широкий спектр модификаций материалов за счёт комбинационного облучения мишени разным типом элементов C5. Быстрота обработки материала, порядка одного часа	Слабые стороны Сл1. Низкая ремонтпригодность оборудования Сл2. Высокая стоимость технологичного оборудования Сл3. Необходимость создания высокого вакуума при модификации материалов при помощи вакуумно-дугового источника плазмы
--	---	---

Продолжение таблицы 4.4

Возможности B1. Расширение участия в государственных проектах поддержки по модернизации объектов промышленности в рамках РНФ B2. Привлечение средств частных компаний, связанных с созданием или эксплуатацией промышленных материалов	Публикация научных статей с результатами исследований в журналах первого и второго квартала; Участие в научных конкурсах для привлечения внимания к выполненным исследованиям; Выступление перед менеджерами частных компаний и организаций с демонстрацией возможностей ионной модификации.	Риск блокировки научных исследований в зарубежных научных журналах в следствии политических и других причин.
Угрозы У1. Рост стоимости и блокировка каналов импортных комплектующих У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	Повышение стоимости импортного оборудования способствует повышению спроса на отечественное оборудование; Возможность создания дополнительных экономических отношений со странами союзниками	Ввиду роста стоимости и блокировки импортных комплектующих может потребоваться значительное время ожидания появления на рынке отечественного оборудования;

Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого заполнена специальную форму, содержащая показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта (таблица 4.5).

При проведении анализа по таблице, по каждому показателю ставится оценка по пятибалльной шкале. При оценке степени проработанности научного проекта 1 балл означает не проработанность проекта, 2 балла – слабую проработанность, 3 балла – выполнено, но в качестве не уверен, 4 балла – выполнено качественно, 5 баллов – имеется положительное заключение независимого эксперта. Для оценки уровня имеющихся знаний у разработчика система баллов принимает следующий вид: 1 означает не знаком или мало знаком, 2 – в объеме теоретических знаний, 3 – знаю теорию

и практические примеры применения, 4 – знаю теорию и самостоятельно выполняю, 5 – знаю теорию, выполняю и могу консультировать.

Таблица 4.5 – Оценка степени готовности проекта к коммерциализации

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

Продолжение таблицы 4.5

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	5	5
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	5	5
	ИТОГО БАЛЛОВ	61	59

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации (или уровень имеющихся знаний у разработчика) определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i$$

где: $B_{\text{сум}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению; B_i – балл по i -му показателю.

Значение $B_{\text{сум}}$ позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. В итоге получилось, что разработка является перспективной, а уровень имеющихся знаний у разработчика выше среднего.

По результатам оценки выделяются слабые стороны исследования, дальнейшего улучшения необходимо провести маркетинговые исследования рынков сбыта, разработать бизнес-план коммерциализации научной разработки и проработать вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок.

Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Для коммерциализации результатов, проведенного исследования будут использоваться следующие методы: инжиниринг и передача интеллектуальной собственности.

Инжиниринг будет предполагать предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг, связанных с проектированием, строительством и вводом

объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика.

Передача интеллектуальной собственности будет производиться в уставной капитал предприятия или государства.

Данные методы коммерциализации будут наиболее продуктивными в отношении данного проекта.

4.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИ ТПУ	Выпуск высококвалифицированных специалистов
Металлургические компании	Получение методики модификации свойств материалов, таких как: твёрдость, износостойкость, стойкость к окислению и т.д.

В таблице 4.7 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 4.7 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Исследование ионной модификации свойств материалов с самокомпенсацией ионного распыления в условиях моделирования трубы и протяжённых отверстий
Ожидаемые результаты проекта:	Уменьшение ионного распыления и получение ионно-легированных слоёв при модификации пучками ионов азота и алюминия в сталь 12X18H10T и титан соответственно
Критерии приемки результата проекта:	Исследование поверхности при помощи профилометра “STIL 3D Micromesure” и ионно-легированных слоёв при помощи растрового электронного микроскопа “Hitachi S-3400 N”
Требования к результату проекта:	Требование:
	Нарезка и шлифовка образцов при помощи наждачной бумаги с размерами зёрен не более 3.5 мкм
	Проектирование и сборка коллекторного узла и шестигранного коллектора, выполняющего роль держателя образцов
	Многократное уменьшение глубины кратера распыления после ионной имплантации
	Получение толщины ионно-легированного слоя не менее единиц микрометров

В таблице 4.8 представлена организационная структура проекта (роль каждого участника, их функции, трудозатраты).

Таблица 4.8 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1.	Сивин Д.О., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.	Руководитель проекта	Консультирование, координация деятельности, определение задач, контроль выполнения, помощь проведения экспериментов.	1530
2.	Вахрушев Д.О., магистрант ИЯТШ	Исполнитель по проекту	Анализ литературных источников, подготовка образцов, проведение экспериментов, анализ экспериментальных данных, написание работы	3030
ИТОГО:				4560

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованы в рамках данного проекта (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	4668180
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	01.09.2020-31.05.2022
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	15.09.2020
3.2.2. Дата завершения проекта	31.05.2022

4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

План управления научным проектом должен включать в себя следующие элементы:

- иерархическая структура работ проекта;
- контрольные события проекта;
- план проекта;
- бюджет научного исследования.

Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Иерархическая структура работ

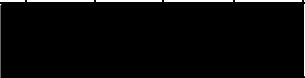
План проект

В рамках планирования научного проекта построены календарный график проекта (таблица 4.10, 4.11).

Таблица 4.10– Календарный план проекта

Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
Утверждение темы магистерской диссертации	7	01.09.20	07.09.20	Сивин Д.О., Вахрушев Д.О.
Согласование плана работ	7	08.09.20	15.09.20	Сивин Д.О., Вахрушев Д.О.
Литературный обзор	138	16.09.20	31.01.21	Вахрушев Д.О.
Проведение экспериментов, обработка и обсуждение результатов	292	01.02.21	20.12.21	Сивин Д.О., Вахрушев Д.О.
Написание отчета	162	21.12.21	31.05.22	Вахрушев Д.О.
Итого:	606			

Таблица 4.11 – Календарный план график проведения НИОКР по теме

Наименование этапа	Т, дней	2020				2021												2022				
		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
Утверждение темы магистерской диссертации	7																					
Согласование плана работ	7																					
Литературный обзор	138																					
Проведение экспериментов, обработка и обсуждение результатов	292																					
Написание отчета	162																					



- Вахрушев Д.О.



- Вахрушев Д.О., Сивин Д.О.

4.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты сгруппированы по статьям. В данном исследовании выделены следующие статьи:

1. Сырье, материалы;
2. Специальное оборудование для научных работ;
3. Заработная плата;
4. Отчисления на социальные нужды;
5. Научные и производственные командировки;
6. Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями;
7. Накладные расходы.

Сырье и материалы. Расчёт материальных затрат включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Расчет затрат по статье «Сырье и материалы»

Наименование	Единицы измерения	Количество	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
Сталь 12Х18Н10Т	м	1	5000	5000
Лист титана	м	1	10000	10000
Азотный баллон	шт	1	5650	5650
Нарезной диск из карбина кремния	шт	2	1650	3300
Халат	шт	1	1000	1000
Бумага наждачная, зернистость 800	шт	4	30	120
Бумага наждачная, зернистость 1500	шт	4	52	208
Бумага наждачная, зернистость 2000	шт	4	115	460
Бумага наждачная, зернистость 4000	шт	4	170	680

Продолжение таблицы 4.12

Энергия	Наименование	Время работы оборудования, час	Потребляемая мощность, кВт	Цена за 1 кВт·ч	Сумма, руб
	ПК	1175	3	3.85	13571.25
	НТО	485	7		13070.75
Всего		53060			
Транспортно-заготовительные расходы (3%)					1591.8
Итого по статье					54651.8

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ. В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по теме НИР (таблица 4.13). Такое оборудование как: нарезной станок “Brilliant 201”, шлифовально-полировочная машина “Saphir 320”, и другие были заранее закуплены и использованы в лаборатории НЛ ВИИ ТПУ.

Таблица 4.13 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Компьютер (HP)	1	100000,0	100000,0
2	Программное обеспечение MicrosoftOffice	1	5990,0	5990,0
3	Осциллограф LeCroy Waverunner 6050A	1	239575.0	239575.0
4	Растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N	1	4139844.7	4139844.7
Итого, руб.:				4485409.7

Расчет основной заработной платы. В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. Расчет основной заработной платы сводится в таблице 4.14.

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}$$

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

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника; $T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}$$

где: $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Расчет заработной платы научно – производственного и прочего персонала проекта проводили с учетом работы 2-х человек – научного руководителя и исполнителя. Баланс рабочего времени исполнителей представлен в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	99	99
- выходные дни	14	14
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	24	24
- отпуск	14	14
- невыходы по болезни		

Продолжение таблицы 4.14

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистрант
Действительный годовой фонд рабочего времени	212	212

Месячный должностной оклад работника:

$$З_м = З_б * (k_{пр} + k_д) * k_p, \text{ где}$$

где $З_б$ – базовый оклад, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент (определяется Положением об оплате труда); $k_д$ – коэффициент доплат и надбавок; k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$З_б$, руб.	$k_{пр}$	$k_д$	k_p	$З_м$, руб.	$З_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$З_{осн}$, руб.
Руководитель	26116	1	0,02	1,3	34629.82	1829.50	212	387854
Магистрант	5786	-	-	1,3	7523	397.44	212	84257

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала. В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

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

$$З_{доп} = З_{осн} * k_{доп}, \text{ где}$$

где $З_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.; $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты; $З_{осн}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 4.16 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.16 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Магистрант
Основная зарплата	387854	84257
Дополнительная зарплата	58178.1	12638.6
Итого по статье С _{зп}	446032.1	96895.6

Отчисления на социальные нужды. Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \text{ где}$$

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

На 2022 г. в соответствии с Федеральным законом №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%.

Отчисления на социальные нужды со стороны руководителя составляют:

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 446032,1 = 133809,63 \text{ рублей}$$

Отчисления на социальные нужды со стороны магистранта составляют:

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 96895,6 = 29068,67 \text{ рублей}$$

Тогда общие отчисления составят 162878.3 рублей

Научные и производственные командировки. В эту статью включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы.

Затраты на научные и производственные командировки составляют 54292.77 руб.

Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями. Контрагентные расходы в данной работе отсутствовали

Накладные расходы. Расчет накладных расходов провели по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{рук}} + Z_{\text{маг}}) = 0,8 \cdot (446032 + 96896) = 523548,3$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов принят 0,8.

Общие затраты проекта приведены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Затраты научно-исследовательской работы

Вид исследования	Затраты по статьям									
	Сырье, материалы (за вычетом возвратных отходов), покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Доп-ая заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Научные и производственные командировки	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями	Прочие прямые расходы	Накладные расходы	Итого плановая себестоимость
Данное исследование	54651.8	4485409.7	472111	70816.7	162878.3	54292.8	-	-	523548.3	5823708.6
Аналог	124516	10000000	5271101	790665.2	1818529.8	-	-	-	4849412.8	22854225

4.5. Операционные затраты

Операционные затраты будут вычислены по следующей формуле:

Опер.затр.=сырьё+амортизация+ЗП(осн+доп)+соц.отч.+науч.ком.+конт.
.расх.+накл.расх.=54651+700000+472111+70817+162878+54293+523548 =
2038298 руб., что составляет 35% от себестоимости проекта

Амортизация научного оборудования вычислялась по следующему принципу.

Срок полезного использования оборудования составлял 10 лет, поэтому норма амортизации составляет:

$$H_a = \frac{100\%}{10} = 10\%$$

где H_a – норма амортизации в процентах.

Первоначальная стоимость оборудования составляла 7 000 000 рублей.

Из этого следует, что годовая сумма амортизации составляет:

$$C_{\text{перв.}} = \frac{C_{\text{об}} \cdot H_a}{100} = \frac{7000000 \cdot 10}{100} = 700000 \text{ руб}$$

Организационная структура проекта

Данный проект представлен в виде проектной организационной структуры. Проектная организационная структура проекта представлена на рисунке 4.2.

