



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

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки 03.04.02
ООП/ОПОП Физика конденсированного состояния
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА

Тема работы
Экспериментальное исследование и численное моделирование динамики изменения температурных полей в различных мишенях при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности

УДК 519.876:536.5:621.384.664

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ11	Гурулев Александр Валерьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник НЛВИИ ИШФВП	Иванова А. И.	К.ф.-М.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина В. А.	К.Э.Н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Сечин А. А.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП/ОПОП, должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лидер А.М.	Д.Т.Н., профессор		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП/ОПОП

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 организовать 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
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)-1	Способен применять фундаментальные знания в области физики для решения научно-исследовательских задач, а также владеть основами педагогики, необходимыми для осуществления преподавательской деятельности
ОПК(У)-2	Способен в сфере своей профессиональной деятельности организовывать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую деятельность для поиска, выработки и принятия решений в области физики
ОПК(У)-3	Способен применять знания в области информационных технологий, использовать современные компьютерные сети, программные продукты и ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (далее – сеть «Интернет») для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами профильной подготовки
ОПК(У)-4	Способен определять сферу внедрения результатов научных исследований в области своей профессиональной деятельности
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики конденсированного состояния и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта
ПК(У)-2	Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения задач в профессиональной области и применять результаты научных исследований в проектной деятельности.
ПК(У)-3	Способен планировать и проводить фундаментальные исследования по проектам в области ядерно-физических исследований, взаимодействия излучения с веществом, модернизации современных и создания новых методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел
ПК(У)-4	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научных исследований
ПК(У)-5	Способен методически грамотно строить планы лекционных и практических занятий по разделам учебных дисциплин и публично излагать теоретические и практические разделы дисциплин в соответствии с утвержденными учебно-методическими пособиями при

	реализации программ бакалавриата в области физики
ПК(У)-6	Способен руководить научно-исследовательской деятельностью в профессиональной области обучающихся по программам бакалавриата



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

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.04.02 Физика
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП/ОПОП
_____ Лидер А.М.
(Подпись) (Дата) (ФИО)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающийся:

Группа	ФИО
ОБМ11	Гурулев Александр Валерьевич

Тема работы:

Экспериментальное исследование и численное моделирование динамики изменения температурных полей в различных мишенях при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности	
<i>Утверждена приказом директора (дата, номер)</i>	<i>№ 142-9/с от 22.05.2023</i>

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:	06.06.2023
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к функционированию (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.)</i></p>	<p>Объектом исследования являются высокоинтенсивные пучки ионов титана. Целью работы является исследование динамики изменения температурных полей в различных мишенях при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности</p>
<p>Перечень разделов пояснительной записки подлежащих исследованию, проектированию и разработке <i>(аналитический обзор литературных источников с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе)</i></p>	<p>– Литературный обзор – Численное моделирование динамики изменения температурных полей – Экспериментальное исследование распределения плотности тока пучка ионов титана – Сравнительный анализ численного моделирования и экспериментальных данных – Социальная ответственность – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>

	– Заключение
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Маланина Вероника Анатольевна, Доцент ОСГН
Социальная ответственность	Сечин Андрей Александрович, Доцент ООД ШБИП
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Глава 2. Экспериментальное оборудование и методики исследования	

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

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник НЛВИИ ИШФВП	Иванова А. И.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	Гурулев Александр Валерьевич		



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

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (ООП/ОПОП) 03.04.02 Физика
Уровень образования магистратура
Отделение школы (НОЦ) отделение экспериментальной физики
Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2022/2023 учебного года)

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

Обучающийся:

Группа	ФИО
ОБМ11	Гурулев Александр Валерьевич

Тема работы:

Экспериментальное исследование и численное моделирование динамики изменения температурных полей в различных мишенях при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности

Срок сдачи обучающимся выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.09.2022	Аналитический обзор литературы	15
25.12.2022	Численное моделирование динамики изменения температурных полей	15
05.02.2022	Экспериментальное исследование распределения плотности тока	20
30.04.2023	Сравнительный анализ результатов	15
01.05.2023	Социальная ответственность	15
01.05.2023	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
25.05.2023	Заключение	5

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник НЛВИИ ИШФВП	Иванова А.И.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП/ОПОП

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

Обучающийся

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	Гурулев Александр Валерьевич		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертационная работа 102 страницы, 25 рисунков, 21 таблица, 40 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: высокоинтенсивные пучки ионов титана, математическое моделирование, температурные градиенты, пучки субмиллисекундной длительности, ионы низкой энергии.

Объектом исследования являются высокоинтенсивные пучки ионов титана и их влияние на динамику изменения температурных полей в мишенях из алюминия и кремния.

Целью данной работы является исследование динамики изменения температурных полей в различных мишенях при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности.

В данной работе впервые получены результаты численного исследования динамики изменения температурных полей в мишенях из кремния и алюминия при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности.

Область применения: результаты исследований могут быть применены для уменьшения времени поиска оптимальных режимов исследований по модификации материалов методом ионной имплантации.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в уменьшении затрат при проведении физических экспериментов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	13
1.1. Основные принципы формирования и применение высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов.....	13
1.2 Модификация поверхности методами ионной имплантации.....	19
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	25
2.1 Схема экспериментальной установки.....	25
2.2 Система формирования высокоинтенсивных ионных пучков.....	27
2.3 Методика эксперимента	28
2.3.1 Изготовление образцов	29
2.3.2 Измерение температуры образцов.....	29
2.4 Численное моделирование динамики изменения температурных полей	30
ГЛАВА 3. ОПИСАНИЕ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	34
3.1 Экспериментальное исследование распределения плотности тока пучка ионов титана	34
3.2 Исследование зависимости ионного тока на сплошной коллектор от ускоряющего напряжения	36
3.4. Численное моделирование динамики изменения температурных полей в мишенях из алюминия и кремния при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов титана.....	40
3.4.1 Моделирование температурных полей в мишенях из алюминия	40
3.4.2 Моделирование температурных полей в мишенях из кремния.....	44
3.5 Сравнительный анализ численного моделирования и экспериментальных данных	46
ГЛАВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	51
4.1 Предпроектный анализ	52

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	52
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений	53
4.1.3 SWOT – анализ	55
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	57
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	57
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	58
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	60
4.3 Бюджет научно-технического исследования	64
4.3.1 Расчёт материальных затрат исследования	64
4.3.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ	64
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей исследования	66
4.3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	67
4.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	67
4.3.6. Расчет затрат на научные и производственные командировки.....	68
4.3.7. Накладные расходы (расчёт затрат на электроэнергию).....	68
4.3.8. Формирование бюджета затрат.....	69
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования..	69
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	72
ГЛАВА 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	75
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	75
5.2 Производственная безопасность	76
5.3 Экологическая безопасность.....	84
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	85
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	90
Приложение А	94

ВВЕДЕНИЕ

Модификация поверхности является одним из наиболее распространенных методов изменения свойств материалов и изделий, так как во многих случаях для улучшения общих характеристик детали достаточно изменить свойства поверхности [1-5].

Ионная имплантация является важным методом модификации поверхности материалов. Он обладает уникальными свойствами и способен к контролируемому изменению элементного, фазового составов, а также микроструктуры поверхности материала. Пучки ионов высокой плотности мощности субмиллисекундной длительности за счет высоких скоростей нагрева и последующего охлаждения приповерхностных слоев обеспечивают модификацию различных сплавов и металлов на глубинах до нескольких десятков микрометров. Основной процесс модификации материала зависит от эффекта сверхскоростной закалки и отсутствия изменений в элементном составе вещества. Основным ограничением ионной имплантации в качестве метода модификации свойств металлов является малый проективный пробег ионов, в последствии толщина ионно-легированного слоя незначительна.

Применение методов высокоинтенсивной низкоэнергетической имплантации пучков ионов высокой плотности мощности позволило получить ионно-легированный слой толщиной в десятки микрометров [6]. Главным недостатком данного метода выступает деградация микроструктуры материалов, за счет нагрева всего образца до высоких температур.

Новый метод, описанный в работе [7], одновременно сохраняет преимущества высокоинтенсивной имплантации и решает проблему высокотемпературной деградации микроструктуры обрабатываемой мишени. В его основе лежит использование высокоинтенсивных пучков ионов субмиллисекундной длительности с плотностью мощности до нескольких сотен киловатт на сантиметр квадратный. Импульсно-периодический режим создает импульсный нагрев с последующим высокоскоростным охлаждением

приповерхностного слоя, за счет быстрого отвода тепла вглубь материала мишени. За счет этого можно добиться одновременно высокой температуры в ионно-модифицируемом слое и избежать высоких температур во всем объеме материала [8].

Возможность образования глубоко модифицированных слоев в сплавах и металлах за счет повышения радиационно-стимулированной диффузии имплантируемых атомов, благодаря высокой температуре и высокой плотности ионного тока, демонстрируется в работах [9–12].

В тоже время, моделирование физических процессов является незаменимым инструментом при исследовании закономерностей и особенностей различных физических процессов в условиях замены реального эксперимента моделью, подобным оригиналу. Предварительное математическое моделирование позволит сократить время исследования при проведении физического эксперимента. В данной работе впервые получены результаты численного исследования динамики изменения температурных полей в мишенях из кремния и алюминия при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности.

Целью данной работы является исследование динамики изменения температурных полей в различных мишенях при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности.

Для решения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Провести численное моделирование и экспериментальное исследование динамики изменения температурных полей в зависимости от плотности мощности ионного пучка титана субмиллисекундной длительности для образцов из алюминия и кремния;
- Выполнить сравнительный анализ полученных данных.

На защиту выносится следующее положение:

Впервые получены результаты численного исследования динамики изменения температурных полей в мишенях из кремния и алюминия при

воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности с плотностью мощности, достигающей до 35 кВт/см^2 . Определены условия облучения, обеспечивающие нагрев приповерхностного слоя до высоких температур в импульсном или импульсно-периодическом режимах с обеспечением сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения приповерхностного слоя материала.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Основные принципы формирования и применение высокоинтенсивных пучков ионов металлов и газов

Ионная имплантация позволяет управляемо изменять микроструктуру, элементный состав и свойства приповерхностных слоев материалов. Принципы формирования высокоинтенсивных ионных пучков впервые были разработаны коллективом Научной лаборатории высокоинтенсивной ионной имплантации Томского политехнического университета, описанные в [9]. В данной статье представлен метод, сочетающий в себе плазменно-иммерсионную и традиционную лучевую имплантацию. Формирование пучка происходит за счет плазменно-иммерсионного вывода ионов из плазмы с использованием баллистической фокусировки в дрейфовом эквипотенциальном пространстве, предварительно заполненном плазмой. Основные элементы системы формирования пучка представлены на рисунке 1.1.

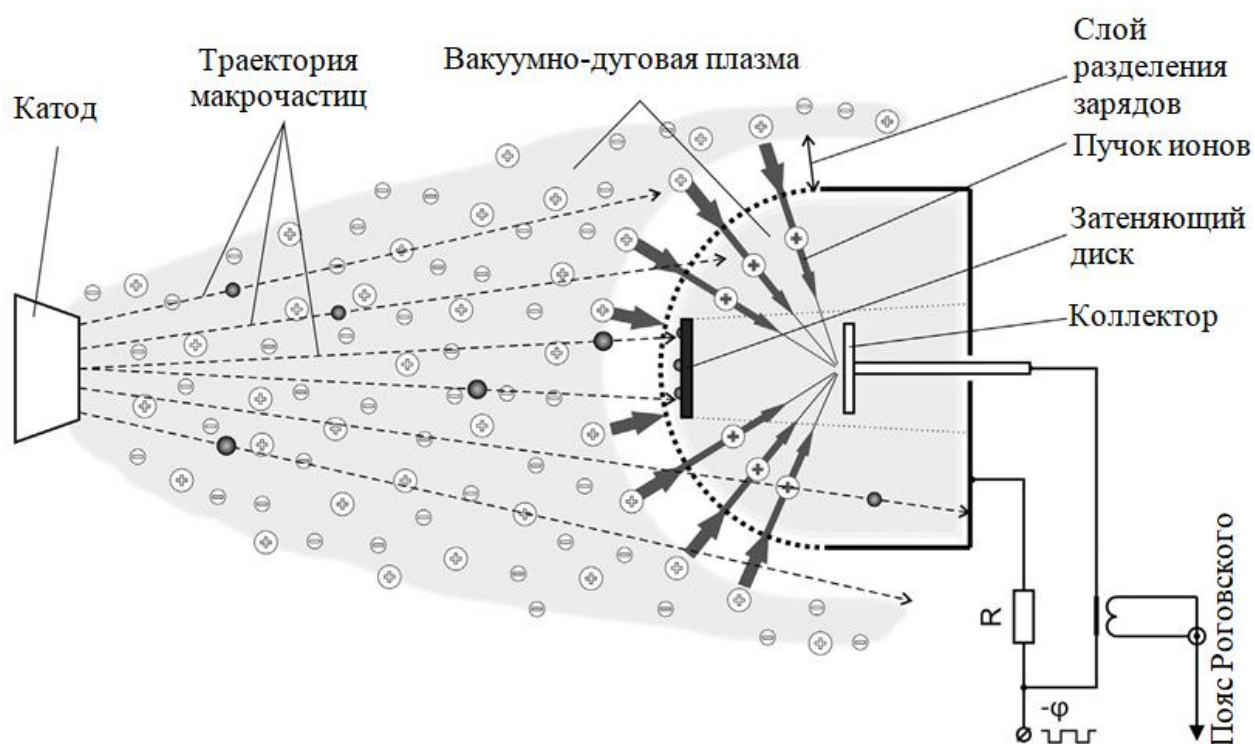


Рисунок 1.1 – Схема формирования высокоинтенсивных низкоэнергетических пучков ионов металлов [9]

Сетчатый электрод, выполненный в виде части сферы содействует баллистической фокусировке пучка ионов, направленного на коллектор. Геометрический центр сферы является точкой фокуса пучка. Эквипотенциальное пространство для транспортировки пучка ограничивается объемом сетчатого и цилиндрического электродов. Внутри цилиндрического электрода, напротив геометрического центра сетчатого электрода располагается коллектор и датчики. Импульсный потенциал смещения, приложенный к системе фокусировки, обеспечивает транспортировку и ускорение ионов в эквипотенциальном пространстве дрейфа.