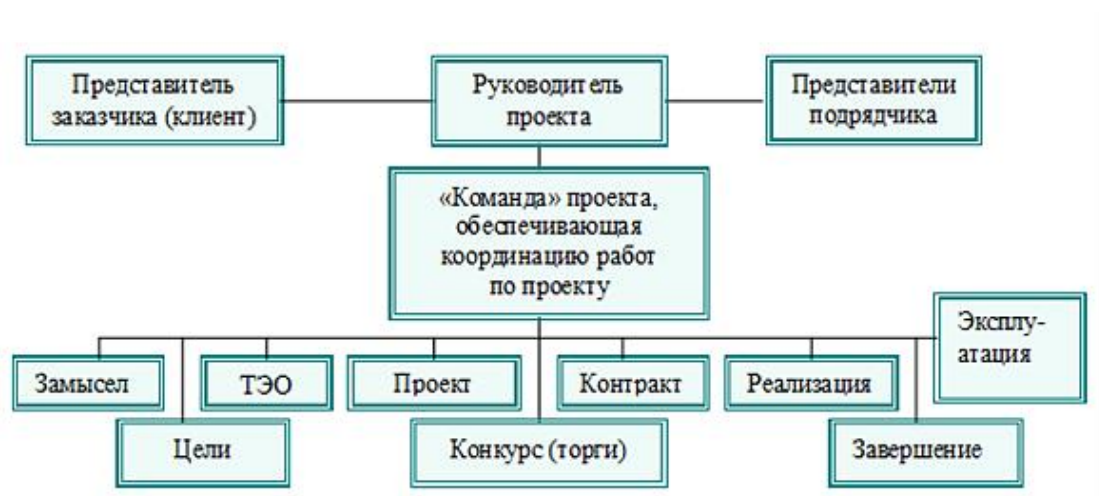


Рисунок 4.2 – Проектная структура проекта

План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта (таблица 4.18).

Таблица 4.18 – План управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1.	Статус проекта	Исполнитель	Руководителю	Еженедельно (понедельник)
2.	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Исполнитель	Руководителю	Ежемесячно (конец месяца)
3.	Документы и информация по проекту	Исполнитель	Руководителю	Не позже сроков графиков и к. точек
4.	О выполнении контрольной точки	Исполнитель	Руководителю	Не позже дня контрольного события по плану управления

Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Информация по возможным рискам сведена в таблицу 4.19.

Таблица 4.19 – Реестр рисков

№	Риск	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Рост стоимости и блокировка каналов импортных комплектующих	5	5	Высокий	Замещение импорта	Политические
2	Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства	4	5	Высокий	Участие в научных конференциях и публикация научных статей	Политика внутреннего финансирования науки

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

Оценка абсолютной эффективности исследования

В основе проектного подхода к инвестиционной деятельности предприятия лежит принцип денежных потоков. Особенностью является его прогнозный и долгосрочный характер, поэтому в применяемом подходе к анализу учитываются фактор времени и фактор риска. Для оценки общей экономической эффективности используются следующие основные показатели:

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

Чистая текущая стоимость (NPV) – это показатель экономической эффективности инвестиционного проекта, который рассчитывается путём дисконтирования (приведения к текущей стоимости, т.е. на момент инвестирования) ожидаемых денежных потоков (как доходов, так и расходов).

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

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

где: $ЧДП_{ont}$ – чистые денежные поступления от операционной деятельности; I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году; t – номер шага расчета ($t= 0, 1, 2 \dots n$); n – горизонт расчета; i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Расчёт NPV позволяет судить о целесообразности инвестирования денежных средств. Если $NPV > 0$, то проект оказывается эффективным.

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 4.20. При расчете рентабельность проекта составляла **20-25 %**, норма амортизации 10 %.

Таблица 4.20 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, руб.	0	7279635.8	7279635.8	7279635.8	7279635.8
2	Итого приток, руб.	0	7279635.8	7279635.8	7279635.8	7279635.8
3	Инвестиционные издержки, руб.	5823708.6	0	0	0	0
4	Операционные затраты, руб. (35%от бюджета)	0	2038298	2038298	2038298	2038298
5	Налогооблагаемая прибыль(1-4)	0	5241337	5241337	5241337	5241337
6	Налоги 20 %, руб.(5*20%)	0	1048267.4	1048267.4	1048267.4	1048267.4
8	Чистая прибыль, руб.(5-6)	0	4193069.6	4193069.6	4193069.6	4193069.6
9	Чистый денежный поток (ЧДП), руб.(чистая прибыль+амортизация)	- 5823708.6	4893069.6	4893069.6	4893069.6	4893069.6
10	Коэффициент дисконтирования при $i=20\%$ (КД)	1	<u>0.833</u>	<u>0.694</u>	<u>0.578</u>	<u>0.482</u>
11	Чистый дисконтированный денежный поток (ЧДД), руб.(9*10)	- 5823708.6	4075927	3395790.3	2828194.2	2358459.6
12	$\sum \text{ЧДД}$	6834662.5 руб.				
12	Итого NPV, руб.	1010953.9 руб.				

Коэффициент дисконтирования рассчитан по формуле:

$$КД = \frac{1}{(1 + i)^t}$$

где: i – ставка дисконтирования, 20 %; t – шаг расчета.

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет **1010953.9** рублей, что позволяет судить об его эффективности.

Индекс доходности (PI) – показатель эффективности инвестиции, представляющий собой отношение дисконтированных доходов к размеру инвестиционного капитала. Данный показатель позволяет определить инвестиционную эффективность вложений в данный проект. Индекс доходности рассчитывается по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_t}{(1+i)^t} / I_0 > 1$$

где: ЧДД - чистый денежный поток, руб.; I_0 – начальный инвестиционный капитал, руб.

Таким образом PI для данного проекта составляет:

$$PI = \frac{6834662.5}{5823708.6} = 1.174$$

Так как $PI > 1$, то проект является эффективным.

Внутренняя ставка доходности (IRR). Значение ставки, при которой обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или IRR. Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных притоков денежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или равна нулю. По разности между IRR и ставкой дисконтирования i можно судить о запасе экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования i , тем больше риск от инвестирования в данный проект.

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость. Эта зависимость представлена в таблице 4.21 и на рисунке 4.3.

Таблица 4.21 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV, руб.
1	Чистые денежные потоки, руб.	- 5823708.6	4893069.6	4893069.6	4893069.6	4893069.6	
2	Коэффициент дисконтирования						
	0,1	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	0,2	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	0,3	1	0,769	0,592	0,455	0,350	
	0,4	1	0,714	0,510	0,364	0,260	
	0,5	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	0,6	1	0,625	0,390	0,244	0,153	
	0,7	1	0,588	0,335	0,203	0,112	
	0,8	1	0,556	0,309	0,171	0,095	
	0,9	1	0,526	0,277	0,146	0,077	
	1	1	0,500	0,250	0,125	0,062	
3	Дисконтированный денежный поток, руб.						
	0,1	- 5823708.6	4447800,27	4041675	3674695	3341967	9682428,96
	0,2	- 5823708.6	4075926,98	3395790	2828194	2358460	6834662,46
	0,3	- 5823708.6	3762770,52	2896697	2226347	1712574	4774680,15
	0,4	- 5823708.6	3493651,69	2495465	1781077	1272198	3218684,02
	0,5	- 5823708.6	3263677,42	2172523	1443456	968827,8	2024775,04
	0,6	- 5823708.6	3058168,50	1908297	1193909	748639,6	1085305,68
	0,7	- 5823708.6	2877124,92	1639178	993293,1	548023,8	233911,56
	0,8	- 5823708.6	2720546,70	1511959	836714,9	464841,6	-289646,88
	0,9	- 5823708.6	2573754,61	1355380	714388,2	376766,4	-803419,19
	1,0	- 5823708.6	2446534,80	1223267	611633,7	305816,9	- 1236455,85

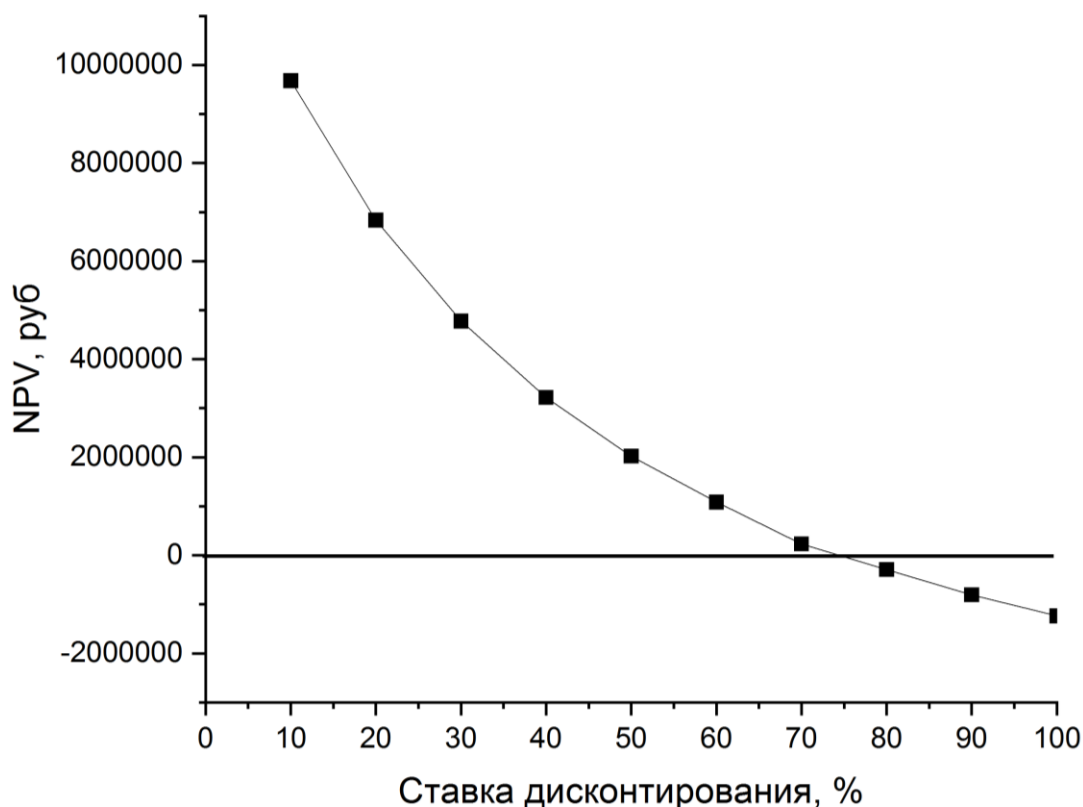


Рисунок 4.3 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,75.

$IRR > i$, проект эффективен.

Запас экономической прочности проекта: $75\% - 20\% = 55\%$

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

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости. То есть это время, за которое денежные средства должны совершить оборот.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока (таблица 4.22).

Таблица 4.22 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный чистый денежный поток ($i=0,20$), руб.	-5823708.6	4075927	3395790. 3	2828194.2	2358459.6
2	То же нарастающим итогом, руб.	-5823708.6	- 1747781. 6	1648008. 7	4476202.9	6834662.5
3	Дисконтированный срок окупаемости	$DP_{дск} = 1 + (1747781.6 / 3395790.3) = 1,5$ года				

Социальная эффективность научного проекта учитывает социально-экономические последствия осуществления научного проекта для общества в целом или отдельных категорий населения или групп лиц, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты (таблица 4.23).

Таблица 4.23 – Критерии социальной эффективности

ДО	ПОСЛЕ
Проблема ионного распыления при модификации свойств металлов пучками ионов азота и алюминия	Впервые показана возможность самокомпенсации ионного распыления, что позволит улучшить модификацию свойств материалов

Оценка сравнительной эффективности исследования

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

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более)

вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

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

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

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки; a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i^a, b_i^p – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблицы (таблице 4.24).

Таблица 4.24 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Выход продукта)	0,20	5	5	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	5	3	3
3. Надежность	0,15	4	4	4
4. Безопасность	0,15	4	3	4
5. Простота эксплуатации	0,15	5	4	5
6. Возможность автоматизации данных	0,20	5	4	5
Итого	1	28	23	25

$$I_m^p = 5 \cdot 0,20 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,20 = 4,7$$

$$I_1^A = 5 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,20 = 3,9$$

$$I_2^A = 4 \cdot 0,20 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,20 = 4,2$$

Интегральный показатель эффективности разработки $I_{финр}^p$ и аналога $I_{финр}^a$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{ф}^p}; I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_{ф}^a}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a}$$

где: $\mathcal{E}_{ср}$ – сравнительная эффективность проекта; $I_{финр}^p$ – интегральный показатель разработки; $I_{финр}^a$ – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Сравнительная эффективность разработки по сравнению с аналогами представлена в таблице 4.25.

Таблица 4.25 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,18	0,16	0,16
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,50	3,85	4,00
3	Интегральный показатель эффективности	23,12	22,83	23,03
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,02	1,01	1,0

Выводы по главе «Финансовый менеджмент. Ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять, что разработанный вариант проведения проекта является наиболее эффективным при решении поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В ходе выполнения раздела финансового менеджмента определена чистая текущая стоимость, (NPV), равная **1010953.9** руб.; индекс доходности $PI=1.174$, внутренняя ставка доходности $IRR=55\%$, срок окупаемости $PP_{дск}=1,5$ года.

Таким образом мы имеем ресурсоэффективный проект с высоким запасом финансовой прочности и коротким сроком окупаемости.

ГЛАВА 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Для выполнения магистерской диссертации на тему «Высокоинтенсивная ионная имплантация ионов низкой энергии в условиях компенсации ионного распыления облучаемой поверхности» проводилась серия экспериментов с применением различных установок, помогающих решить поставленные задачи, следующего типа: профилометр STIL 3D Micromeasure, растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N и другие. Эксперименты проводятся на комплексной технологической установке, включающую в себя вакуумную систему, источники тока разряда, генераторы потенциалов смещения отрицательного знака и т.д. В связи с этим, детальное рассмотрение правил безопасности труда при проведении работ с высоким напряжением, особенно необходимо при осуществлении экспериментальных исследований, входящих в магистерскую диссертацию.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Специальные правовые нормы трудового законодательства

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 [64]. 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 [64], 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 [65, 66]. 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 [64].

Пособия по временной нетрудоспособности, размеры пособий по временной нетрудоспособности и условия их выплаты устанавливаются [64, 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 [65].

Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Согласно ГОСТ Р 50923-96. Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения, рабочее место с дисплеем должно обеспечивать оператору возможность удобного выполнения работ в положении сидя и не создавать перегрузки костно-мышечной системы [67].

Основными элементами рабочего места оператора являются: рабочий стол, рабочий стул (кресло), дисплей, клавиатура. Рабочий стул должен быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья. Требования к каждому из этих элементов рабочего места рассмотрено в ГОСТ Р 50923-96 подробно [67]. Дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову.

Дисплей на рабочем месте должен быть установлен ниже уровня глаз оператора. Угол наблюдения экрана оператором относительно горизонтальной линии взгляда не должен превышать 60° [67].

Помещение, в котором располагается экспериментальное оборудование, имеет линейные размеры 8×6 м и высоту 4 м и располагается на первом этаже одиннадцатого корпуса ТПУ. В помещении есть два окна размерами 2,0×1,5 м, которые обеспечивают достаточное проникновение солнечного света, с противоположной стороны окон находится дверной проем.

5.2 Производственная безопасность

Для идентификации потенциальных факторов был использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [68]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные Документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Эксплуа тация	
1. Недостаточная освещенность рабочей зоны		-	+	СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение [73].
2. Отклонение от показателей микроклимата	-	-	+	Требования к допустимым параметрам микроклимата регулируются СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [69].
3. Превышение уровня шума и вибрации		-	+	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 [70] и СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий [71].
4. Опасность поражения электрическим током	-	-	+	Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2017 [72]

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

5.3.1 Анализ вредных факторов

Недостаточная освещенность рабочей зоны

Уровень освещенности, на рабочем месте, должен соответствовать условиям работы и быть оптимальным по яркости. Учитывая особенности процесса работы за электрооборудованием (не требуется освещения для проведения работ наивысшей точности) возможно применение схемы общего равномерного освещения.

Правильно спроектированное и рационально выполненное освещение производственных помещений оказывает положительное воздействие на работающих, способствует повышению эффективности и безопасности труда, снижает утомление и травматизм, сохраняет высокую работоспособность.

В данной работе будут рассмотрены следующие вопросы:

- выбор системы освещения;
- выбор источников света;
- выбор светильников и их размещение;
- выбор нормируемой освещённости;
- расчёт освещения методом светового потока.

Выбор системы освещения.

В связи с расположением технологического оборудования и вакуумной камеры с показателями датчиков измерения вакуума было выбрано общее равномерное освещение всего производственного помещения.

Выбор источников света.

Для общего освещения был выбран газоразрядный тип ламп в виду энергетической экономичности и большим сроком службы по сравнению с лампами накаливания. Таким образом, были выбраны люминесцентные лампы, выделяемая по спектральному составу видимого света как лампы

дневной цветности (ЛД), для которых световой поток и мощность составляют 4250 Лм и 80 Вт, соответственно.

Выбор светильников и их размещение.

Тип ламп был выбран ОД – 2-80 с размерами 1531×266 мм. Данный тип ламп был выбран согласно необходимому освещению рабочей зоны для работ высокой точности.

Размещение светильников в помещении определяется следующими параметрами: $H=4$ –высота помещения; $h_c=1$ –расстояние светильников от перекрытия (свес) (м); $h_n=H-h_c=3$ –высота светильника над полом, высота подвеса (м); $h_{рп}=0,7$ –высота рабочей поверхности над полом (м), рисунок 5.1.

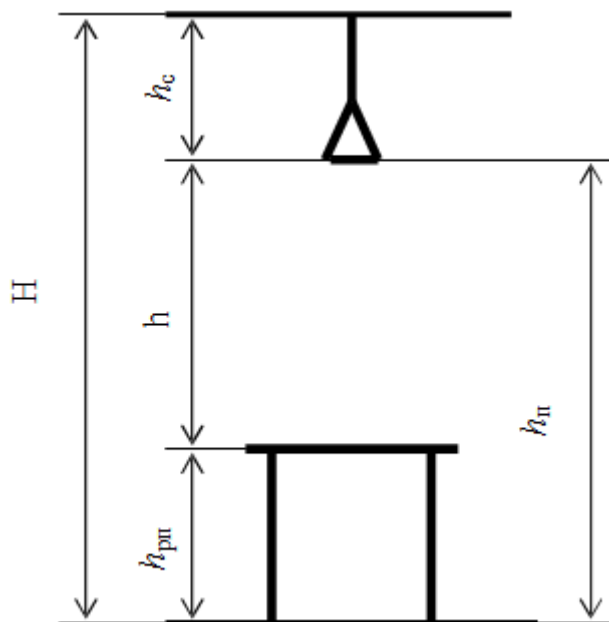


Рисунок 5.1 – Основные расчётные параметры

Расчётная высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле 5.1:

$$h = h_n - h_{рп} = 3 - 0,7 = 2,3, \quad (5.1)$$

Расстояние определяется по формуле 5.2:

$$L = \lambda * h = 1,4 * 2,3 = 3,22, \quad (5.2)$$

где L – расстояние между соседними светильниками или рядами (если по длине (А) и ширине (В) помещения расстояния различны, то они обозначаются L_A и L_B).

Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным $L/3$ (формула 5.3).

$$l = \frac{L}{3} = \frac{3,22}{3} = 1,07 \quad (5.3)$$

где l – расстояние от крайних светильников или рядов до стены.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина $\lambda = L/h$, уменьшение которой удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. Для люминесцентных без защитной решётки типов ОД, ОДО интегральный критерий $\lambda = 1,4$.

Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{(B - \frac{2}{3}L)}{L} + 1 = \frac{(5,24 \text{ м} - \frac{2}{3} \cdot 3,22 \text{ м})}{3,22 \text{ м}} + 1 = 1,96 \approx 2 \quad (5.4)$$

Количество светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{св}} = \frac{(A - \frac{2}{3}L)}{l_{\text{св}} + 0,5} = \frac{(6 \text{ м} - \frac{2}{3} \cdot 3,22 \text{ м})}{1,531 \text{ м} + 0,798} = 1,65 \approx 2 \quad (5.5)$$

Количество люминесцентных ламп определяется по формуле:

$$N = n_{\text{ряд}} * n_{\text{св}} * 2 = 2 * 2 * 2 = 8 \quad (5.6)$$

Так как помещение больше имеет прямоугольную форму, то разумнее добавить в каждый ряд по одному дополнительному светильнику, тем самым уменьшив расстояние между светильниками в ряду до 80 см. Это позволит усилить освещенность помещения для более благоприятной работы за электро оборудованием. Согласно формуле 5.6 необходимое число светильников равно 4, а количество люминесцентных ламп равно 8.

На рисунке 5.2 изображен план лаборатории и расположения источников света с люминесцентными лампами.

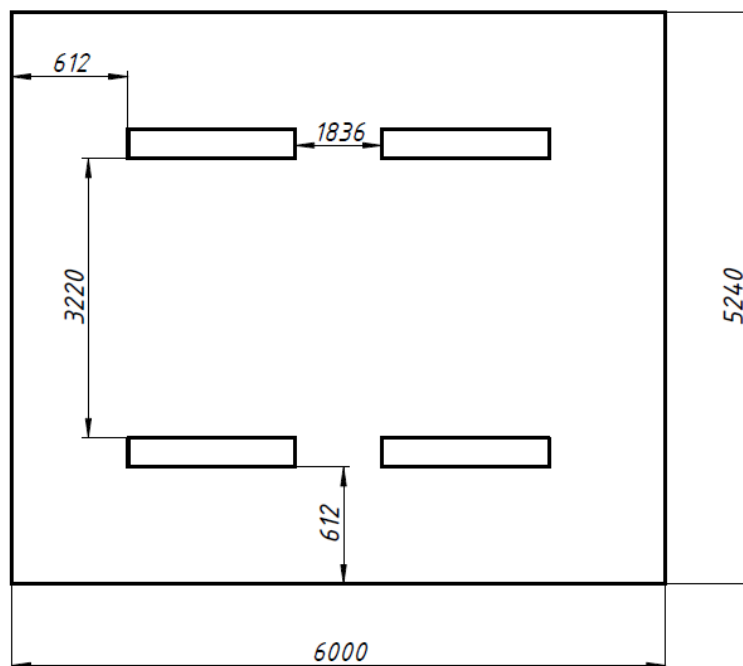


Рисунок 5.2 – План расположения источников света

Выбор нормируемой освещённости.

Согласно СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение [73] характеристика зрительной работы – высокой точности, разряд зрительной работы III г. Для данной характеристики зрительной работы необходимая освещенность – 400 лк. [73].

Расчёт общего равномерного освещения.

Расчет общего равномерного уровня искусственного освещения горизонтальной поверхности рабочего места производится способом коэффициента светового потока:

$$\phi_{\Pi} = \frac{E_n S K_z Z}{N n} = \frac{400 \cdot 31,44 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{8 \cdot 0,56} = 4631 \text{ Лм} \quad (5.8)$$

где E_n – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95*, $E_n = 400$ Лк, для наименьшего размера объекта различения от 0,3 до 0,5 (Характеристика зрительной работы III г: Высокой точности); S – площадь освещаемого помещения, м^2 ; K_z – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стены прочее, т.е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха

дыма, пыли, $K_3=1,5$ (Помещения с малым выделением пыли); Z –коэффициент неравномерности освещения, отношение E_{cp}/E_{min} . Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1; N –число ламп в помещении, 8; n –коэффициент использования светового потока 0,56.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка ρ_n .