Использование вакуумно-дугового разряда для формирования плазмы приводит к образованию значительного потока макрочастиц [13], за счет взрывоэмиссионных процессов на титановом катоде. Макрочастицы оказывают негативное влияние на формирование пучков ионов, на прозрачность сетчатого электрода, загрязняя его и на качество обработанных поверхностей [14]. Для нивелирования воздействия макрочастиц на обрабатываемую ионным пучком область подложки в работе [9] воспользовались эффектом «солнечного затмения». Другими словами в области фокусировки находился металлический экран, который препятствовал осаждению макрочастиц.

Макрочастицы с практически прямолинейными траекториями движения, направленные в область коллектора задерживаются дисковым электродом. Ионы пучка, благодаря баллистической фокусировке за счет сетчатого электрода, свободно попадают в облучаемую область образца по прямолинейным траекториям. Использование данного эффекта позволяет избежать попадания макрочастиц в области следа ионного пучка и на поверхность подложки, что было доказано результатами экспериментов в статье [9]. Рисунок 1.2 демонстрирует влияние применения дискового электрода на количество макрочастиц на поверхности подложки.

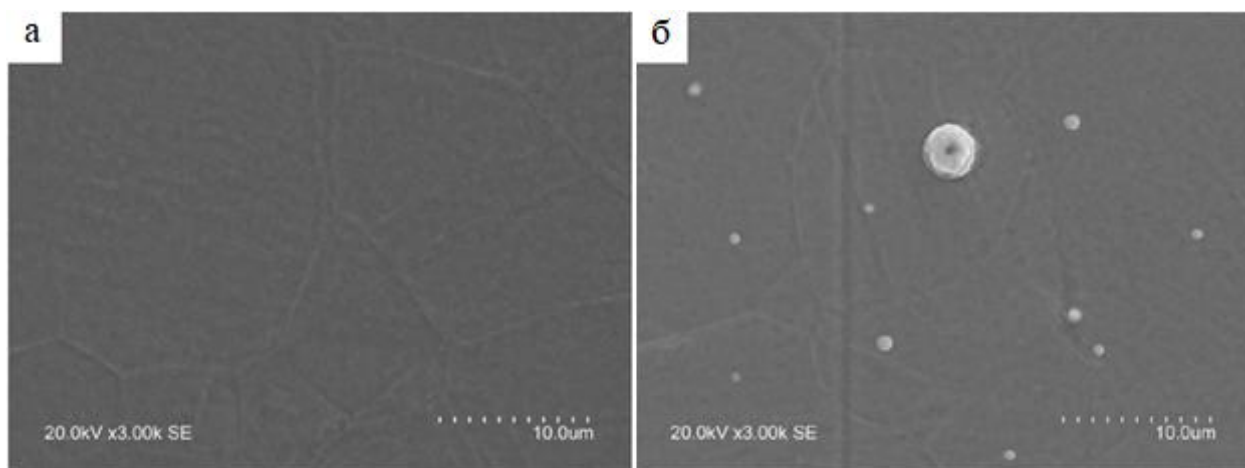


Рисунок 1.2 – СЭМ-изображения поверхности подложки, обработанные ионным пучком: а – используя дисковый электрод; б – без него [9]

Как видно из рисунка 1.2, применение дискового электрода значительно уменьшает количество макрочастиц на поверхности образца.

Результаты серии экспериментов выявили особенности формирования высокоинтенсивных пучков ионов титана в зависимости от длительности импульса потенциала смещения на сеточный электрод, радиуса сетчатого электрода и амплитуды потенциалов смещения. Оптимальные условия для формирования пучка наблюдаются при максимальной амплитуде тока и максимальном ускоряющем напряжении, с коллектором расположенном в фокусе системы.

Увеличение радиуса сетчатого электрода от 7.5 до 10.5 см уменьшает амплитуду ионного тока в зависимости от длительности импульсов потенциала смещения. Это происходит из-за снижения эффективности переноса пучка в пространстве дрейфа [15].

Плотности тока не более 100 mA/cm^2 при энергии ионов 10–100 кэВ являются стандартными параметрами для традиционной ионной имплантации [16]. Однако эти режимы позволяют получать модифицированные поверхностные слои материала толщиной, не более микрометра [6].

При формировании глубоко ионно-модифицированных слоев в металлах метод, основанный на увеличении глубины проникновения атомов за счет их радиационно-стимулированной диффузии в твердом теле, является наиболее перспективным. [9, 17, 18].

Основное отличие данного метода это предварительный нагрев имплантируемой поверхности. Для каждого материала подбирается определенная температура предварительного нагрева, при которой будет происходить ускорение диффузии имплантируемой легирующей примеси, что в конечном итоге приведет к увеличению толщины модифицированного слоя. При этом выбор температуры предварительного нагрева выбирается таким образом, чтобы не происходил рост зеренной структуры выбранного в качестве образца материала.

Использование низкоэнергетических ионов при имплантации приводит к модифицированным слоям с более высокими концентрациями имплантируемых примесей, за счет чего можно получить значительное улучшение свойств поверхности [6].

Далее рассмотрим особенности аксиально-симметричных пучков ионов азота. В работе [19] описано формирование высокоинтенсивных пучков низкоэнергетических ионов азота в сталь AISI 5140 (аналог стали 40X). Основой комбинированного метода формирования высокоинтенсивных пучков ионов газа низкой энергии, является совокупность плазменно-иммерсионного вывода ионов с границ плазмы и их последующее ускорение в высоковольтной оболочке. Ионные пучки фокусируются при транспортировке в замкнутом дрейфовом эквипотенциально пространстве смещенного электрода в условия полной или частичной нейтрализации пространственного заряда. Другими словами, данная баллистическая система, погруженная в плазму, одновременно и переносит и фокусирует пучок.

Извлеченные из плазмы ионы, ускоряясь в высоковольтной оболочке, при приложении отрицательного смещения собираются перед сетчатым

электродом. В данном случае сетчатый электрод является экстрактором ионов. Пройдя через сетчатый электрод, ионы, попадая в дрейфовое пространство, направляются к коллектору.

Условия нейтрализации пространственного заряда влияют на эффективность как транспортировки, так и фокусировки высокоинтенсивных ионных пучков. Заблаговременная инъекция плазмы в дрейфовое пространство в интервалах импульсов смещения и ионизации остаточного газа нейтрализует баллистически сфокусированный пространственный заряд.

Высокоинтенсивная имплантация ионов азота сопровождалась ионным распылением поверхности образцов. Максимальная глубина кратеров наблюдалась в точке максимального распределения плотности тока ионного пучка. Также глубина кратера прямо пропорциональна температуре образца. Чем выше температура, тем больше глубина кратера, рисунок 1.3 [19].

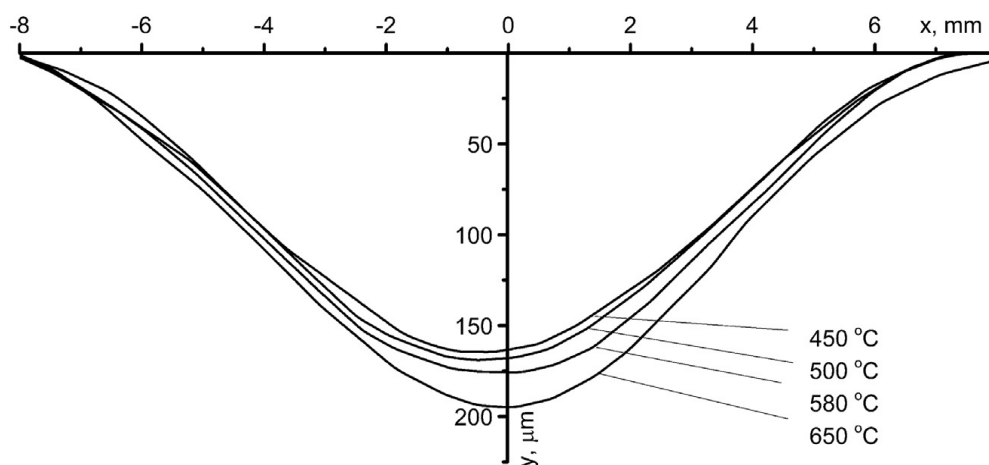


Рисунок 1.3 – Профили поверхностей обработанных образцов.

Данные, полученные в этой работе, показывают, что толщина модифицированного слоя при использовании метода высокоинтенсивной ионной имплантации достигает десятков и сотен микрометров. При температуре имплантации в 500 °C была получена максимальная глубина модифицированного слоя на расстоянии 4 мм от центра области имплантации ионного пучка с плотностью тока 0.3 A/cm^2 и составляет 180 мкм. В центре ионного пучка глубина модифицированного слоя равняется 100 мкм. Однако при повышении температуры имплантации до

650 °С максимальная концентрация азота уменьшалась с 15 до 3-5 ат.%, с максимальной толщиной модифицированного слоя, не превышающего 10 мкм.

Таким образом, формирование глубоких ионно-модифицированных слоев азота зависит от температуры имплантации, определяющей диффузию азота в материале.

Формирование ионно-газовых пучков высокой интенсивности проходит с ионизацией газа ионами этого пучка и одновременным образованием «пучковой плазмы». Этот процесс является ключевым моментом при нейтрализации пространственного заряда пучка, что позволяет получать стабильные ионные пучки. Другими словами, во время формирования пучков ионов газа не требуется предварительное заполнение плазмой дрейфового пространства.

Помимо аксиально-симметричного применяют ленточные пучки. Данного рода пучки применяются для ионно-лучевой обработки поверхностей протяженных изделий. Отличием формирования ленточного от остросфокусированного аксиально-симметричного пучка является использование сетчатого электрода, изготовленного в форме цилиндрической части. Благодаря подобной геометрии фокусирующего электрода можно обеспечить формирование ленточного ионного пучка, длина которого будет ограничена лишь областью плазмы, создаваемой источников, а также добиться меньшей плотности ионного тока в фокальной плоскости [20]. Плюсом таких ленточных пучков является высокая стабильность по амплитуде ионного тока и длительность импульса. Внешний вид системы фокусировки ленточных пучков представлен на рисунке 1.4.

Цилиндрическая геометрия позволяет получить однородные ионные пучки с площадью поперечного сечения в несколько десятков квадратных сантиметров, что потенциально может быть использовано в методе высокоинтенсивной низкоэнергетической ионной имплантации.



Рис. 1.4 – Внешний вид системы фокусировки ленточных пучков [21]

В статье [21] показана возможность формирования протяженных импульсно-периодических пучков низкоэнергетических ионов газа с высокой плотностью тока. Также впервые продемонстрирована возможность формирования ленточного пучка азота высокой плотности с помощью системы формирования с сетчатым электродом, выполненным в виде части цилиндра.

1.2 Модификация поверхности методами ионной имплантации

Для модификации поверхности часто используют методы, основанные на изменении фазового и элементного составов поверхностных слоев материалов. Одним из таких методов является ионная имплантация.

Статья [20] демонстрирует обработку образцов из титанового сплава VT1-0 сформированными при ускоряющем напряжении до 2 кВ пучками ионов азота, при разрядном токе 50 А и коэффициенте заполнения 40%. Также показано, что при обработке импульсными низкоэнергетическими пучками ионов азота в течение часа на поверхность воздействует интенсивное ионное распыление с образованием кратеров. Максимальная глубина кратера замечена при коэффициенте заполнения 80% и разрядном

токе 20 А и достигает 25 мкм. Увеличение скважности импульса приводит к увеличению глубины кратера и уменьшению его ширины.

В противовес этому твердость поверхности увеличилась до двух с половиной раз. Тем не менее, максимальная твердость поверхности достигается на краях кратера распыления. Этот процесс зависит от температуры поверхности образца и локальной плотности ионного пучка.

В статье [21] доказывается, что при имплантации низкоэнергетических ионов азота в сталь AISI 321, поверхность образцов также подвергается ионному распылению с образованием кратеров, профиль которых зависит от энергии ионного пучка и эффективности его фокусировки. Тем не менее использование данных параметров позволило добиться увеличения показателя твердости до четырех раз за час обработки. Это связано с образованием на поверхности образца модифицированного слоя, содержащего нитриды хрома и железа. В этой статье было доказано, что максимальная твердость может быть получена не только по краям, но и в центре кратера.

Анализ параметров в полученных результатах по обработке поверхности образца, таких как толщина модифицированного слоя и глубина кратера, позволяет утверждать, что использование метода имплантации низкоэнергетических ионов азота позволяет создавать условия, при которых увеличение плотности ионного тока ведет к увеличению толщины модифицированного слоя даже при увеличении эффективности ионного распыления.

В статье по модификации нержавеющей стали высокоинтенсивной имплантацией ионов азота низких энергий [22] продемонстрировано влияние неоднородности радиального распределения плотности ионного тока по сечению пучка на образование кратера распыления на поверхности образца.

Увеличение плотности ионного тока приводит к увеличению скорости и коэффициента диффузии имплантированных атомов вглубь поверхности образцов. Минусом является то, что при увеличении плотности ионного тока

также пропорционально возрастает и ионное распыление поверхности. Профили поперечного сечения поверхностей образцов демонстрируют увеличение глубины кратера при увеличении времени и плотности энергии при ионной модификации образца. Исходя из этого, основным факт, влияющий на глубину диффузии легирующей примеси, является высокая плотность ионного тока.

Высокоинтенсивная имплантация сверхвысокими дозами ионов азота с продолжительностью 60 мин в высокохромистую мартенситную сталь при температуре 500 °С позволила достичь толщины модифицированного слоя в 90 мкм [23]. Средний размер частиц нитридных фаз достигает 40-50 нм. Это свидетельствует о высокодисперсной структуре модифицированного слоя. Максимальная микротвердость приповерхностного слоя стали AISI 420 наблюдается в поверхностном слое металла и коррелирует с распределением азота по глубине мишени.

Применение низкоэнергетической сильноточной имплантации ионов азота в статье [19] позволило улучшить микротвердость нержавеющей стали марки AISI 5140 после обработки в течение часа в 2 раза. При этом формировался ионно-легируемый слой толщиной до 200 мкм, с повышением износостойкости в 7.5 раза, с сохранением исходной твердости образца. В статье также продемонстрировано, что при использовании сильноточной имплантации низкоэнергетических ионов азота можно управлять температурой образца за счет изменения скважности импульса смещения без изменения значения амплитуды смещения или разрядного тока. Кроме того, в данной работе обработка проводилась при одних и тех же параметрах луча, но при разных температурах поверхности мишени. Было продемонстрировано, что максимальная глубина проникновения примеси, а также концентрация достигает 15 ат.% и 180 мкм соответственно при температуре 500 °С. Тем не менее, при обработке с температурой 650 °С концентрация примеси азота составила 3-5 ат.%, а глубина проникновения

примеси достигала не более 10 мкм. Другими словами, эффективность насыщения поверхностного слоя азотом определяет температура.

В статье [24] продемонстрировано влияние толщины модифицированного слоя титана от температуры имплантации в образце алюминия. Ионно-легированный слой толщиной примерно 400 нм формируется при температуре 350 °С. Толщина модифицированного слоя увеличивается до 700 нм и до 6 мкм, при температурах имплантации 450 и 550 °С, соответственно. СЭМ-изображения поперечного сечения образцов алюминия, легированного титаном представлены на рисунке 1.5.

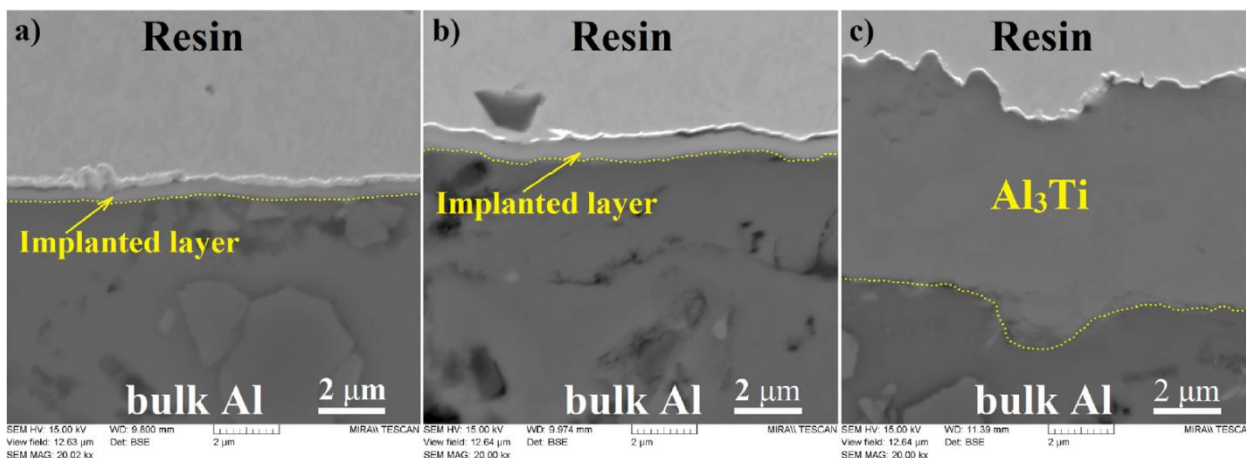


Рисунок 1.5 – СЭМ - изображения поперечного сечения образцов алюминия имплантированных титаном при температурах: а–350 °С; б–450 °С; в–550 °С

Как видно на рисунке 1.5 при увеличении температуры имплантации увеличивается и толщина модифицированного слоя.

Концентрации имплантированных атомов титана в образцах из алюминия были получены при помощи энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Результаты представлены на рисунке 1.6.

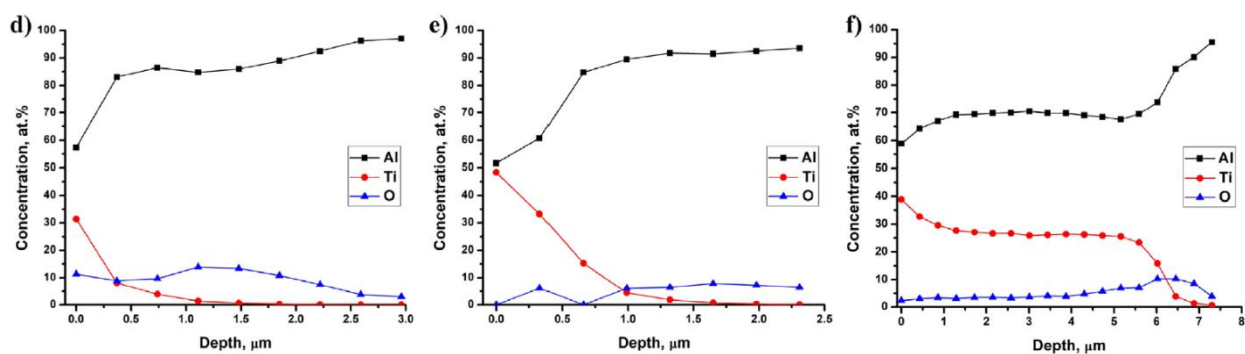


Рисунок 1.6 – Концентрации имплантированных атомов титана в образцах алюминия при температурах имплантации: а–350 °С; б–450 °С; в–550 °С [24]

Увеличение температуры имплантации также приводит к увеличению концентрации имплантируемых атомов по глубине.

Таким образом, большинство методов модификации поверхности основаны на энергетическом воздействии электронных, ионных и плазменных потоков на поверхность твердого тела. Ионная имплантация может изменять элементный состав поверхностного слоя мишени, так как глубины проективных пробега ионов очень малы. Метод, предложенный в работе [25] продемонстрировал возможность формирования глубоких ионно-легированных слоев толщиной от десятков до сотен микрометров. В этих же работах отмечается, что для реализации метода требуется не только увеличение плотности ионного тока на несколько порядков, но и температуры мишени, приближающейся к тысяче градусов Цельсия. У многих материалов при таких температурах наблюдается катастрофический рост зерна, который приводит к ухудшению эксплуатационных свойств материалов. В работе [7] предложен метод синергии высокоинтенсивной имплантации ионов и энергетического воздействия на поверхностный слой мишени. Быстрый импульсный нагрев поверхности мишени при воздействии ионного пучка с последующим сверхбыстрым охлаждением после окончания импульса обеспечивает возможность увеличения температуры поверхности почти до температуры плавления с соответствующим увеличением радиационно-стимулированной диффузии и сохранением низкой средней

температурой мишени. Для реализации этого метода необходимы пучки ионов металлов и газов с плотностью мощности в десятки, а иногда и сотни $\text{кВ}/\text{см}^2$.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию формирования пучков ионов титана высокой плотности мощности и численному моделированию динамики изменения температурных полей при воздействии мощного ионного пучка субмиллисекундной длительности на подложки из кремния и алюминия.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Схема экспериментальной установки

Исследования осуществлялись на комплексной технологической установке для ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов. Данная комплексная установка состоит из: системы контроля степени вакуума, вакуумной камеры, высоковакуумного турбомолекулярного насоса, форвакуумного пластинчато-роторного насоса, системы формирования высокоинтенсивных пучков ионов, системы контроля степени вакуума, системы детектирования сигналов и генератора плазмы. Схема установки приведена на рисунке 2.1.

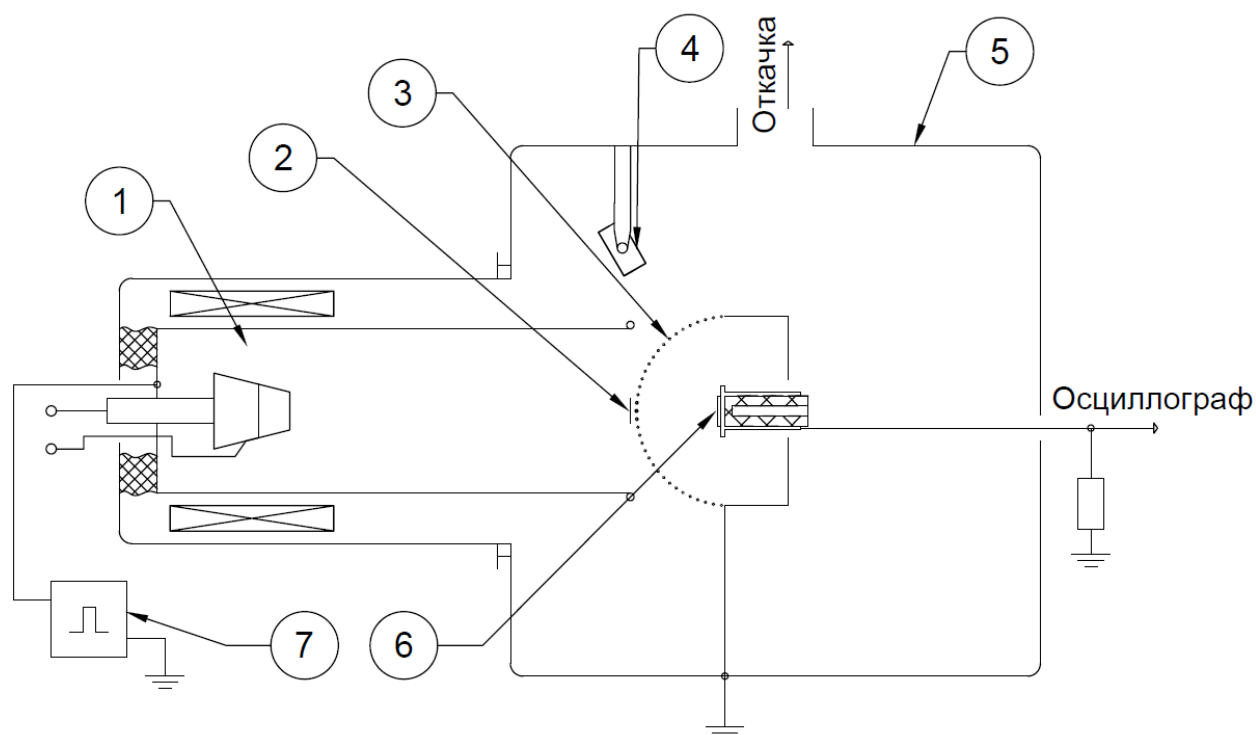


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки: 1 – Вакуумно-дуговой генератор плазмы; 2 – отсекающий электрод; 3 – сеточный электрод; 4 – импульсный пирометр; 5 – вакуумная камера; 6 – образец; 7 – импульсно-периодический высоковольтный генератор.

В качестве генератора плазмы, использовался вакуумно-дуговой генератор плазмы ионно-плазменного источника «Радуга-5». Данный источник позволяет проводить плазменно-стимулированное осаждение, а также нагревать мишень ионным пучком до необходимой температуры. Одна из особенностей источника «Радуга-5» – сочетание непрерывного потока плазмы генерируемого вакуумной дугой и периодического формирования импульсного пучка ионов металлов. Генератор импульсного напряжения данного источника с длительностью импульсов в диапазоне от 150 до 500 мкс и амплитудой до 40 кВ обеспечивает ускорение ионов. Источник «Радуга-5» представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Источник непрерывной газоразрядной плазмы с нагреваемым катодом «Радуга-5».

Источник ионной плазмы «Радуга-5» состоит из источника плазмы вакуумной дуги на парах металлов, зоны формирования плазмы и набора сеток для вывода ионов. Генерация пучка ионов осуществляется с помощью импульсно-периодического вакуумного дугового разряда. Для инициирования разряда на пусковой электрод подается положительное напряжение, в результате чего на холодном катоде образуется катодное пятно из-за пробоя на поверхности керамического изолятора,

расположенного между катодом и запускаящим электродом. Расширяющаяся плазма перемещается от катодного пятна к аноду.

После предварительной откачки остаточное давление атмосферы в вакуумной камере перед началом опытов составляло 10^{-3} Па.

2.2 Система формирования высокоинтенсивных ионных пучков

В основе формирования импульсно-периодических высокоинтенсивных газовых ионных пучков лежит плазменно-иммерсионная экстракция, ускорение ионов плазмы в высоковольтной оболочке и их последующая баллистическая фокусировка в эквипотенциальном пространстве дрейфа [9].

Экстракция ионов и их баллистическая фокусировка плазменно-иммерсионным методом осуществляется системой формирования ионного пучка. Данная система состоит из сетчатого электрода, соединенного с цилиндрическим электродом, служащего для обеспечения замкнутого эквипотенциального пространства в области дрейфа пучка. Сетчатый электрод выполнен в виде части сферы радиусом 130 мм. Такая форма обеспечивает баллистическую фокусировку газовых ионных пучков. Размер ячейки сетки составлял 1×1 мм² с прозрачностью 64%. Образцы для облучения расположены в геометрическом фокусе системы фокусировки. На рисунке 2.3 представлен внешний вид системы формирования пучка.