Индекс помещения определяется по формуле 1.9:

$$i = \frac{S}{h(A+B)} = \frac{31,44}{2,8 \cdot (6 \text{ м} + 5,24 \text{ м})} = 1 \quad (5.9)$$

Коэффициент отражения стен (свежепобеленное состояние стен с окнами без штор): $\rho_c = 50 \%$;

Коэффициент отражения потолка (свежепобеленное состояние потолка): $\rho_n = 70 \%$;

Делаем проверку выполнения условия:

$$\begin{aligned} -10\% \leq \frac{\Phi_{ЛД} - \Phi_{П}}{\Phi_{ЛД}} \cdot 100\% \leq 20\%, \\ \frac{\Phi_{ЛД} - \Phi_{П}}{\Phi_{ЛД}} \cdot 100\% = \frac{4250 - 4631}{4250} \cdot 100\% = -9\% \end{aligned} \quad (5.10)$$

Таким образом: $-10\% \leq -9\% \leq 20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Таким образом, мощность осветительной системы равна:

$$P = 8 \cdot 80 \text{ Вт} = 640 \text{ Вт}.$$

Отклонение показателей микроклимата

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

окружающей средой и факторы, определяющие самочувствие. Такие факторы как работоспособность, здоровье и производительность.

Перегрев организма наступает при высокой температуре воздуха и высокой относительной влажности, которые сопровождаются низкой подвижностью воздушной массы. При наступлении переохлаждения снижается температура тела, происходит сужение кровеносных сосудов, возникают сбои в работе сердечно-сосудистой системы [74].

Санитарными нормами, установленными для производственных помещений [69] 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, [69]

Период года	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Допустимые			
Холодный	18-26	75	не более 0.1
Тёплый	15-28	20-80	не более 0.5

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

Превышение уровня шума

Одним из наиболее распространенных в производстве вредных факторов является шум. Он создается рабочим оборудованием, преобразователями напряжения, рабочими лампами дневного света, а также проникает снаружи. Шум вызывает головную боль, усталость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, память ухудшается, реакция уменьшается.

Основным источником шума в комнате являются компьютерные охлаждающие вентиляторы. Уровень шума варьируется от 35 до 42 дБ. Согласно СанПиН 2.2.2 / 2.4.1340-03, при выполнении основных работ на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 82 дБ [75].

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

К средствам коллективной защиты относятся:

1. устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
2. изоляция источников шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов);
3. применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения;

К средствам индивидуальной защиты относится применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

Превышение уровня вибрации

К источникам вибрации можно отнести 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», [76].

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).

Средства коллективной защиты (СКЗ) располагаются между источником вибрации и оператором.

К средствам коллективной защиты относятся: подставки, сидения, кабины, рукоятки, амортизаторы.

К средствам индивидуальной защиты относятся:

1. Для рук виброизолирующие перчатки, вкладыши и прокладки;
2. Для ног виброизолирующая обувь, стельки и подметки.

5.3.2 Анализ опасных факторов

Поражение электрическим током

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц. По опасности электропоражения комната относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствует повышенная влажность, высокая температура, токопроводящая пыль и возможность одновременного соприкосновения токоведущих элементов с заземленными металлическими корпусами оборудования [69].

Лаборатория относится к помещению с без повышенной опасностью поражения электрическим током. Безопасными номиналами являются: $I < 0,1$ А; $U < (2-36)$ В; $R_{\text{зазем}} < 4$ Ом. 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 (кожухов, крышек, сеток и т.д.), расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

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

Поражение электрическим током чаще всего наступает при небрежном обращении с приборами, при неисправности электроустановок или при их повреждении.

Для освобождения пострадавшего от токоведущих частей необходимо использовать непроводящие материалы. Если после освобождения пострадавшего из-под напряжения он не дышит, или дыхание слабое,

необходимо вызвать бригаду скорой медицинской помощи и оказать пострадавшему доврачебную медицинскую помощь.

Для защиты от поражения электрическим током используют СИЗ и СКЗ.

Средства коллективной защиты:

- Заземление источников электрического тока;
- Использование щитов, барьеров, клеток, ширм, а также заземляющих и шунтирующих штанг, специальных знаков и плакатов.

Средства индивидуальной защиты: использование диэлектрических перчаток, изолирующих клещей и штанг, слесарных инструментов с изолированными рукоятками, указатели величины напряжения, калоши, боты, подставки и коврики.

5.4 Пожарная опасность

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

Согласно НПБ 105-03 [80] лаборатория относится к категории В – горючие и трудно горючие жидкости, твердые горючие и трудно горючие вещества и материалы, вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых находится, не относятся к категории наиболее опасных А или Б.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 21-01-97 [81] (выполнено из кирпича, которое относится к трудносгораемым материалам).

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

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

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

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

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

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

Для предупреждения пожара и взрыва необходимо предусмотреть:

1. специальные изолированные помещения для хранения и разлива легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении;
2. специальные помещения (для хранения в таре пылеобразной канифоли), изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;

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

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



Рисунок 5.3 – План эвакуации

5.5 Экологическая безопасность

Основными загрязняющими экологию факторами в лаборатории является:

1. Выделение парообразных масляных паров при работе пластинчатороторных насосов. Необходимо улучшить систему улавливания / фильтрации масляных паров при работе пластинчато-роторных насосов, так как масло и масляные пары непосредственно влияют на атмосферу. В данный момент стоят фильтры, улавливающие масло и масляные пары, но все же, используемые фильтры не улавливают все вредные вещества. Согласно ГН 2.2.5.3532-18 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны [77] предельно-допустимые концентрации (ПДК) трансформаторного масла равны 5 мг/л м^3 , класс опасности 3. Для защиты атмосферы от паров масла необходимо, чтобы при эксплуатации пластинчатороторных насосов отвечала всем требованиям ГОСТ Р 53481-2009 Системы смазочные. Требования безопасности [79]; Для утилизации вредных веществ можно использовать специальные сорбирующие элементы, накапливающие масляные пары, после чего использовать полученные отходы как сырьё при сжигании для получения тепла.

2. Выход из строя ПЭВМ и ЭВМ, данная оргтехника относится к VI классу опасности и подлежит специальной утилизации. Процедура утилизации должна соответствовать ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов [79].

5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

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

Природная чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории или акватории, сложившейся в результате возникновения источника природной чрезвычайной ситуации, который может повлечь или повлек за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и (или) окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приводит к авариям систем тепло- и водоснабжения, сантехнических коммуникаций и электроснабжения, приостановке работы. В этом случае при подготовке к зиме следует предусмотреть: а) газобаллонные калориферы (запасные обогреватели), б) дизель или бензоэлектрогенераторы; в) запасы питьевой и технической воды на складе (не менее 30 л на 1 человека); г) теплый транспорт для доставки работников на работу и с работы домой в случае отказа муниципального транспорта. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

В лаборатории научно-исследовательского центра «Физическое материаловедение и композитные материалы» Томского политехнического университета наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

Выводы по главе «Социальная ответственность»

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 безопасность в случае чрезвычайных ситуаций. В результате анализа было подтверждено, что все необходимые меры для обеспечения безопасности сотрудников в лаборатории приняты, например, все элементы, порождающие шум изолированы. Так же в лаборатории установлены широкие пластиковые окна, которые обеспечивают необходимый уровень освещения и вентиляции воздуха. Установлена оптимальная система освещения для обеспечения искусственного белого света. В случае ЧС в лаборатории присутствует план эвакуации, огнетушитель.

СПИСОК 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. Gavrilov, N.V. Effect of the electron beam and ion flux parameters on the rate of plasma nitriding of an austenitic stainless steel / N.V. Gavrilov, 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. 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.

12. 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.
13. A.I. Ryabchikov. High intensity metal ion beam generation / P.S. Ananin, (and ect.) // Vacuum. – 2017. – 143. P. 447–453.
14. Sun Mu. Inner surface modification of 40Cr steel cylinder with a new plasma source ion implantation method / Si-ze Yang, Wen-qing Yao. // Vacuum Science & Technology. – 1998. – 16.4. P. 2718-2721.
15. Liu, A. G., et al. Dose and energy uniformity over inner surface in plasma immersion ion implantation. // Journal of applied physics. – 1998. – 84.4. P. 1859-1862.
16. Sheridan T. E. Kinetic model for plasma-based ion implantation of a short, cylindrical tube with auxiliary electrode / T. K. Kwok, P. K. Chu. // Applied physics letters. – 1998. – 72.15. P. 1826-1828.
17. Zeng. Plasma-immersion ion implantation of the interior surface of a small cylindrical bore using an auxiliary electrode for finite rise-time voltage pulses / Xuchu, (and ect.). // IEEE transactions on plasma science. – 1998. – 26.2. P. 175-180.
18. Liu. A new method for inner surface modification by plasma source ion implantation (PSII) / Bin, (and ect.). // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2001. – 184.4. P. 644-648.
19. Baba Koumei. Ion implantation into inner wall surface of a 1-m-long steel tube by plasma source ion implantation / Ruriko Hatada. // Surface and Coatings Technology. – 2000. – 128. P. 112-115.
20. Baba Koumei. Ion implantation into inner wall surface of millimeter size diameter steel tube by plasma source ion implantation / Ruriko Hatada. // Surface and Coatings Technology. – 2002. – 158. P. 741-743.
21. Disatnik G. Characteristics of macroparticle emission from a high-current-density multi-cathode spot vacuum arc / Boxman R.L., Goldsmith S. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1987. – PS-15. – P. 520–523.

22. Daalder J.E. Cathode spots and vacuum arcs // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. – 1981. – V. 104C. P. 91–106.
23. Anders S. On the macroparticle flux from vacuum arc cathode spots / Anders A. (and ect.). // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 1993. – V. 21. – P. 440–446.
24. Ryabchikov A.I. Physical mechanisms of macroparticles number density decreasing on a substrate immersed in vacuum arc plasma at negative highfrequency short-pulsed biasing / D.O. Sivin, A.I. Bumagina // *Applied Surface Science*. – 2014. – 305. – с.487-491.
25. Аксенов И.И. Транспортировка плазменных потоков в криволинейной плазмооптической системе / Белоус В.А. и др. // *Физика плазмы*. –1978. – Т.4, вып. 4. – С. 758 - 763.
26. Aksenov, I. I. Magnetic confinement structures in vacuum-arc plasma filtering systems. // *XXIst International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. – 2004. – Vol. 2. IEEE.
27. A.I. Ryabchikov. Regularities of plasma-immersion formation of long-pulse high-intensity titanium ion beams/ D.O. Sivin, A.E. Shevelev// *Russian Physics Journal*. – 2018. – №7. – с. 1-7.
28. Ryabchikov, A. I. Features of the Formation of Ultralow Energy High-Intensity Metal and Gaseous Ion Beams. / Dektyarev S.V. (and ect.). // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2021. – 49.9. P. 2559-2566.
29. Вахрушев Д. О. Исследование закономерностей модификации стали 40Х высокоинтенсивными пучками ионов азота в условиях регулируемой энергии ионов: бакалаврская работа: защищена 15.06.2020. / Вахрушев Дмитрий Олегович. – Томск, 2020. – 105 с.
30. Ryabchikov, A. I. Emission properties of broad-beam vacuum arc ion sources. // *Review of scientific instruments*. – 1992. – 63.4. P. 2425-2427.
31. Ryabchikov A.I. Study of the Regularities of Low- and Super-low-Energy High-intensity Metal Ion Beams Formation / Anna Ivanovna, Denis Sivin, and other // *Symp. on High-Current Electronics*. – 2020. – С. 1-4.