Рисунок 2.3 – Система формирования высокоинтенсивных ионных пучков

Для очистки плазмы от микрокапельной фракции используется система «солнечного затмения». Данная система представляет собой дисковый электрод, располагающийся по центру фокусирующего сетчатого электрода. Дисковый электрод препятствует прямому пролету макрочастиц вакуумного дугового разряда с рабочей поверхности катода в область фокусировки пучка.

2.3 Методика эксперимента

Для определения распределения ионного пучка использовался секционированный цилиндр Фарадея, состоящий из девятнадцати отдельных коллекторов. Он располагался вместо мишени в зоне воздействия пучка. Коллектор имеет механизм перемещения, что позволяет размещать секционированный цилиндр Фарадея относительно геометрического фокуса системы фокусировки. Внешний вид секционированного цилиндра Фарадея представлен на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Секционированный цилиндр Фарадея

Совокупность большого количества коллекторов и использования двух четырехканальных цифровых осциллографов Rigol MS01104, привели к тому, что сигнал с них считывался группами по 6 коллекторов. Таким

образом, получилось 3 группы коллекторов по 6 и одна группа, состоящая из одного девятнадцатого коллектора.

Предварительное заполнение пространства дрейфа плазмой титана обеспечивает непрерывный режим дугового испарителя, что способствует нейтрализации пространственного заряда импульсного ионного пучка в процессе его генерации и транспортировки. Генерация пучка осуществлялась в импульсно-периодическом режиме с помощью генератора импульсного напряжения с длительностью импульсов 500 мкс, с варьированием амплитудой в диапазоне от 10 кВ до 30 кВ.

При регистрации одиночных осциллограмм, были замечены сильные осцилляции. Это связано с особенностью формирования ионного потока в дуговой плазме, вследствие чего, для статистической достоверности использовалось усреднение по шестнадцати импульсам. Усреднение осуществлялось программно осциллографом.

2.3.1 Изготовление образцов

Для проведения экспериментов были подготовлены образцы из кремния с площадью 5 см^2 с толщиной 380 мкм и алюминия 4 см^2 с толщиной 3 мм. Образцы обрабатывали наждачной бумагой с повышением зернистости, используя шлифовально-полировальный станок Saphir 320. Окончательная полировка происходит на сукне с использованием алмазной суспензии.

2.3.2 Измерение температуры образцов

Температура образцов измерялась при помощи импульсного бесконтактного быстродействующего пирометра KLEIBER 740-LO. Он устанавливался в вакуумной камере и регистрировал динамическое изменение температуры поверхности облучаемой мишени. Для этого в сеточном электроде было сделано отверстие, чтобы инфракрасный луч пирометра беспрепятственно попадал на поверхность модифицируемой

мишени. При проведении экспериментов учитывался коэффициент излучения поверхности мишеней.

2.4 Численное моделирование динамики изменения температурных полей

Динамика изменения температурных полей в мишенях исследовалось при помощи методов численного моделирования для образцов из кремния с площадью 5 см² с толщиной 380 мкм и алюминия площадью 4 см² с толщиной 3 мм. Энергетическое воздействие на поверхность материала осуществлялось с помощью высокоинтенсивного импульсного и импульсно-периодического пучков. Расчетная область задачи продемонстрирована на рисунке 2.5.

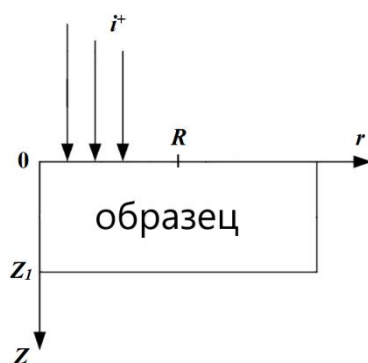


Рисунок 2.5 – Расчетная область: R и Z_l – радиус и толщина образца

Математическая модель построена на основе уравнения теплопроводности, записанного в цилиндрических координатах с азимутальной симметрией и имеет следующий вид:

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

где $T(z, r, t)$ – пространственно-временная функция, описывающая распределение температуры в облучаемом образце, α – коэффициент температуропроводности облучаемого материала.

Граничные условия на модифицируемой поверхности образца имеет вид:

$$\lambda(z) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{z=0, 0 \leq r \leq R} = -q(r, t) + \varepsilon_p (T^4 - T_{ch}^4) \quad (2)$$

Здесь $q(r, t)$ – плотность мощности ионного пучка, усреднённая по периоду, R – радиус поперечного сечения пучка, T_{ch} – температура стенок вакуумной камеры, ε_p – приведённая степень черноты поверхности образца, рассчитываемая с учётом отражения теплового излучения от стенок вакуумной камеры:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon_{ch}} - 1}, \quad (3)$$

где ε и ε_{ch} – степень черноты поверхности образца и стенок вакуумной камеры соответственно. В расчётах $T_{ch}=300$ К, $\varepsilon_{ch}=1$. На облучаемой поверхности вне зоны действия пучка и на боковой поверхности образца задан сток тепла за счёт теплового излучения, на оси $r=0$ – $\lambda(z) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$.

Расчёты выполнялись с использованием функции плотности мощности $q(r, t)$, построенной по осциллограммам плотности тока и энергии ионов, измеренным в экспериментах.

Для численного моделирования динамики изменения температурных полей в образцах из кремния и алюминия было использовано экспериментально полученное распределение плотности тока пучка ионов титана. Для этого был проведен отдельный эксперимент с применением секционированного цилиндра Фарадея. Полученные данные были использованы в виде исходных данных.

Моделирование эксперимента выполняется в программе «Ion Beam», разработанной в Томском политехническом университете доктором физико-математических Блейхер Галиной Алексеевной. Данная программа позволяет рассчитать температуру по глубине в центре мишени, температуру на поверхности и по радиусу мишени. Интерфейс программы представлен на рисунке 2.6.

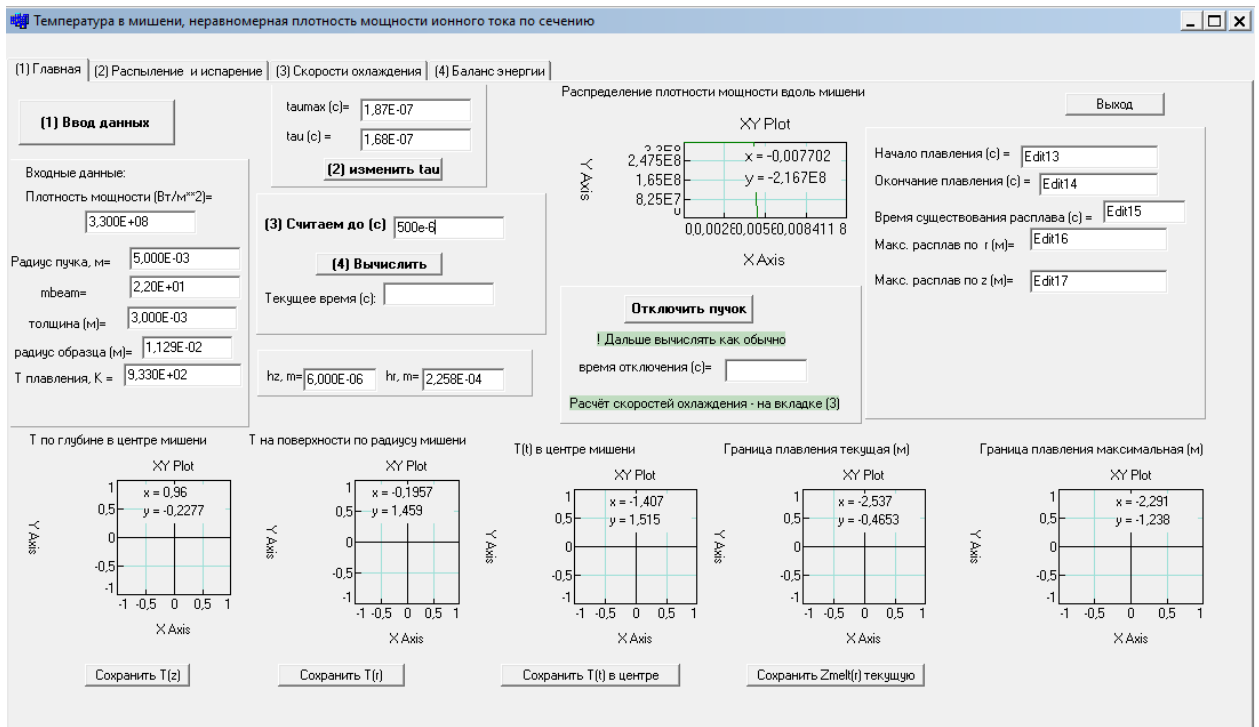


Рисунок 2.6 – Интерфейс программы для моделирования имплантации

Для проведения моделирования необходимо указать теплофизические свойства мишени, такие как: коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, молярная теплота испарения, частота колебаний атомов в решетке, энергия связи атомов на поверхности и другие. Также необходимо указать размер и толщину образца, радиус пучка, степень черноты образца и массу имплантируемого иона.

В данной работе математическим моделированием были получены зависимости температуры мишеней от длительности импульсов ионного пучка с различной плотностью мощности. Длительность импульсов составляла 50, 150, 300 и 500 мкс.

Помимо этого, была смоделирована зависимость температуры мишени от времени облучения с пучком ионов с плотностью мощности, усредненной по периоду. В этом случае необходимо было получить выход на стабилизацию температуры образцов. После чего, необходимо выбрать плотность мощности ионного пучка, при которой температура образца была приближена к температуре рекристаллизации материала мишени.

Далее, температура рекристаллизации материала мишени использовалась как начальная, для того чтобы получить зависимость температуры от времени в установившемся режиме облучения поверхности образца высокоинтенсивным пучком ионов с различной импульсной плотностью мощности, приближая температуру поверхности образца к плавлению. Длительность импульса в этом случае выбрана равной 500 мкс.

Полученные зависимости были использованы для определения оптимальных параметров проведения эксперимента.

ГЛАВА 3. ОПИСАНИЕ ПРОВЕДЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3.1 Экспериментальное исследование распределения плотности тока пучка ионов титана

Была проведена серия экспериментов по исследованию распределения плотности тока пучка ионов титана. Для этого использовался секционированный цилиндр Фарадея, состоящий из девятнадцати отдельных коллекторов.

Секционированный цилиндр Фарадея располагался в геометрическом фокусе. Радиус сеточного электрода составляет 130 мм. Коллектор перемещался вдоль оси фокуса без развакуумирования самой вакуумной камеры, изменяя положение относительно фокуса пучка ионов.

Эксперименты проводились при токе разряда 130 А в зависимости от расположения секционированного цилиндра Фарадея относительно геометрического фокуса ионного пучка, а именно: F , $F+10$ мм и $F+20$ мм, где F – геометрический фокус. В экспериментах также изменялось ускоряющее напряжение с 10 до 30 кВ.

Совокупность количества отдельных коллекторов и использования двух четырехканальных осциллографов, привело к тому, что сигнал с них считывался группами по 6 коллекторов за раз. Таким образом, получилось 3 группы коллекторов по 6 и одна группа, состоящая из одного девятнадцатого коллектора. Для статистической достоверности использовалось усреднение по шестнадцати импульсам. Усреднение осуществлялось программно осциллографом.

Полученные значения стационарной амплитуды осциллограммы ионного тока для каждого из коллекторов использовались для построения профиля распределения ионного тока. В пакете программ «Origin 2023» создавалась матрица 9 на 9 ячеек. После чего полученные значения вносились в матрицу. Пример заполнения матрицы представлен на

рисунке 3.1, где в зеленых ячейках записаны соответствующие значения стационарной амплитуды осциллограммы каждого коллектора.

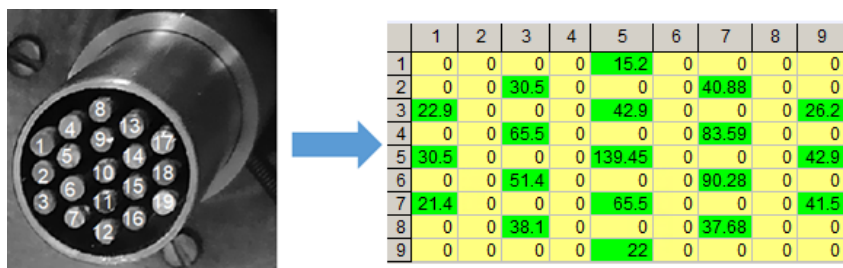


Рисунок 3.1 – Представление секционированного цилиндра Фарадея с девятнадцатью коллекторами в виде матрицы

В той же программе строились объемные графики распределения ионного тока. Данное решение наглядно демонстрирует распределение плотности ионного пучка (рисунок 3.2).

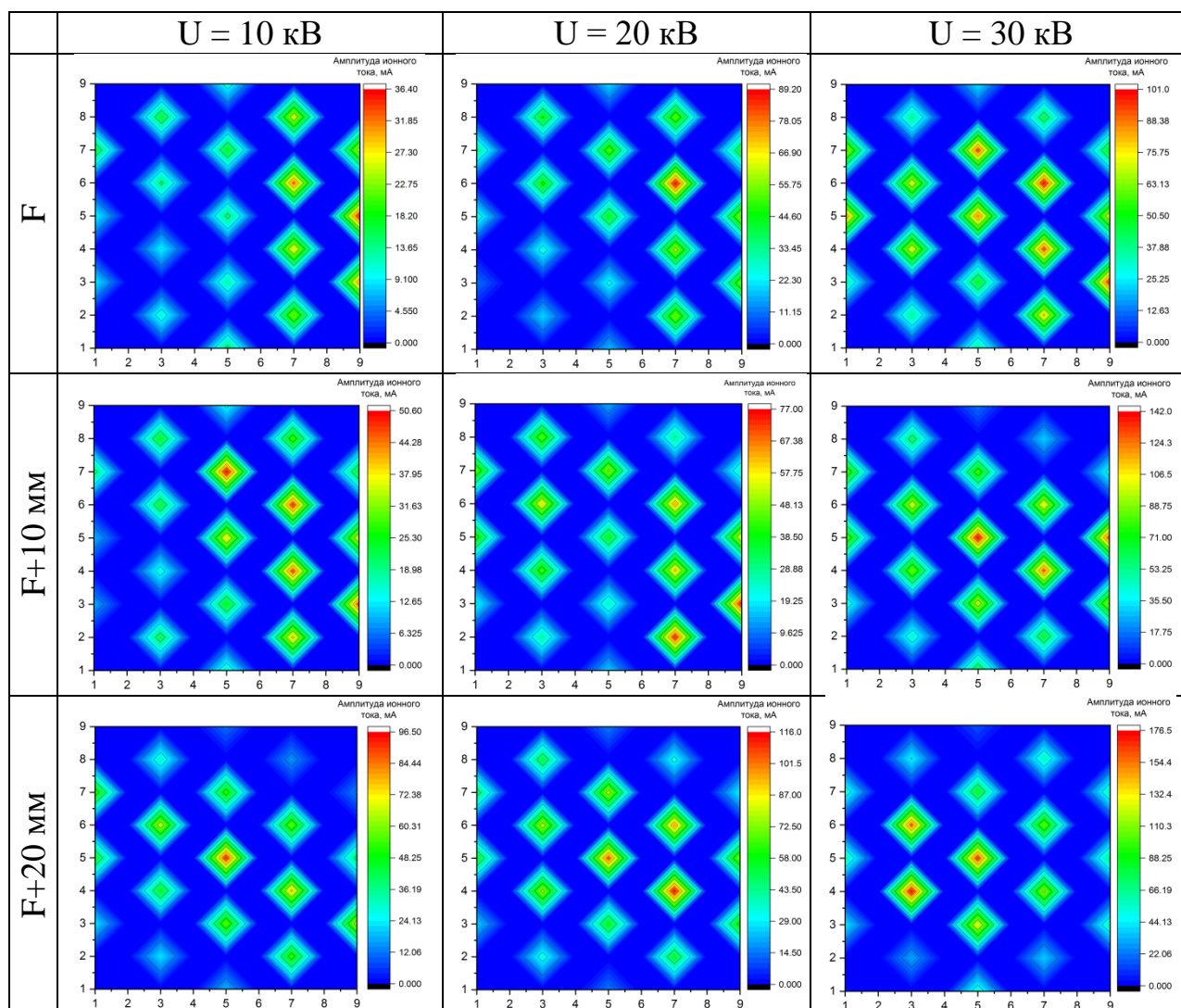


Рисунок 3.2 – Распределения ионного тока в пучке ионов титана

При нахождении секционного коллектора в фокусах F и $F+10$ мм видно, что центр пучка смещен относительно центра коллектора. При фокусе $F+20$ мм можно наблюдать, что центр пучка совпадает с центром коллектора. При всех трех ускоряющих напряжениях при выбранном фокусе наблюдается максимальное значение ионного тока. Этот эффект связан с особенностями нейтрализации пространственного заряда и с использованием затеняющего дискового электрода, препятствующего попаданию макрочастиц в область фокусировки пучка.

Также были сняты одиночные осциллограммы распределения плотности ионного тока. Однако при регистрации были замечены сильные осцилляции. Это связано с особенностью формирования ионного потока в дуговой плазме.

3.2 Исследование зависимости ионного тока на сплошной коллектор от ускоряющего напряжения

Исследование зависимости ионного тока от ускоряющего напряжения проводилось с применением пучка ионов титана. Для выполнения численного моделирования было экспериментально получено распределение плотности ионного тока в пучке, которое было использовано в качестве входных данных в расчетах. В эксперименте ускоряющее напряжение изменялось от 10 до 30 кВ, ток разряда составлял 130 А, коэффициент заполнения 10 % и частота импульса 1 Гц. Полученные графики плотности ионного тока при различных ускоряющих напряжениях представлены на рисунке 3.3.

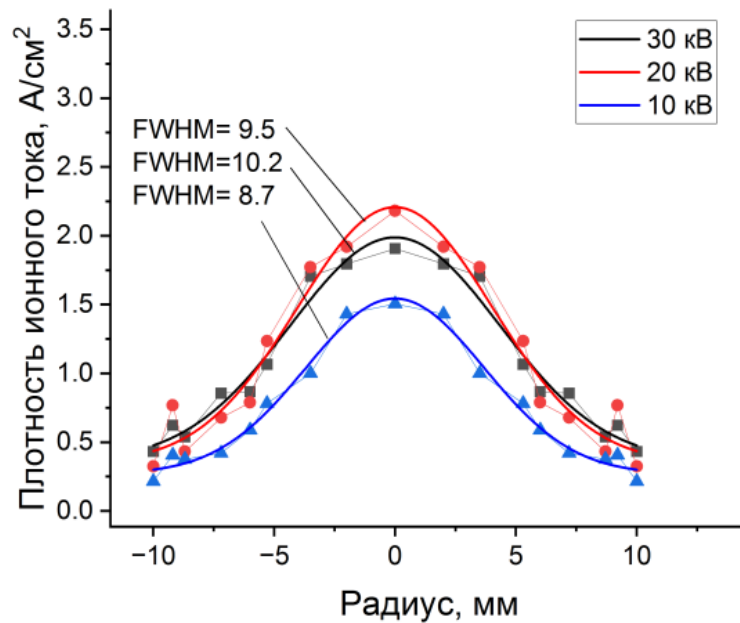


Рисунок 3.3 – График плотности ионного тока при разных ускоряющих напряжениях

В данном эксперименте использовался сплошной коллектор. Использовалось усреднение по шестнадцати импульсам.

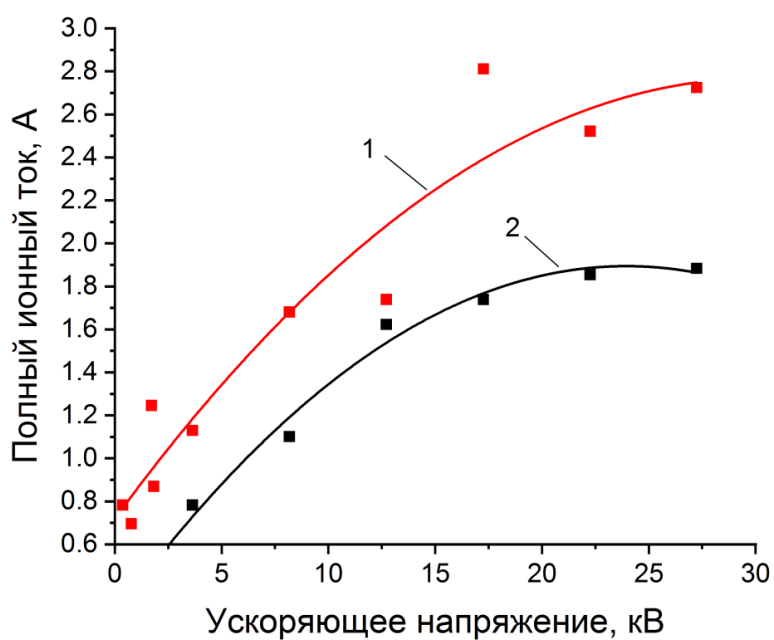


Рисунок 3.4 – Зависимость полного ионного тока от ускоряющего напряжения: 1 – одиночный; 2 – усредненный импульс

При одиночном импульсе полный ионный ток достигал 2.8 А при ускоряющем напряжении 17 кВ, в то время как при использовании усреднения 1.7 А. Потери ионного тока на транспортировку составили около 20%.

Также была проведена серия экспериментов по исследованию зависимости ионного тока на сплошной коллектор от ускоряющего напряжения в зависимости от фокусного расстояния. Ток разряда составлял 130 А, диаметр коллектора 20 мм, частота импульса 1 Гц. Результаты внесены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1. Зависимость ионного тока от расстояния фокуса

U, кВ		Расстояние от фокуса		
		F	F+10 мм	F+20 мм
8	Ионный ток, А	0.12	0.41	0.41
17		0.23	0.75	0.78
27		0.46	1.33	1.25

Из таблицы видно, что при расположении сплошного коллектора на расстоянии 20 мм от геометрического фокуса наблюдается наибольший ионный ток.

3.3 Экспериментальные данные по измерению температуры поверхности образцов

Генерация плазмы титана вакуумно-дуговым разрядом источника ионов «Радуга-5» осуществлялась при давлении остаточной атмосферы в вакуумной камере 10^{-3} Па. Вакуумно-дуговой генератор плазмы работал в непрерывном режиме при токе разряда 130 А. Расстояние от образцов до катода составляло 54 см.

Эксперименты с использованием алюминия в качестве образца проводились при частоте следования импульсов 1 имп./с, ускоряющем напряжении от 10 до 37 кВ, средней энергии ионов титана с учетом их зарядового состояния изменялась в диапазоне от 20 до 74 кэВ, и с

максимальной длительностью импульсов 500 мкс. Измерение температуры образца осуществлялось при помощи пирометра. Начальная температура образца составляла 330 °С. Во время действия импульса ионного тока температура поверхности измерялась импульсным пирометром. Результаты данного эксперимента представлены на рисунке 3.5.

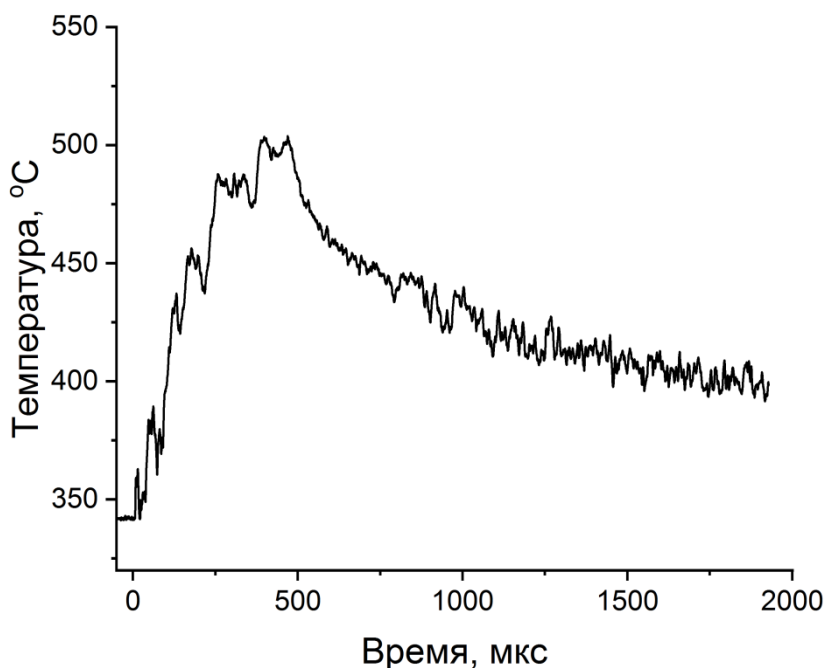


Рисунок 3.5 – Динамика изменения температуры поверхности алюминия при облучении субмиллисекундным пучком ионов титана

При имплантации ионов титана в образец из кремния генерация пучка осуществлялась в импульсно-периодическом режиме с амплитудой потенциалов смещения 20 кВ. Начальная температура образца составляла 450 °С с динамическим увеличением в течение действия импульса ионного пучка длительностью 500 мкс. После окончания импульса наблюдается сверхбыстрое охлаждение поверхности за счет отвода тепла вглубь мишени за счет теплопроводности. Динамика изменения температуры поверхности кремния представлена на рисунке 3.6.

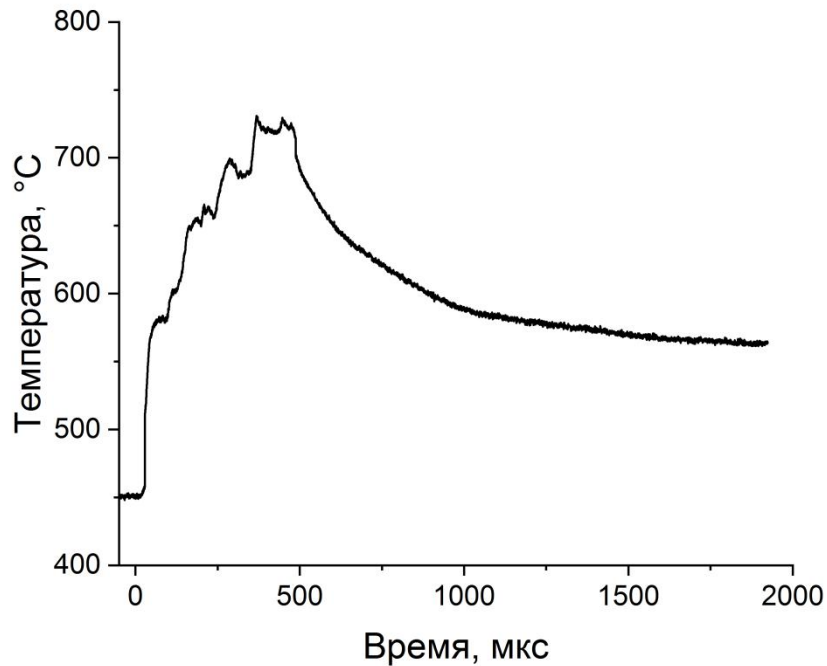


Рисунок 3.6 – Динамика изменения температуры поверхности кремния при облучении субмиллисекундным пучком ионов титана

Для этих экспериментов численными методами были рассчитаны режимы предварительного и импульсного нагревов мишени.

3.4. Численное моделирование динамики изменения температурных полей в мишенях из алюминия и кремния при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов титана

Численные моделирование выполнялось для образца алюминия площадью 4 см^2 с толщиной 3 мм и кремния площадью 5 см^2 и толщиной 0.38 мм, с учетом всех вышеупомянутых экспериментальных данных.