32. Ryabchikov A.I. Formation of repetitively pulsed high-intensity, low-energy silicon ion beams / D. O. Sivín, and other // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. – 2019. – № 953. – С. 1-9.
33. Ryabchikov A.I. Generation of high-intensity aluminum-ion beams/ D.O. Sivín, A.E. Shevelev // Technical Physics. – 2018. – №10. – с. 1564-1572.
34. Ryabchikov A.I. Plasma-immersion formation of high-intensity gaseous ion beams / D.O. Sivín, (and ect.) // Vacuum. – 2019. – №165. – с. 127-133.
35. Ryabchikov A.I. High-current-density gas ion ribbon beam formation / D.O. Sivín, (and ect.) // Vacuum. – 2018. – № 906 – с. 56-60.
36. Малинов С. Связь микроструктуры и свойств промышленных титановых сплавов с параметрами процесса азотирования из газовой фазы / Зечева А., Ша В. //Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – №. 7. – С. 21-28.
37. Кузьмичев А.И. Вторичная эмиссия атомных частиц при бомбардировке тяжёлых d-металлов ионами из азотной плазмы/ М.С. Мельниченко, В.М. Шулаев // Известие вузов. Физика. – 2020. – с. 95-101.
38. P. Phadke. Sputtering and nitridation of transition metal surfaces under low energy, steady state nitrogen ion bombardment / J. M. Sturm, Robbert V.E. // Applied Surface Science – 2019. – с. 1-10.
39. M.K. Pospieszalska. Magnetospheric ion bombardment profiles of satellites / R.E. Johnson, // Europa and Dione, Icarus – 1989. – с. 1-13.
40. Zinkle S. J. Materials challenges in nuclear energy / Was G. S. // Acta Materialia. – 2013. – Т. 61. – №. 3. – С. 735-758.
41. Daum R. S. Identification and quantification of hydride phases in Zircaloy-4 cladding using synchrotron X-ray diffraction / Chu Y. S., Motta A. T. // Journal of Nuclear Materials. – 2009. – №. 3. – С. 453-463.
42. Ryabchikov A.I. High-intensity chromium ion implantation into Zr-1Nb alloy / E.B. Kashkarov, (and ect.) // Surf. and Coat. Technol. – 2019. – №.383 – с. 1-6.

43. Kashkarov E. B. Effect of titanium ion implantation and deposition on hydrogenation behavior of Zr-1Nb alloy / Nikitenkov N.N., (and ect.) // Surface and Coatings Technology. – 2016. – Т. 308. – С. 2-9.
44. Ryabchikov A.I. Surface modification of Al by high-intensity low-energy Ti-ion implantation: Microstructure, mechanical and tribological properties / E.B. Kashkarov, (and ect.) // Surface & Coatings Technology – 2019. – Т. 372 – с. 1-8.
45. Ryabchikov A.I. Ultra high fluence implantation of aluminum ions into CPeTi / A. E. Shevelev, (and ect.) // Journal of Alloys and Compounds – 2019. – №.793 – с. 604-612.
46. Lindhard J. et al. Notes on atomic collisions III K // Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd. – 1963. – Т. 33. – №. 10. – С. 1-42.
47. Sigmund P. Sputtering by ion bombardment theoretical concepts // Sputtering by particle bombardment I. – 1981. – С. 9-71.
48. Р. Бериш. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой. / Н.Н. Andersen (and ect.). – Издательство «Мир», Москва. – 1984. – 336 с.
49. Л. Фельдман, Д. Майер. Основы анализа поверхности и тонких плёнок. – Издательство «Мир», Москва. – 1986. – с. 78-86.
50. Bethe, H. Theory of the passage of fast corpuscular rays through matter. // Selected Works Of Hans A Bethe: (With Commentary). – 1997. P. 77-154.
51. Lindhard, J. Energy dissipation by ions in the keV region / M. Scharff. // Physical Review. – 1961. – 124.1. P. 128.
52. Dupuy, Claude HS, ed. Radiation damage processes in materials. Leiden: Noordhoff, 1975.
53. Молчанов В. А. Изменение коэффициента катодного распыления в зависимости от угла падения ионов на мишень. / Всеволод Г. Т. // Доклады Академии наук. – 1961. – №.4. с. 136.
54. Gillam E. The penetration of positive ions of low energy into alloys and composition changes produced in them by sputtering // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1959. – Т. 11. – №. 1-2. – С. 55-67.

55. Elich, JJ Ph. Прецизионные измерения угловой и температурной зависимости распыления / Н. Е. Roosendaal, D. Onderdelinden // Радиационные эффекты. – 1972. – 14.1-2. Р. 93-100.
56. Lopatin, I. V. Effect of thermionic cathode heating current self-magnetic field on gaseous plasma generator characteristics / Yu H. Akhmadeev, N. N. Koval. // Review of Scientific Instruments. – 2015. – Т. 86 №.10. – Р. 103301.
57. Davis W.D. Analysis of the Electrode Products Emitted by dc Arcs in a Vacuum Ambient / Miller H.C. // Journal of Applied Physics. – 1969. – V. 40. – Р. 2212.
58. Н.Н. Никитенков. Ионно-плазменные технологии формирования покрытий и модификации поверхностей: учебное пособие / И.А. Шулепов, С.В. Дектярёв, И.Б. Степанов; Томский политехнический университет. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 68 с.
59. Никонов Н. В. Термодпары. Типы, характеристики, конструкции, производство // М.: ООО «МТК «Метотехника. – 2015.
60. Sivin, D. O. Gas-discharge plasma application for ion-beam treatment of the holes' inner surfaces / Korneva, O. S, (and ect.) // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – No. 1. – Р. 012079.
61. Ryabchikov, A. I. Modification of the microstructure and properties of martensitic steel during ultra-high dose high-intensity implantation of nitrogen ions / Sivin D.O., (and ect.) // Surface and Coatings Technology. – 2020. – №.388. Р. 125557.
62. Ryabchikov, A. I. High intensity, low ion energy implantation of nitrogen in AISI 5140 alloy steel / Sivin D.O., (and ect.) // Surface and Coatings Technology. – 2018. – №.355. Р. 129-135.
63. Р. Бериш. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой. Вып.2. Распыление сплавов и соединений, распыление под действием

- электронов и нейтронов, рельеф поверхности / Бетц Г. (and est.). – Издательство «Мир», Москва. – 1986. – 488 с.
- 64.ПНД Ф 12.13.1-03. Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения).
- 65.Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. От. 01.04.2019).
- 66.Федеральный закон «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» от 24.07.1998 N 165-ФЗ (последняя редакция).
- 67.ГОСТ, Р. "50923-96 Дисплеи. Рабочее место оператора." (1996): 07-10;
- 68.ГОСТ 12.0.003-2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- 69.Федеральный закон «Об основах обязательного социального страхования» от 16.07.1999 N 165-ФЗ (последняя редакция).
- 70.СанПин 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 71.СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
- 72.СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
- 73.СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение [Текст] - Москва: ССтандартинформ, 2018. – 121 с.
- 74.Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. ГОСТ 12.1.019-2017.
- 75.СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 "Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)".
- 76.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.

- 77.ГН 2.2.5.3532-18 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
- 78.ГОСТ Р 53481-2009 Системы смазочные. Требования безопасности.
- 79.ГОСТ Р 53692-2009 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов.
- 80.НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной безопасности».
- 81.СНиП 21-01-97 «Противопожарные нормы».

Приложение А

Раздел 3

Исследование высокоинтенсивной имплантации ионов во внутренние поверхности протяжённых отверстий

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ01	Вахрушев Дмитрий Олегович		

Консультант школы отделения (НОЦ) – Экспериментальной физики _____ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭФ ИЯТШ	Лаптев Роман Сергеевич	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Ляхотюк Л.А.	-		

CHAPTER 3. INVESTIGATION OF HIGH-INTENSITY ION IMPLANTATION INTO THE INTERNAL SURFACES OF EXTENDED HOLES

3.1 Features of the impact of high-intensity ion beams under conditions of self-compensation of ion sputtering and in its absence

Experimental studies on the self-compensation of ion sputtering under irradiation with nitrogen ion beams were carried out at an ion current density on the order of hundreds of mA/cm², a fixed ion beam energy of 1.4 keV, a working gas pressure of 0.6 Pa, and a pulse repetition rate of 40 kHz. In this work, the amplitudes of the ion current on the collector were achieved 0.9 and 1.2 A. The results of the studies presented in this chapter were published in [60].

The ion beam formation system was installed in the working chamber along the axis of the cylindrical hollow cathode of the plasma generator at a distance of 150 mm between the plasma generator output and the grid electrode.

To evaluate the sputtering of samples in the absence of its compensation, an experiment was conducted where not six samples, but only two, were installed on a hexagonal sample holder. A chromium-alumel thermocouple was installed on the reverse side of the first sample to estimate the temperature, and the second sample was used for further research.

The experiment was carried out at a pulse duration of 5 μ s and a discharge current of 30 A for 120 minutes, which corresponded to a sample surface temperature of 400 °C. The surface of the sample was examined before and after the experiment on the STIL 3D Micromeasure profilometer. According to the profilometer, the formation of a spray crater with a maximum depth of 90 μ m was established, Figure 3.1.

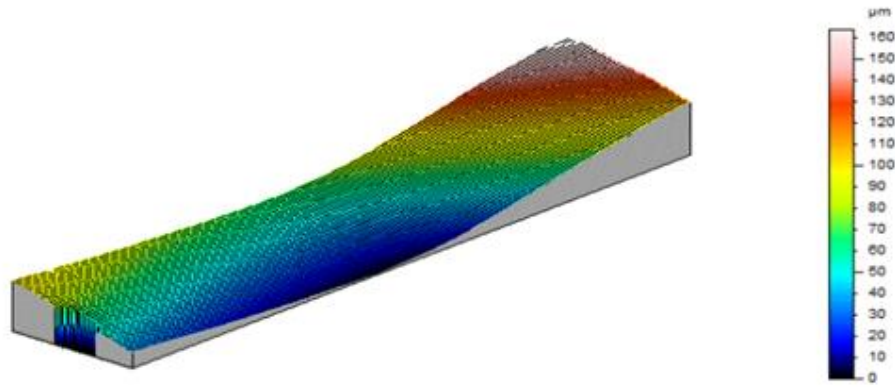


Figure 3.1 - The surface of the test sample after ion sputtering at a pulse duration of 5 μ s, a bias potential amplitude of 1.4 keV, a discharge current of 30 A, a pulse repetition rate of 40 kHz and an operating pressure of 0.6 Pa

The data obtained can be compared with the results of earlier studies on the modification of stainless steel by a nitrogen ion beam at normal beam incidence [61]. In the above work, the formation of a crater less than 5 micrometers was found, which is strikingly different from our case. A striking increase in the intensity of ion sputtering with an increase in the angle of incidence of ions is associated with an increase in the ion sputtering coefficient. Based on the geometry of the arrangement of the samples relative to the beam focus, in this work, the range of possible focusing angles of the ion beam on the target from 40° to 90° was established.

The next part of the work was to study the compensation of ion sputtering due to material deposition using all six samples on a hexagonal holder.

Table 3.1 lists the main parameters of high-intensity implantation of nitrogen ion beams under the condition of self-compensation of ion sputtering.

Table 3.1 - Main modes of ion implantation of nitrogen ion beams with compensation of ion sputtering

№	Displacement pulse parameters			Ion current amplitude, A	Processing time, min	Discharge current, A	Sample temperature, °C
	Displacement pulse duration, μs	Amplitude, kV	Frequency, kHz				
1	5	1.4	40	0.9	120	30	400
2	7.5				80		515
3	10				60		570
4	10			1.2	50	50	615

To maintain the same radiation dose when changing the pulse duration (5, 7.5, 10 μs), the processing time of the material also changed proportionally (120, 80, 60 minutes).

To study the depth of ion sputtering craters on the sample surface, in the condition of self-compensation of the sputtered material, the profiles of the sample surface corresponding to ion implantation modes 1, 2 and 3 were obtained, Table 3.1.

The measurement results are presented in the form of a histogram, Figure 3.2. The given histogram shows that series of experiments with the same radiation dose but different pulse durations correspond to the maximum depths of the crater after ion implantation from 9 to 14 μm . One can note an increase in the depth of the spray crater with increasing pulse duration. This trend was previously described in [62] and was associated with an increase in the sample temperature during ion implantation.