3.4.1 Моделирование температурных полей в мишенях из алюминия

В процессе моделирования энергетическое воздействие на поверхность образца осуществлялось высокоинтенсивным импульсным и импульсно-периодическим пучком ионов титана высокой плотности мощности.

На рисунке 3.7 представлена зависимость температуры мишени из алюминия от длительности импульсов ионного пучка при разной плотности мощности.

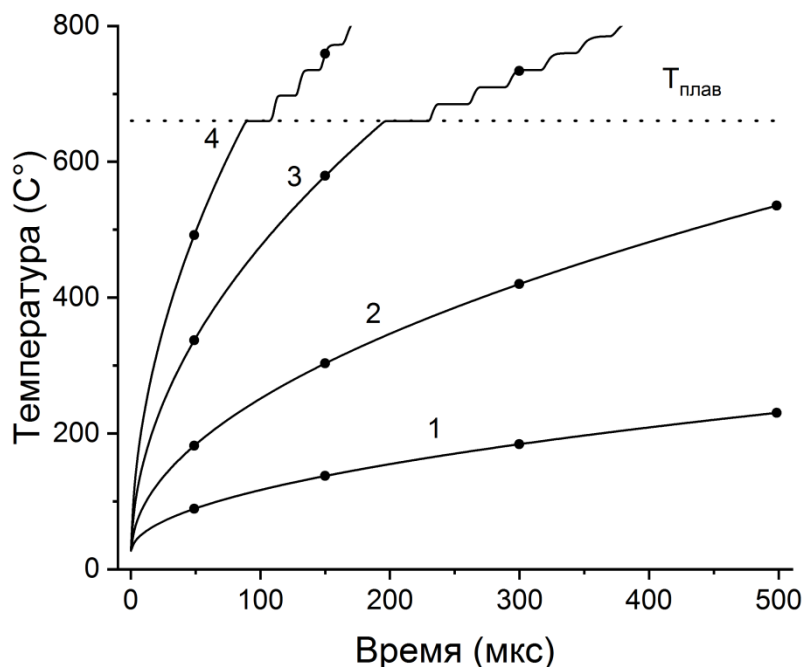


Рисунок 3.7 – Зависимость температуры мишени из алюминия от длительности импульсов при разной импульсной плотности мощности пучка $q_{имп}$: 1 – $2 \cdot 10^8$ Вт/м²; 2 – $5 \cdot 10^8$ Вт/м²; 3 – $1 \cdot 10^9$ Вт/м²; 4 – $1.5 \cdot 10^9$ Вт/м².

Из рисунка 13 видно, что при плотности мощности ионного пучка $2 \cdot 10^8$ Вт/м² максимальная температура в приповерхностном слое мишени не превышает 230 °С даже при длительностях импульсов энергетического воздействия 500 мкс. Такая температура не обеспечит глубокого ионного легирования в режиме импульсного разогрева приповерхностного слоя материала. Используя мощный ионный пучок можно управлять максимальной температурой при энергетическом воздействии за счет выбора длительности импульса. При увеличении плотности мощности ионного пучка до $1.5 \cdot 10^9$ Вт/м² уже при длительности импульса около 100 мкс происходит расплавление поверхности образца.

Импульсный нагрев образцов до температуры, обеспечивающей усиленную радиационно-стимулированную диффузию имплантируемых атомов, является основой для метода высокоинтенсивной ионной имплантации, совмещенного с энергетическим воздействием на поверхность образца. Нагрев образцов до нескольких сотен градусов, к примеру для алюминия 330 °С, существенно не меняет микроструктуру, в связи с чем рассмотрим численное моделирование, когда весь образец нагревается до высоких температур, при которых не меняется структура и свойства мишени. Для предварительного нагрева образца понадобится существенно меньшая плотность мощности ионного пучка. На рисунке 3.8 представлены расчеты измерения температуры образца из алюминия в зависимости от времени облучения.

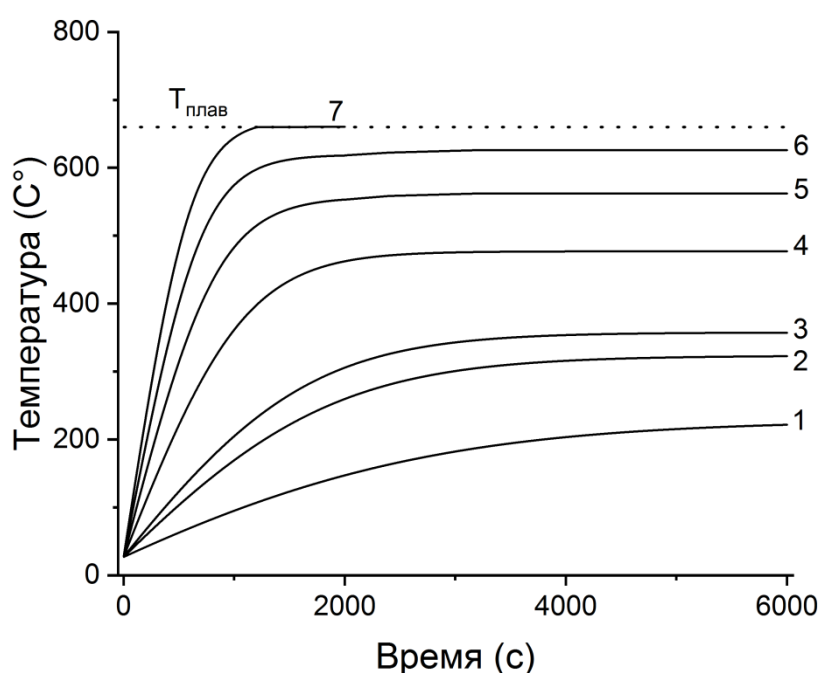


Рисунок 3.8 – Зависимость температуры мишени из алюминия от времени его облучения пучком ионов титана с плотностью мощности, усредненной по периоду $q_{\text{уср}}$: 1 – $4 \cdot 10^3$ Вт/м²; 2 – $8 \cdot 10^3$ Вт/м²; 3 – 10^4 Вт/м²; 4 – $2 \cdot 10^4$ Вт/м²; 5 – $3 \cdot 10^4$ Вт/м²; 6 – $4 \cdot 10^4$ Вт/м²; 7 – $5 \cdot 10^4$ Вт/м².

Из рисунка видно, что увеличение усредненной по периоду плотности мощности ионного пучка способствует более быстрому выходу на стабилизацию температуры образца. Усредненная плотность мощности, при которой еще не наблюдается рост зерна в алюминиевом образце, не превышает $8 \cdot 10^3$ Вт/м², что соответствует температуре стабилизации 325 °С.

Исходя из этого, для импульсного нагрева поверхностного слоя образца до температуры, обеспечивающей радиационно-ускоренную диффузию, требуемая импульсная плотность мощности в ионном пучке может быть существенно уменьшена. На рисунке 3.9 представлены зависимости динамического изменения температуры алюминиевого образца, предварительно разогретого до температуры 330 °С, при облучении высокоинтенсивным пучком ионов титана длительностью 500 мкс.

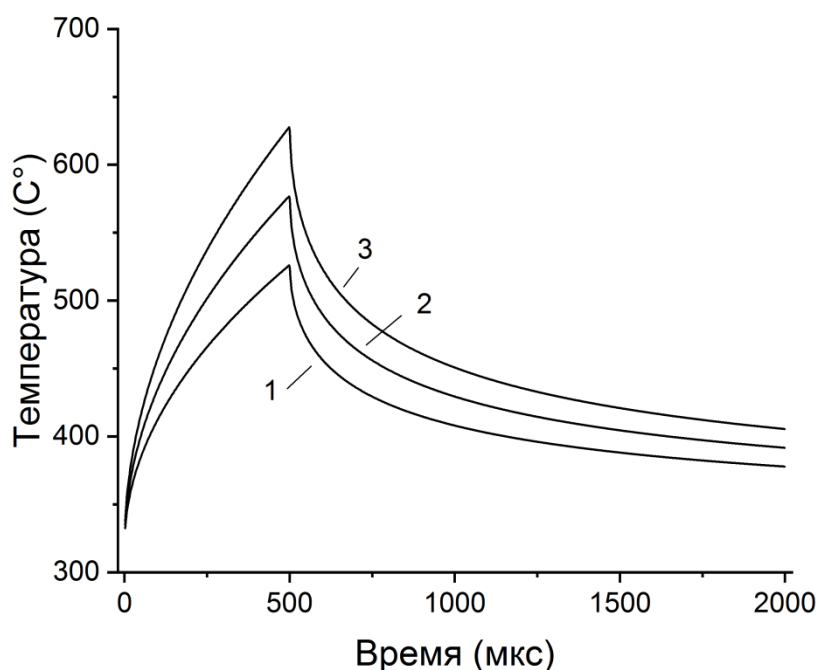


Рисунок 3.9 – Зависимость температуры от времени в установившемся режиме облучения поверхности алюминия высокоинтенсивным пучком ионов титана с импульсной плотностью мощности $q_{имп}$: 1 – $2 \cdot 10^8$ Вт/м²; 2 – $2.5 \cdot 10^8$ Вт/м²; 3 – $3 \cdot 10^8$ Вт/м²

На графике наблюдается значительный импульсный разогрев приповерхностного слоя облучаемой мишени с последующим быстрым охлаждением за счет отвода тепла внутрь материала за счет теплопроводности. При импульсной мощности $2 \cdot 10^8$ Вт/м² и начальной температуре 330 °С максимальная температура поверхности к концу импульса достигает 525 °С. Увеличение плотности до $3 \cdot 10^8$ Вт/м² приводит к импульсному разогреву поверхности до 630 °С. Поверхность образца разогревается до температуры плавления при плотности мощности ионного пучка свыше $3.3 \cdot 10^8$ Вт/м².

3.4.2 Моделирование температурных полей в мишенях из кремния

Численное моделирование температурных полей в мишенях из кремния проводилось аналогично. В процессе моделирования энергетическое воздействие на поверхность образца также осуществлялось высокоинтенсивным импульсным и импульсно-периодическим пучком ионов титана высокой плотности мощности. На рисунке 3.10 представлена зависимость температуры мишени из кремния от длительности импульсов ионного пучка при разной плотности мощности.

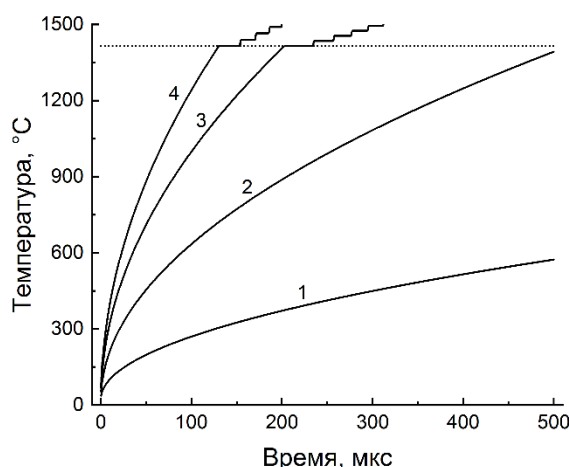


Рисунок 3.10 – Зависимость температуры мишени из кремния от длительности импульсов при разной импульсной плотности мощности пучка $q_{имп}$: 1 – $2 \cdot 10^8$ Вт/м²; 2 – $5 \cdot 10^8$ Вт/м²; 3 – $8 \cdot 10^8$ Вт/м²; 4 – 10^9 Вт/м²

Из рисунка видно, что при плотности мощности ионного пучка $5 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$ температура образца практически достигает температуры плавления к концу импульса длительностью 500 мкс. Дальнейшее увеличение плотности мощности ионного пучка до 10^9 Вт/м^2 будет приводить к расплавлению поверхности при длительности импульса менее 150 мкс.

На рисунке 3.11 представлены расчеты изменения температуры образца в зависимости от времени облучения.

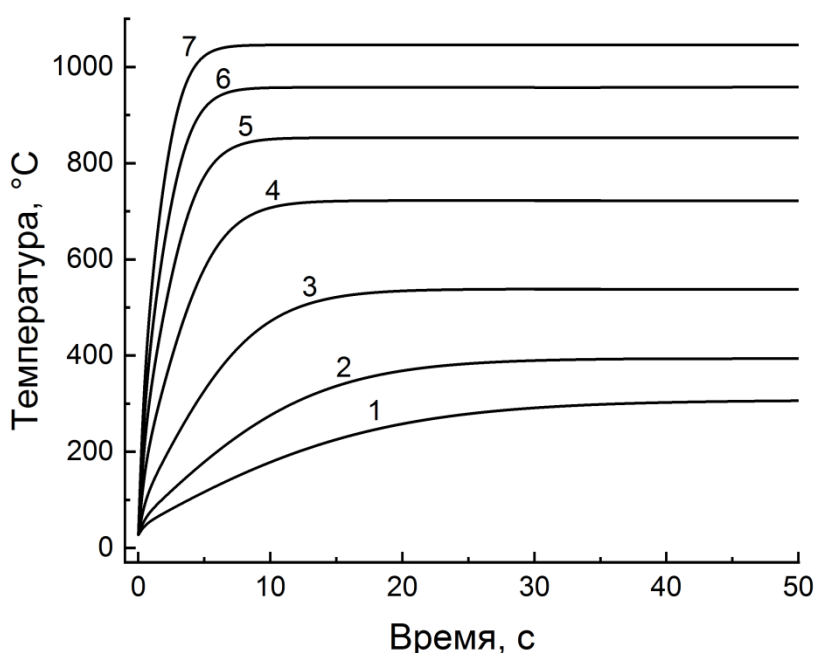


Рисунок 3.11 – Зависимость температуры мишени из кремния от времени его облучения пучком ионов титана с плотностью мощности, усредненной по периоду $q_{\text{уср}}$: 1 – $3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$; 3 – 10^5 Вт/м^2 ; 4 – $2 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$; 5 – $3 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$; 6 – $4 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$; 7 – $5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$

Исходя из рисунка видно, что увеличение импульсной мощности ионного пучка приводит к более быстрому выходу на стабилизацию температуры образца. Усредненная плотность мощности, при которой еще не наблюдается рост зерна в кремниевом образце, не превышает $3 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$, что соответствует температуре стабилизации $538 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рисунке 3.12 представлены зависимости динамического изменения температуры мишени с предварительным нагревом при облучении высокоинтенсивным пучком ионов титана различной мощности с длительностью импульса 500 мкс.