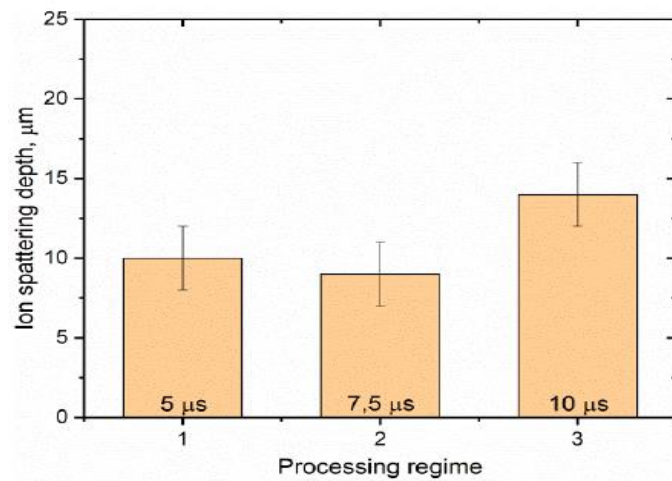


Figure 3.2 - The maximum depth of crater formation after bombardment with nitrogen ion beams at pulse durations of 5, 7.5 and 10 μs , corresponding to processing modes 1, 2 and 3, in the condition of ion sputtering compensation

A study was also made of the depth of crater formation in the condition of self-compensation of ion sputtering in processing mode 4. Figure 3.3 shows a 3D image of the sample surface after ion bombardment.

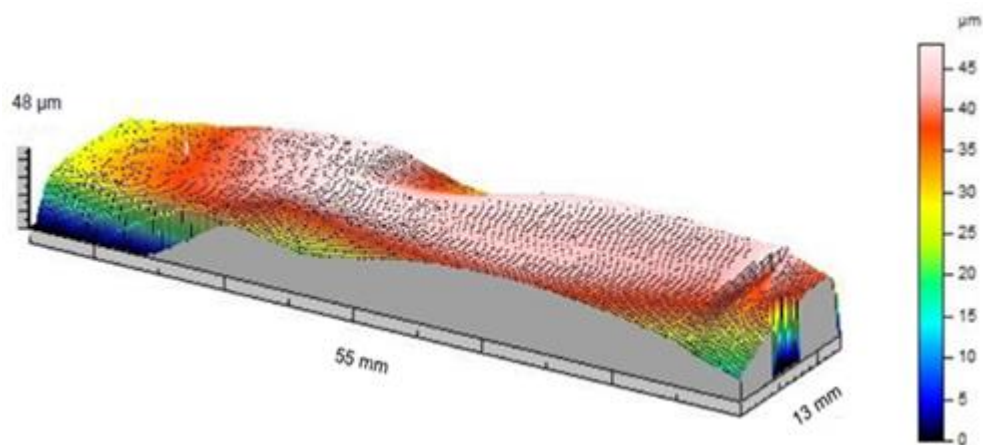


Figure 3.3 - The surface of the test sample after ion sputtering with a pulse duration of 5 μs , a bias potential amplitude of 1.4 keV, a discharge current of 50 A, a pulse repetition rate of 40 kHz and an operating pressure of 0.6 Pa

The 3D image shows that the maximum ion sputtering depth did not exceed 14 μm .

The concentration profile of the occurrence of nitrogen impurities along the sample depth in the absence of ion sputtering compensation was obtained using a Hitachi S-3400 N scanning electron microscope, Figure 3.4. The results demonstrate a 1 μm impurity layer thickness.

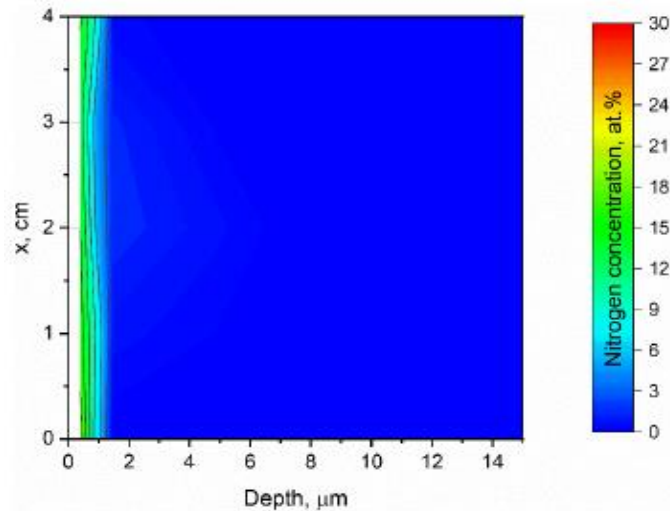


Figure 3.4 - Concentration profile of the occurrence of nitrogen impurities in the depth of the sample in the absence of compensation for ion sputtering at a pulse duration of 5 μs , a discharge current of 30 A, a processing time of 120 minutes, a sample surface temperature of 400 $^{\circ}\text{C}$

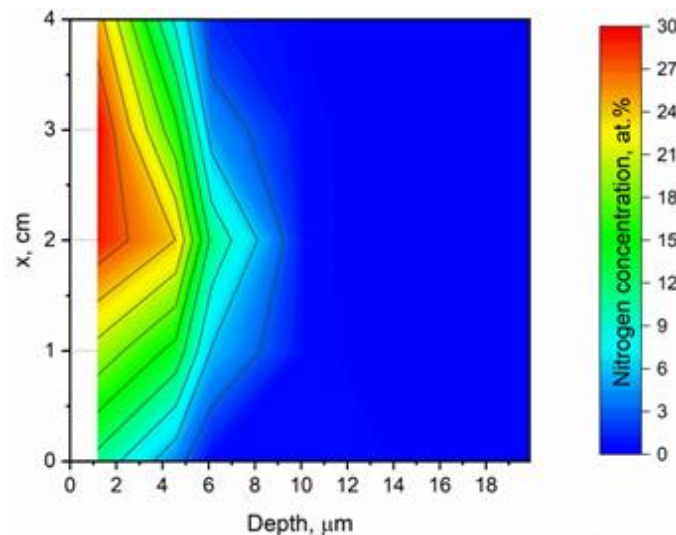


Figure 3.5 - Concentration profile of nitrogen distribution in depth under the condition of self-compensation of ion sputtering at a pulse duration of 5 μs , a discharge current of 30 A, a processing time of 120 minutes, a sample surface temperature of 400 $^{\circ}\text{C}$

The results shown in Figure 3.5 demonstrate the inhomogeneous thickness of the nitrogen impurity layer with a maximum depth of 6-9 μm . The maximum concentration of nitrogen was 30 at.%. The greatest thickness of the impurity layer was observed at a distance of two centimeters from the edge of the sample. This region corresponds to the maximum ion current density.

Comparing the results of experiments in the condition of compensation of ion sputtering and its absence, it can be seen that in the case of using all six samples on a hexagonal holder, the depth of crater formation was about 9–14 μm . While the depth of the spray crater, in the case of using only two samples, is about 90 microns, which is ten times greater. Concentration profiles showed that in the absence of compensation for ion sputtering, nitriding practically does not occur due to ion sputtering of the surface and removal of impurities. The use of all six samples on a hexagonal holder contributes to an increase in the maximum depth of impurity occurrence by six to nine times.

3.2 Modification of the internal surfaces of extended holes made of steel AISI 321 with a beam of nitrogen ions

To study the doping depth of the nitrogen impurity, the concentration profiles of the nitrogen impurity distribution in depth were obtained, Figure 3.6, at pulse durations of 5, 7.5, and 10 μs . Experimental studies on the self-compensation of ion sputtering under irradiation with nitrogen ion beams were carried out at an ion current density on the order of hundreds of mA/cm^2 , a fixed ion beam energy of 1.4 keV, a working gas pressure of 0.6 Pa, and a pulse repetition rate of 40 kHz.

It was shown in [32] that the best focusing of the ion beam occurs not in the region of the geometric focus of the beam formation system, but 2–3 cm behind it. Thus, two modes of irradiation of the simulated pipe were chosen, where the beam focus was located at the end edge of the pipe, and also shifted by 30 mm along the system axis so that the beam focus was inside the extended hole being processed.

According to the presented concentration profiles, it can be seen that, for the most part, the greatest impurity doping depth for all cases was observed at a distance of 2 cm from the edge of the sample. This distribution of the nitrogen impurity was due to the choice of the beam focus at the entrance to the hexagonal tube.

The maximum depth of impurity occurrence at durations of 5, 7.5 and 10 μs was 6-9 μm for all cases and the surface temperature was 400, 515 and 570 $^{\circ}\text{C}$, respectively.

The highest impurity concentration up to 30 at.% was obtained in samples modified for 120 and 80 minutes by high-intensity nitrogen ion beams with pulse durations of 5 and 7.5 μs , respectively (Figures 3.6a and 3.6b). In the case of treatment for 60 minutes with a pulse duration of 10 μs , the maximum concentration was 22 at.%.

It is noteworthy that when processing for 60 minutes and a pulse duration of 10 μs , a more uniform distribution of the impurity was observed, which corresponded to the homogeneous processing of steel (Figure 3.6c). Thus, it can be noted that this mode, despite the lower concentration of nitrogen impurity, corresponds to a more uniform impurity distribution. This mode corresponded to the shortest modification time for samples (60 minutes) of all the proposed processing modes in this series of experiments.

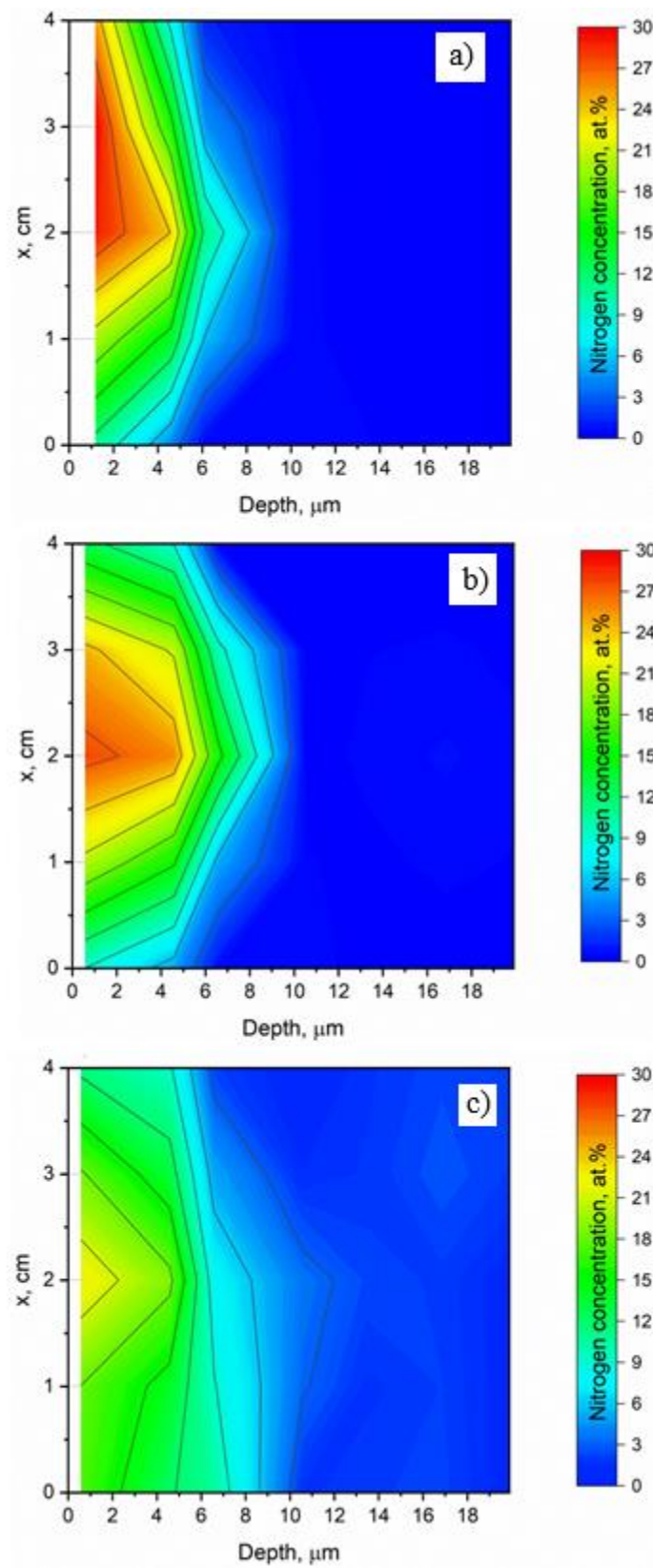


Figure 3.6 - Concentration profiles of nitrogen distribution in depth under the condition of self-compensation of ion sputtering, discharge current 30 A, pulse duration and sample temperature: a) - 5 μs , 400 $^{\circ}\text{C}$; b) - 7.5 μs , 515 $^{\circ}\text{C}$; c) - 10 μs , 570 $^{\circ}\text{C}$

In order to increase the plasma density, the discharge current was increased to 50 A, which leads to an increase in the density of the generated plasma. This contributes to an increase in the number of focused ions per collector assembly. An increase in the number of ions at the collector node corresponds to a higher radiation dose over the same period of time. Large doses contribute to an increase in diffusion due to the impurity concentration gradient. In this case, the collector with a hexagonal tube was displaced along the axis of the beam formation system relative to the focus by 3 cm, so that the focus of the ion beam shifted inside the tube being processed. With this processing mode, the surface temperature of the sample was 615 °C.

Figure 3.7 shows the concentration profile of nitrogen distribution in the sample in depth at a discharge current of 30 A (a) and 50 A (b), with a pulse duration of 10 μ s.

The displacement of the collector led to a displacement of the maximum depth of the nitrogen impurity distribution by 10 mm deeper along the simulated pipe. The impurity depth increased to 12 μ m after increasing the discharge current to 50 A.

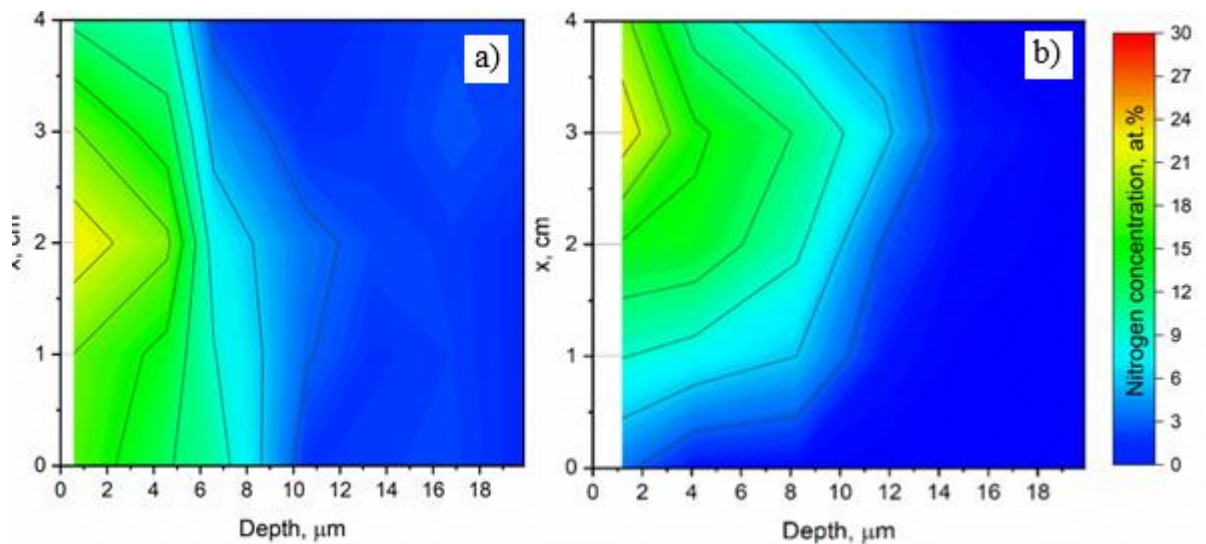


Figure 3.7 - Concentration depth profile of nitrogen at a discharge current of 30 A (a) and 50 A (b), with a pulse duration of 10 μ s

Thus, it is possible to propose an approach to processing the entire length of the simulated pipe, provided that the collector moves along the axis of the beam forming system, which will lead to the modification of more extended holes.

Ion-plasma treatment of the sample surface leads to the formation of modified layers. For a visual representation of the obtained modified layers, SEM images were obtained with a pulse duration of 10 μs , a discharge current of 30 and 50 A. sample edges. The presented images show an ion-modified layer with the greatest thickness in the region of 1 cm from the edge of the sample, which corresponds to the data given in Figure 3.7.

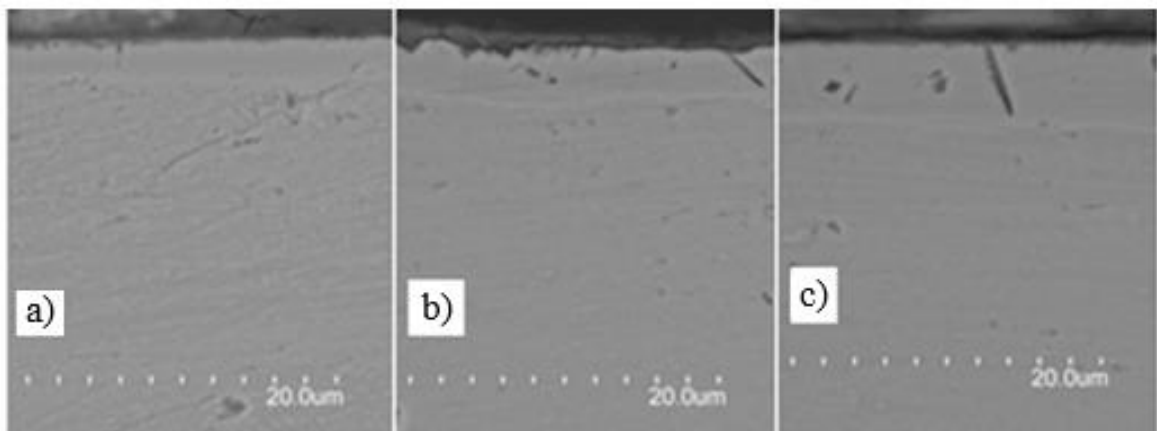


Figure 3.8 - SEM image of a sample section after etching in the case of a discharge current of 30 A, a pulse duration of 10 μs at a distance from the edge of the sample: a) 3 cm, b) 2 cm and c) 1 cm

Figure 3.9 shows SEM images of a sample section after etching in the case of a discharge current of 50 A at a distance of 3, 2, and 1 cm from the edge of the sample. The presented image also shows the formation of a modified layer after ion implantation. The maximum thickness of the formed layer corresponds to an area of 3 cm from the edge of the sample, which corresponds to the data presented in Figure 3.7.

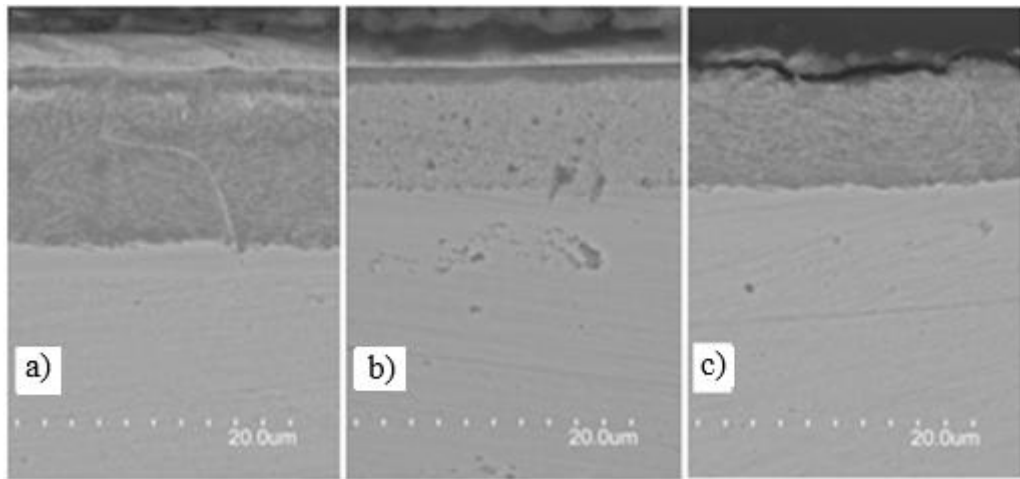


Figure 3.9 - SEM image of a sample section after etching in the case of a discharge current of 50 A, a pulse duration of 10 μ s at a distance from the edge of the sample: a) 3 cm, b) 2 cm and c) 1 cm

It was interesting to check the possibility of simultaneous modification of the inner and end surfaces of the samples due to the partial incidence of the ion beam on the end surface. Figure 3.10 shows the SEM image of the sample section after etching in the case of a discharge current of 50 A from the edge of the sample. The presented image shows the edge of the sample, passing into the end. It can be noted that there is a modified layer along the entire surface of the sample, and the thickness of the modified end layer is greater than the inner surface of the simulated pipe and is about 16 μ m.

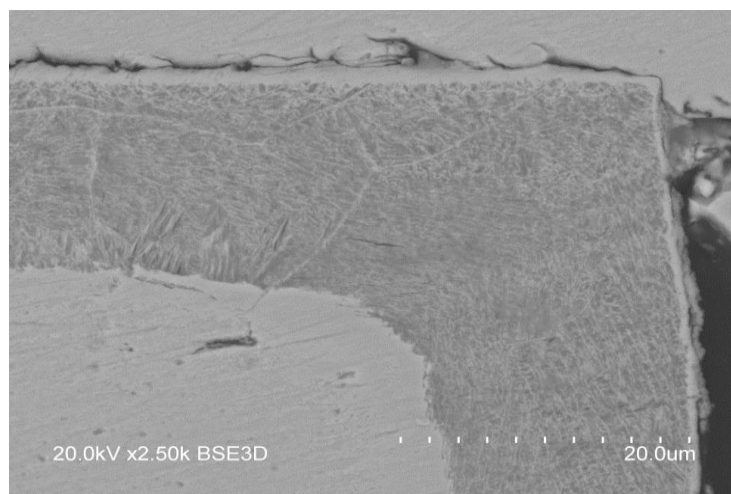


Figure 3.10 - SEM image of a sample section after etching in the case of a discharge current of 50 A, a pulse duration of 10 μ s at the edge of the sample

Figure 3.11 shows the results of mapping the modified layer obtained at a discharge current of 50 A at a distance of 3 cm from the edge of the sample. The results obtained made it possible to see the distribution of nitrogen impurities along the entire modified layer, 12–13 μm thick. The results obtained are correlated with the data presented in Figure 3.9.

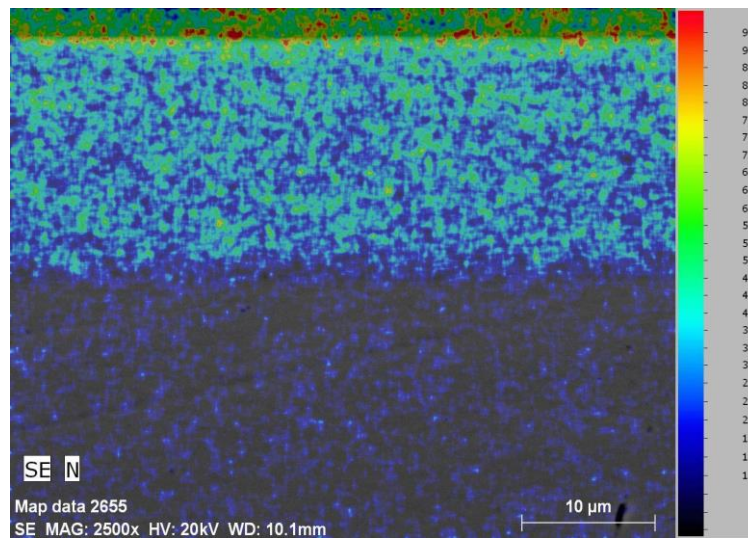


Figure 3.11 - Microstructure of the modified layer in the case of a discharge current of 50 A

3.3 Modification of the Internal Surfaces of Extended Titanium Holes with an Aluminum Ion Beam

To study the features and patterns of high-intensity implantation of metal ions into the inner surface of extended holes in the condition of self-compensation of ion sputtering and its absence, two designs of the sample holder modification were used, Figure 3.12.