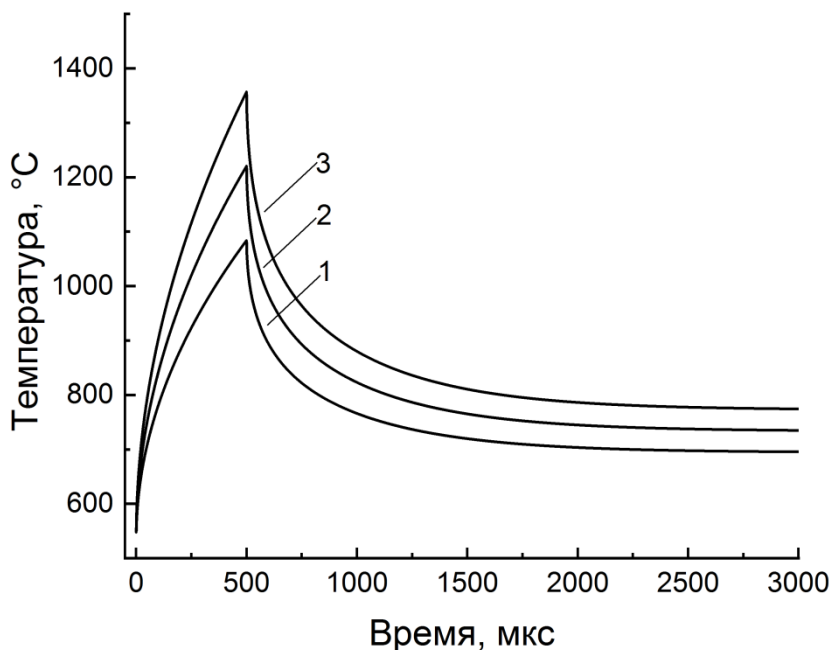


Рисунок 3.12 – Зависимость температуры от времени в установившемся режиме облучения поверхности кремния высокоинтенсивным пучком ионов титана с импульсной плотностью мощности $q_{имп}$: 1 – $2 \cdot 10^8$ Вт/м²; 2 – $2.5 \cdot 10^8$ Вт/м²; 3 – $3 \cdot 10^8$ Вт/м²

При импульсной мощности $2 \cdot 10^8$ Вт/м² максимальная температура поверхности к концу импульса достигает 1084 °C. Увеличение импульсной мощности до $3 \cdot 10^8$ Вт/м² приводит к температуре близкой к плавлению, а увеличение до $3.5 \cdot 10^8$ Вт/м², приводит поверхность в состояние расплава.

3.5 Сравнительное анализ численного моделирования и экспериментальных данных

Используя экспериментальные данные и численное моделирование, описанные выше, проведем сравнительный анализ полученных результатов.

На рисунке 3.12 представлено сравнение динамики изменения температуры поверхности алюминия численным моделированием с экспериментальными данными.

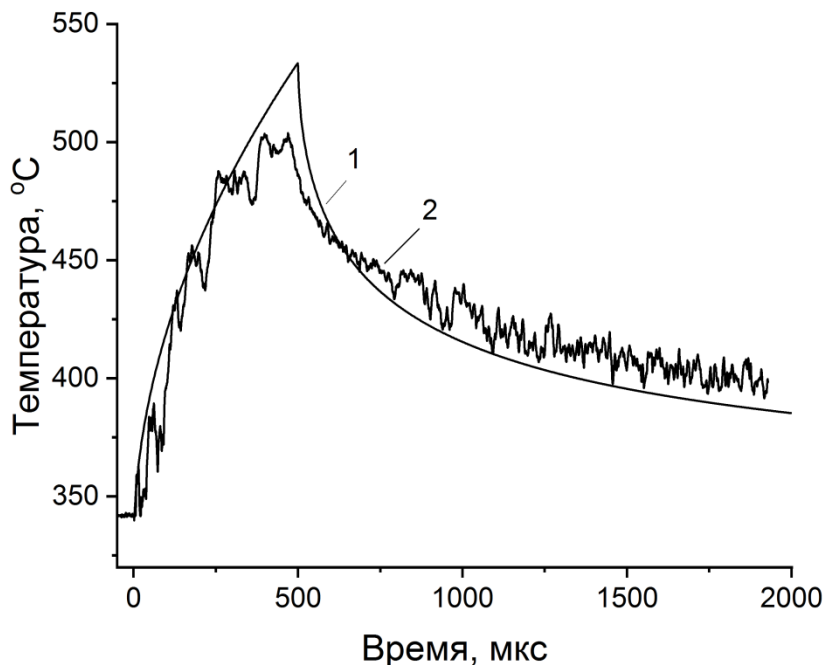


Рисунок 3.12 – Динамика изменения температуры поверхности алюминия при облучении субмиллисекундным пучком ионов титана: 1 – численное моделирование; 2 – экспериментальные данные.

Численное моделирование, как и эксперимент, были выполнены с предварительным нагревом образца до 330 °С. К концу импульса длительностью 500 мкс температура в эксперименте не соответствует данным полученными численным моделированием. Это может быть связано с потерями ионного тока на транспортировку и теплообменом образца с его держателем.

На рисунке 3.13 представлены зависимости динамического изменения температуры кремниевого образца, предварительно разогретого до температуры 450 °С, при облучении высокоинтенсивным пучком ионов титана длительностью импульса 500 мкс.

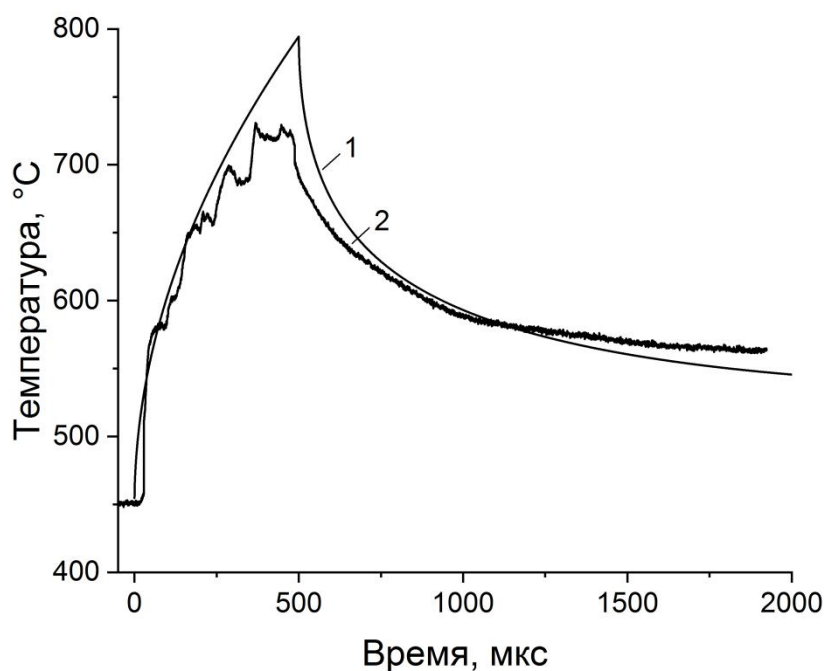


Рисунок 3.13 – Динамика изменения температуры поверхности кремния при облучении субмиллисекундным пучком ионов титана: 1 – численное моделирование; 2 – экспериментальные значения.

Здесь, как и в случае с образцом из алюминия, максимальная температура не достигает температуры, полученной численным методом. Кроме того, отличия данных могут быть и за счет использования при расчетах средних значений коэффициента теплопроводности и удельной теплоёмкости кремния в ходе моделирования. Если рассматривать оба случая, численное моделирование согласуется с экспериментальными значениями. Другими словами, численное моделирование позволяет получить необходимые режимы, как для предварительного импульсного нагрева, так и для последующей высокоинтенсивной ионной имплантации, совмещенной с энергетическим воздействием на поверхность образца за счет усиленной радиационно-стимулированной диффузии имплантируемых атомов, без расплавления поверхности мишени. Численным моделированием можно заметно сократить время подбора оптимальных параметров

проведения физического эксперимента и получить некоторые предварительные данные.

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

Студенту:

Группа	ФИО
0БМ11	Гурулеву Александру Валерьевичу

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 «Физика»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Затраты на сырьё, материалы, комплектующие изделия, специальное оборудование, основную и дополнительную заработную плату исполнителей, отчисления на социальные нужды, накладные расходы</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>1. Налоговый кодекс Российской Федерации 2. ФЗ №212 от 24.07.2009 в ред. от 19.12.2016</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Определение потенциальных потребителей результатов исследования, анализ конкурентных технических решений.</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Планирование этапов разработки программы, определение трудоемкости.</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Сравнительный анализ интегральных показателей эффективности, формирование бюджета НТИ</i>
4. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Расчет уравнений эффективности НТИ. Расчет уравнений сравнительной эффективности НТИ.</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Матрица SWOT
5. График проведения и бюджет НТИ
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Маланина Вероника Анатольевна	К.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0БМ11	Гурулев Александр Валерьевич		

ГЛАВА 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-исследовательской работы, направленной на экспериментальное исследование и численное моделирование динамики изменения температурных полей в различных мишенях при воздействии на их поверхность пучков ионов субмиллисекундной длительности. Численное моделирование позволит определить оптимальные параметры перед проведением эксперимента. В связи с этим, были определены ресурсная, финансовая и экономическая эффективность.

Этапы решения задачи:

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

Научно-исследовательская работа посвящена модификации поверхности пучками ионов субмиллисекундной длительности с использованием численного моделирования, на примере имплантации ионов титана в мишени из алюминия и кремния. 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. Численное моделирование динамики изменения температурных полей,

позволит сократить сроки исследования и уменьшить затраты на расходные материалы, тем самым снизить себестоимость конечного продукта.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

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

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

Так как использование методов численного моделирования при имплантации пучков ионов субмиллисекундной длительности недостаточно развито, результаты будут представлять интерес для большинства организаций.

Карта сегментирования рынка по модификации поверхностей представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Карта сегментирования рынка по области применения разработки

Область рынка сбыта	Доля рынка, %
Машиностроение	50
Авиастроение	20
Ядерная энергетика	10
Космическая промышленность	20

Исходя из карты сегментирования рынка услуг по модификации поверхностей, учитывая низкую конкуренцию, можно занять сегмент модификации поверхностного слоя деталей в сфере авиастроения,

космической промышленности и/или ядерной энергетики. Применение результатов данного научного исследования позволит занять лидирующее положение в этом сегменте рынка.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В отличие от других методов (лазерная обработка, обработка сильноточными электронными пучками и др.) модификация материала в ионной имплантации происходит за счёт изменения фазового и элементного состава в поверхностном слое, что сопровождается различными теплофизическими процессами. Необходимо выдерживать температуру поверхности материала, для сохранения структурно-механических характеристик. Использование численных методов позволит подобрать режимы имплантации, сохранять необходимую температуру поверхности материала.

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

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

Б_Ф – модификация поверхности пучками ионов субмиллисекундной длительности с использованием численного моделирования. Б_{К1} – нанесение защитных покрытий.

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _Ф	Б _{К1}	К _{КФ}	К _{К1}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда пользователя	0.1	4	4	0.4	0.4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0.05	4	3	0.2	0.15
3. Помехоустойчивость	0.05	4	2	0.2	0.1
4. Энергоэкономичность	0.05	4	4	0.2	0.2
5. Надежность	0.1	4	3	0.4	0.3
6. Уровень шума	0.05	3	3	0.15	0.15
7. Безопасность	0.01	5	5	0.05	0.05
8. Потребность в ресурсах памяти	0.1	4	4	0.4	0.4
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.1	5	3	0.5	0.3
10. Простота эксплуатации	0.05	4	4	0.2	0.2
11. Качество интеллектуального интерфейса	0.05	4	4	0.2	0.2
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0.01	5	5	0.05	0.05
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0.05	4	3	0.2	0.15
2. Уровень проникновения на рынок	0.02	5	5	0.1	0.1
3. Цена	0.03	4	4	0.12	0.12
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0.03	4	4	0.12	0.12
5. Послепродажное обслуживание	0.01	4	4	0.04	0.04
6. Финансирование научной разработки	0.08	4	5	0.32	0.4
7. Срок выхода на рынок	0.05	4	4	0.2	0.2
8. Наличие сертификации разработки	0.01	4	4	0.04	0.04
Итого	1	83	77	4.09	3.67

Исходя из таблицы 4.2, конкурентоспособность разработки научного исследования модификации поверхности пучками ионов субмиллисекундной длительности с использованием численного моделирования (Б_Ф) составила 4.09, против 3.67 метода нанесения защитных покрытий (Б_{К1}). Полученные

данные свидетельствуют о превосходстве научно-технической разработки (Б_Ф) по критериям: удобство в эксплуатации, помехоустойчивость, надёжность, функциональная мощность и конкурентоспособность продукта. Применение модификации поверхности пучками ионов субмиллисекундной длительности с использованием численного моделирования (Б_Ф) позволяет добиться более высоких механических показателей обрабатываемого материала, в отличие от конкурирующего метода нанесения защитных покрытий (Б_{К1}). Данный метод (Б_Ф) имеет более широкую область применения в промышленности.