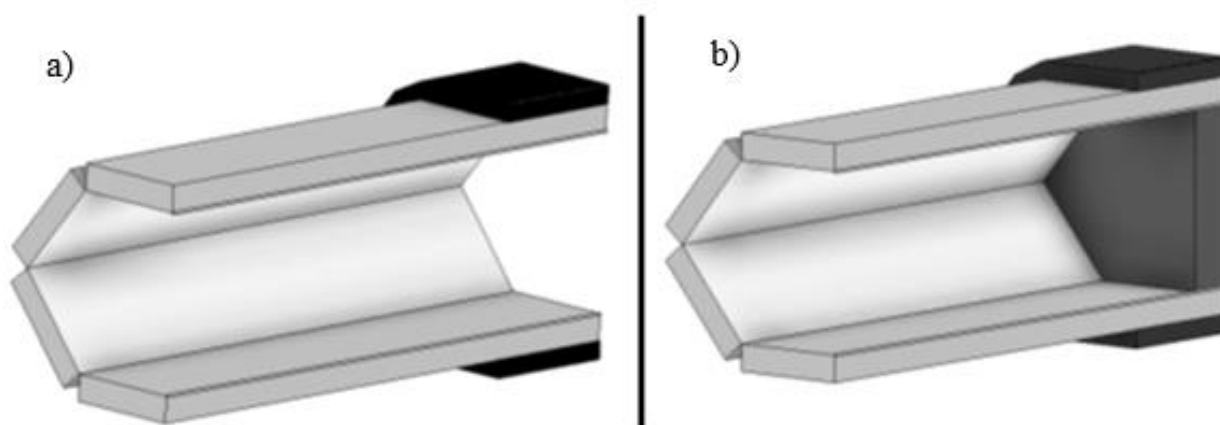


Figure 3.12 - Modification of the sample holder: a) without a bottom; b) with a bottom

This modification of the holder made it possible to simulate the processing of both a through hole 55 mm long without the effect of spraying the bottom of the holder, and the processing of a “cup” 45 mm deep. The distance between opposite plates fixed in the holder was 20 mm. In all experiments, the hexagonal cylinder was installed in such a way that the beam focus was at the entrance to the cylinder, that is, at a distance of 130 mm from the grid electrode. The experiments were carried out at a bias potential amplitude of 1.4 kV, a bias potential pulse repetition rate of 40 kHz, a discharge current of 130 A, and a pulse duration of 10 μ s. The stationary temperature of the samples during the ion treatment was 810 °C. The total processing time in all experiments was 60 minutes.

As samples, we used VT1-0 titanium plates with dimensions of 55×13×2.5 mm³. Aluminum was used as an alloying material. Modification of the titanium substrate with beams of aluminum ions was chosen as a continuation of the work [45], considered in the literature review in the paragraph “high-intensity implantation of metal ions”.

At the first stage, the effect of high-intensity aluminum ion implantation for processing the inner surface of a through hole was studied under the condition of significant ion sputtering of the sample surface without its compensation, Figure 3.9b. For the experiment on a hexagonal holder, only two out of six samples were

used. In this variant, the compensation of ion sputtering due to the deposition of sputter products from other elements and the bottom of the plate holder was excluded. Figure 3.13 shows the concentration profiles of aluminum distribution over the depth of a titanium sample in the absence of ion sputtering compensation. In the presented figure, there is practically no doped layer, which is associated with a significant ion sputtering of the surface. The results presented here correlate with the results obtained when materials are processed with gas ion beams shown in Figure 3.4. During this treatment, the same orientation of the samples was observed as in the case of treatment with gas beams, the same angles of incidence of ions were observed. A slight difference between gas ion beam treatment and metals is the presence of a thin doped layer with a thickness of the order of one micrometer. This is due to the smaller size of nitrogen ions in comparison with aluminum ions, which contributes to greater doping depths of the impurity and a lower sputtering coefficient, Figure 1.14. Another factor may be the possibility of diffusion of nitrogen atoms from the residual atmosphere after the experiment.

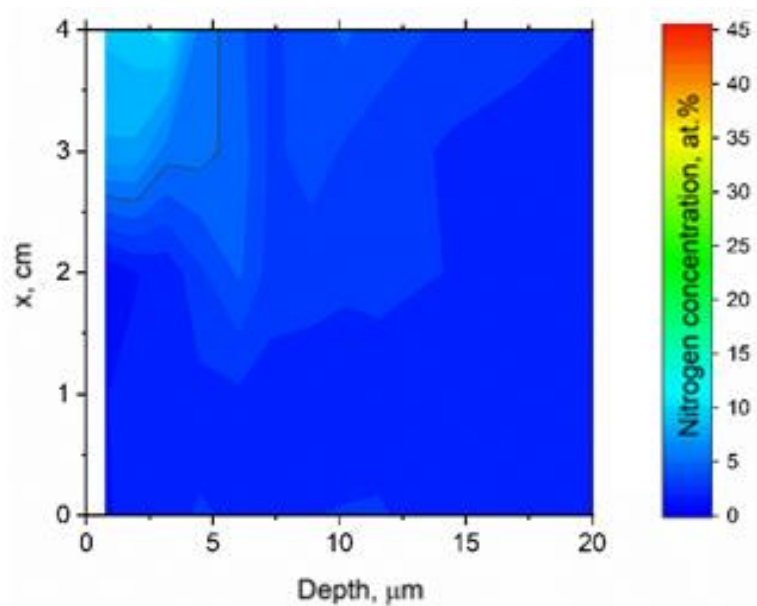


Figure 3.13 - Concentration profiles of the distribution of aluminum impurities over the depth of the titanium sample in the absence of compensation for ion sputtering at a discharge current of 130 A, a pulse duration of 10 μ s and a temperature of 810 $^{\circ}$ C

The next step was to study the high-intensity implantation of the inner surface of the through hole with aluminum ions under the condition of ion sputtering compensation. Figure 3.14 shows the concentration profiles of aluminum distribution over the depth of a titanium sample representing the inner surface of a through hole.

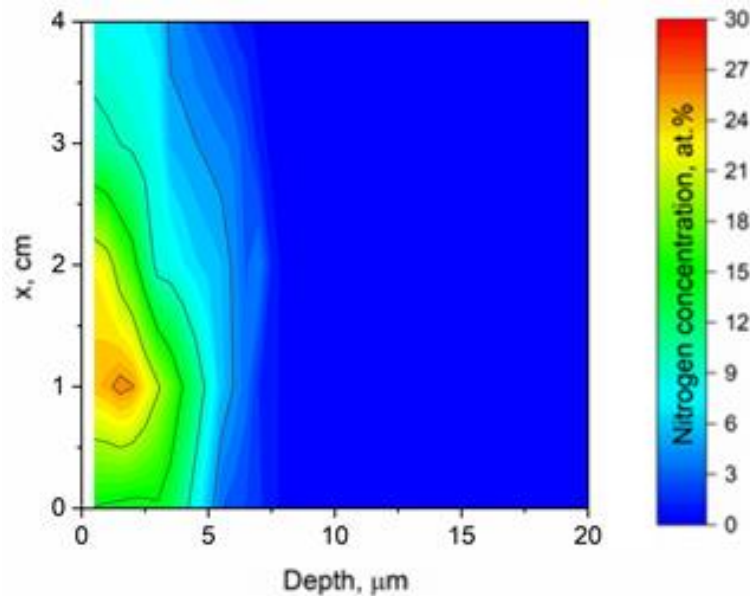


Figure 3.14 - Concentration profiles of the distribution of aluminum impurity over the depth of a titanium sample in the case of self-compensation of ion sputtering at a discharge current of 130 A, a pulse duration of 10 μ s and a temperature of 810 $^{\circ}$ C

In the case of surface treatment of a full through hole, the formation of an implanted layer was observed along the entire length of the hole with a maximum impurity depth of approximately 7.5 μ m and a concentration of more than 20 at.%. One can note the uneven distribution of impurities along the length of the hole. Thus, already at a distance of 25 mm from the entrance to the hole, a striking drop in the aluminum concentration from more than 20 at.% to no more than 10 at.% was observed, as well as a decrease in the depth of the impurity.

The obtained results of the penetration of aluminum impurity into the inner surfaces of the hole being machined differ significantly from the results of processing in the absence of compensation for ion sputtering due to the deposition of the sputtered material. From the data in Figure 3.13, it can be seen that in the

case of processing two plates, there was no formation of an alloyed layer. In this case, the aluminum concentration did not exceed 5 at.%.

In addition to the processing of through holes, studies were carried out on the modification of the internal surfaces of the glass in the case of compensation for ion sputtering due to the deposition of the sputtered material. Model titanium samples were modified under similar processing conditions using a hexagonal cup with the same geometry as the through pipe, but with a 2.5 mm thick titanium plate bottom installed. Figure 3.15 shows the concentration profiles of the distribution of aluminum over the depth of a titanium sample representing the inner surface of the glass.

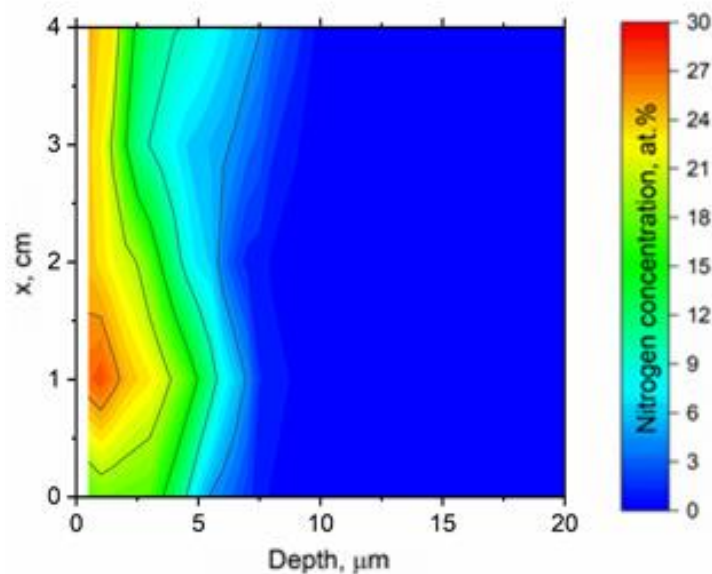


Figure 3.15 - Concentration profiles of the distribution of aluminum impurity over the depth of a titanium sample representing the inner surface of the glass at a discharge current of 130 A, a pulse duration of 10 μ s and a temperature of 810 $^{\circ}$ C

Figure 3.15 shows that the maximum penetration depth of aluminum into the titanium matrix reaches approximately 7.5 μ m at a distance of approximately 10 mm from the hole entry. As a difference, it can be noted that when approaching the bottom of the glass, there is no significant decrease in the maximum concentration and the depth of its penetration. On the contrary, at a depth of 40 mm from the inlet, i.e., near the bottom of the glass, the results of the action

demonstrate, albeit slightly but increase in the thickness of the ion-doped layer compared to similar data obtained by modifying the through hole. This increase in thickness can be associated with the deposition of the sprayed material not only from the opposite walls of the hole, but also from the bottom of the glass. Comparing the data with the result obtained when processing a through hole of the same configuration, it can be immediately noted that the maximum concentration of aluminum, as well as the position of the maximum penetration depth of the impurity, are the same in both cases.

CONCLUSION

In this work, we demonstrate the possibility of implanting nitrogen and aluminum ions using focused high-intensity low-energy beams under conditions of compensation for ion sputtering of the irradiated surface due to the deposition of the sputtered material in the case of processing the inner surface of extended holes.

It has been experimentally shown that the mutual deposition of the sputtered material on opposite sides of the hole surface elements leads to a significant compensation of ion sputtering and an increase in the thickness of the ion-modified layer.

In the case of repetitively pulsed implantation of nitrogen ions with an energy of 1.4 keV and a frequency of 40 kHz, a pulse duration of 10 μ s at a target temperature of 570 °C for 60 min, ion-doped layers were obtained in steel 12Kh18N10T with a maximum thickness of 9 μ m and a fairly uniform impurity distribution over hole length 40 mm, diameter 20 mm.

High-intensity implantation of aluminum ions with an average energy of 2.2 keV at a target temperature of 810 °C for 60 min into the inner surface of an extended hole in VT1-0 titanium made it possible to form an ion-doped layer along the entire length of the hole with a maximum impurity depth of about 7.5 μ m and a concentration of over 20 at.%.

The possibility of uniform ion doping of the inner surface of the hole is shown both due to the selection of the optimal irradiation mode and due to the dynamic displacement of the irradiated part relative to the focus of the ion beam.