4.1.3 SWOT – анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Цель SWOT-анализа раскрыть сильные и слабые стороны, выявить риски, определить возможности для улучшения. Результаты SWOT анализа представлены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – SWOT анализ

	Сильные стороны:	Слабые стороны:
	С1. Широкий спектр модификации материалов;	Сл1. Высокая стоимость оборудования установки;
	С2. Значительное повышение структурно-механических свойств материалов;	Сл2. Отсутствие современных отечественных вакуумных насосов;
	С3. Длительный срок эксплуатации обработанных деталей;	Сл3. Необходимость квалифицированных специалистов для обслуживания оборудования;
	С4. Высокая точность обработки данных при численном моделировании;	Сл4. Продолжительная настройка установки при смене режима имплантации;

	С5. Относительная дешевизна процесса модификации.	Сл5. Постепенное устаревание программного обеспечения и необходимость своевременного обновления.
Возможности:		
В1. Государственная поддержка проектов по модернизации объектов промышленности;	Привлечение государственных и частных средств на модернизацию установки. Большая вариативность модификации поверхности материалов. Повышение конкурентоспособности на рынке. Модифицированные приповерхностные слои глубиной от десятков до сотен микрометров.	Применение оборудования отечественных производителей. Государственное субсидирование. Обучение специалистов для обслуживания установки. Унификация и стандартизация проектов для упрощения обновления оборудования.
В2. Использование расходных материалов отечественного производителя;		
В3. Снижение стоимости исследований за счет использования численных методов;		
В4. Получить государственный заказ на модификацию партии образцов		
Угрозы:		
У1. Рост стоимости импортных комплектующих;	Использование отечественного оборудования для эксплуатации установки. Появление конкурентных технических решений для снижения стоимости и повышению качественных показателей. Внедрение численного моделирования для поиска оптимальных параметров модификации поверхностей материалов. Использование особенностей имплантации ионов субмиллисекундной длительности для получения модифицированных слоев вплоть до сотен микрометров.	Модернизация с использованием отечественного оборудования сократит конечную стоимость услуги. Повышение квалификации специалистов. Использование результатов научного исследования для повышения конкурентоспособности на рынке. Заключение договоров на оказание услуг в сфере авиастроения, космической промышленности и/или ядерной энергетики
У2. Появление новых конкурентных технических решений;		
У3. Низкий спрос на рынке, обусловленный экономической ситуацией;		
У4. Коммерческая неудача вследствие малого спроса		

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта

		Сильные стороны проекта					Слабые стороны проекта				
		С1	С2	С3	С4	С5	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
Возможности проекта	В1	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
	В2	+	0	0	+	+	+	+	-	-	-
	В3	+	+	+	+	+	-	-	-	+	-
	В4	+	+	+	+	+	+	-	+	0	-
Угрозы проекта	У1	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+
	У2	+	+	+	+	+	-	0	-	-	-
	У3	+	+	+	0	+	-	0	-	-	-
	У4	+	+	+	+	+	+	0	-	-	+

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

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

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

В данном разделе отражено распределение времени и трудового вклада участников исследовательской работы. Перечень этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, инженер
	3	Проведение патентных исследований	Руководитель, инженер
	4	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
	5	Календарное планирование работ	Руководитель,

		по теме	инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, инженер
	7	Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	Руководитель, инженер, сотрудник-техник
	8	Изготовление исследуемых образцов	Инженер
	9	Проведение экспериментов	Руководитель, инженер, сотрудник-техник
Теоретические и экспериментальные исследования	10	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, инженер
Обобщение и оценка результатов	11	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер
	12	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель, инженер

Данная таблица отображает вклад каждого участника исследовательской работы. Наибольшая часть работы приходится на инженера (магистранта).

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Определяющим фактором выражения основной части стоимости научно-технической разработки являются заработные платы лиц, задействованных в реализации проекта. В связи с этим, наиболее важным моментом является максимально точное определение трудоемкости работ каждого из участников проекта [26].

Для определения трудоёмкости реализации научного исследования выпускной квалификационной работы используется экспертный способ, основным показателем которого является человеко-день [27]. Для расчёта предлагаемого значения трудоёмкости используют следующую формулу

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

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

Оценка трудоёмкости выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 43 + 2 \cdot 91}{5} = 62.2 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для сотрудника – техника:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 18}{5} = 10.8 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Трудоёмкость выполнения научного исследования для инженера:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot 54 + 2 \cdot 117}{5} = 79.2 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

Далее определим продолжительность каждого этапа работы в рабочих днях $T_{рд}$:

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

где $T_{рд}$ – продолжительность одного этапа работы, раб.дн.; $K_{вн}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение определенных длительностей, $K_{вн}=1$; $K_{д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ, $K_{д} = 1$.

Произведем длительно работ в рабочих днях.

Расчёт продолжительности работы выполнения научного исследования для научного руководителя:

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д} = \frac{62.2 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 62.2 \text{ раб.дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для сотрудника-техника:

$$T_{рд} = \frac{10.8 \text{ чел.} - \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 10.8 \text{ раб.дни}$$

Продолжительность работы выполнения научного исследования для инженера:

$$T_{РД} = \frac{79.2 \text{ чел.} \cdot \text{дн.}}{1} \cdot 1 = 79.2 \text{ раб.дни}$$

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

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

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}, \quad (4.3)$$

где $T_{КД}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях; $T_{К}$ – коэффициент календарности, определяющийся выражением 4.4.

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

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

Рассчитаем коэффициент календарности для шестидневной рабочей недели по формуле 4.4:

$$T_{К} = \frac{365}{365 - 54} = 1.17$$

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

Таблица 4.6 - Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Длит. работ в раб. дни Т _{рд}			Длит. работ в кален. дни Т _{кд}		
	t _{min} , чел.-дн			t _{max} , чел.-дн			t _{ож} , чел.-дн			НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН
	НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН	НР	СТ	ИН						
Составление и утверждение технического задания	2	-	-	4	-	-	2.8	-	-	2.8	-	-	3.3	-	-
Подбор и изучение материалов по теме	10	-	10	21	-	30	14.4	-	18	14.4	-	18	16.8	-	21.1
Проведение патентных исследований	5	-	7	8	-	15	6.2	-	10.2	6.2	-	10.2	7.3	-	12.0
Выбор направления исследований	3	-	5	4	-	7	3.4	-	5.8	3.4	-	5.8	4.0	-	6.8
Календарное планирование работ по теме	2	-	3	3	-	4	2.4	-	3.4	2.4	-	3.4	2.8	-	4.0
Проведение теоретических расчетов и обоснований	4	-	7	6	-	10	4.8	-	8.2	4.8	-	8.2	5.6	-	9.6
Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	1	1	2	3	3	4	1.8	1.8	2.8	1.8	1.8	2.8	2.1	1.8	3.3
Изготовление исследуемых образцов	-	-	2	-	-	3	-	-	2.4	-	-	2.4	-	-	2.8
Проведение экспериментов	5	5	5	15	15	15	9	9	9	9	9	9	10.5	9	10.5
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	5	-	7	10	-	12	7	-	9	7	-	9	8.2	-	10.5
Оценка эффективности полученных результатов	3	-	3	10	-	10	5.8	-	5.8	5.8	-	5.8	6.7	-	6.7
Определение целесообразности проведения ОКР	3	-	3	7	-	7	4.6	-	4.6	4.6	-	4.6	5.4	-	5.3
Итого	43	6	54	91	18	117	62.2	10.8	79.2	62.2	10.8	79.2	72.8	10.8	92.7

На основе таблицы 4.6, построен календарный план-график исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и декадам. График строится для максимального по длительности исполнения работ. Отмечены области в зависимости от исполнителей, ответственных за конкретную работу, таблица 4.7.

Таблица 4.7 – Календарный план-график (график Ганта) проведения НИОКР

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кп} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				январь	февраль			март			апрель			май			июнь	
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы	4	■														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель	21		■	■	■											
		Инженер	30		■	■	■	■										
3	Проведение патентных исследований	Руководитель	8				■	■										
		Инженер	15					■	■	■								
4	Выбор направления исследований	Руководитель	4					■										
		Инженер	7						■	■								
5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	3						■									
		Инженер	4							■	■							
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель	6						■	■								
		Инженер	10								■	■	■					
7	Составление порядка эксперимента, выбор технических режимов	Руководитель	3							■								
		Инженер	4							■	■							
		Сотрудник-техник	3								■							
8	Изготовление исследуемых образцов	Инженер	3								■							

Продолжение таблицы 4.7

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кп} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
				январь	февраль			март			апрель			май			июнь	
				3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
9	Проведение экспериментов	Руководитель	15															
		Инженер	15															
		Сотрудник-техник	15															
10	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель	10															
		Инженер	12															
11	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	10															
		Инженер	10															
12	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель	7															
		Инженер	7															

где красным цветом обозначен руководитель темы, зеленым инженер (магистрант), желтым сотрудник-техник.

Были определены длительности и обозначены сроки выполнения всех запланированных видов работ. Был построен график Ганта, наглядно иллюстрирующий этапы выполнения проекта участниками.

4.3 Бюджет научно-технического исследования

4.3.1 Расчёт материальных затрат исследования

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

Таблица 4.8 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Титановый катод	шт	2	8000	16000
Образцы из кремния	шт	10	700	7000
Образцы из алюминия	шт	10	110	1100
Диск для нарезки образцов из карбида кремния	шт	1	1650	1650
Халат	шт	1	1570	1570
Бумага наждачная, зернистость – 800	шт	4	52	208
Бумага наждачная, зернистость - 1500	шт	4	30	120
Бумага наждачная, зернистость – 2000	шт	4	115	460
Бумага наждачная, зернистость – 4000	шт	4	170	680
Итого				28788

По полученным данным, наибольшие расходы приходятся на расходные материалы.

4.3.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

Используемые при выполнении ВКР: научно-исследовательская вакуумная установка, персональный компьютер, осциллограф Rigol MS01104, отрезной станок Brilliant 201, шлифовальная машина Saphir 320, растровый электронный микроскоп Hitachi S-3400 N и профилометр STIL 3D Micromesure – в материальных затратах не учитывались, так как имелись в оснащении лаборатории. В связи, с чем рассчитаем их амортизационные отчисления.

Проведем расчет амортизации использованного оборудования на примере осциллографа Rigol MS01104. Первоначальная стоимость 160000 рублей; срок полезного использования для осциллографов, согласно

общероссийскому классификатору основных фондов, составляет 3-5 лет, код 143312467; Время работы на всём оборудовании не превышало одного месяца за все время исследования. Тогда:

- норма амортизации:

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

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

- годовые амортизационные отчисления:

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

- ежемесячные амортизационные отчисления:

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

- итоговая сумма амортизации основных средств:

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

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

Таблица 4.9 – Расчеты амортизационных отчислений

Наименование	Первонач. Цена, руб.	Норма амортиз., %	Годовые амортиз. отчисл., руб.	Ежемесяч. амортиз. отчисл., руб.	Затраты, руб.
Осциллограф Rigol MS01104	160000	20	32000	2667	2667
Вакуумная установка	7000000	14.3	1001000	83417	83417
Отрезной станок Brilliant 201	260000	10	26000	2167	2167
Шлифовальная машина Saphir 320	300000	10	30000	2500	2500
РЭМ Hitachi S-3400 N	1500000	14.3	214500	17875	17875
Профилометр	1350000	14.3	193050	16088	16088

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей исследования

Для вычисления основной заработной платы необходимо учесть научных и инженерно-технических работников, участвующих в выполнении выпускной квалификационной работы (включая премии и доплаты)

Основная заработная плата работников вычисляется по формуле:

$$Z_{\text{ЗП}} = Z_{\text{ОСН}} + Z_{\text{ДОП}} \quad (4.6)$$

где $Z_{\text{ОСН}}$ – основная заработная плата; $Z_{\text{ДОП}}$ – дополнительная заработная плата (12-20% от $Z_{\text{ОСН}}$).

Основная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{ОСН}} = Z_{\text{ДН}} \cdot T_{\text{Р}} \quad (4.7)$$

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

Среднедневная заработная плата рассчитывалась по формуле:

$$Z_{\text{ДН}} = \frac{Z_{\text{М}} \cdot M}{F_{\text{Д}}} \quad (4.8)$$

где $Z_{\text{М}}$ – месячный должностной оклад работника, руб; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года; $F_{\text{Д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

В таблице 4.10 представлен годовой баланс рабочего времени для 6-дневной рабочей недели.

Таблица 4.10 – Баланс рабочего времени (для 6-дневной недели)

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер	Техник
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней			
- выходные дни	67	67	67
- праздничные дни	14	14	14
Потери рабочего времени			
- отпуск	56	28	28
- невыходы по болезни	1	1	1
Действительный годовой фонд рабочего времени	227	255	255

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot k_p, \quad (9)$$

где Z_{TC} – заработная плата по тарифной ставке, руб.; k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для г. Томска). Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчёт основной заработной платы

Исполнитель	Z_{TC} , руб.	Z_M , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	26500	34450	1419.45	62.2	88289.79
Сотрудник-техник	16500	21450	883.81	10.8	9545.15
Инженер	1650	2145	88.38	79.2	6999.70
Итого					104834.64

В таблице 4.11 представлены данные по затратам на заработную плату сотрудников за весь период ВКР.

4.3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

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

где, $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0.12-0.15).

Дополнительная заработная плата руководителя:

$$Z_{доп} = 0.13 \cdot 88289.79 = 11477.67 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата сотрудника-техника:

$$Z_{доп} = 0.13 \cdot 9545.15 = 1240.87 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработная плата инженера (магистранта):

$$Z_{доп} = 0.13 \cdot 6999.70 = 909.96 \text{ руб.}$$

Суммарная дополнительная заработная плата равна 13628.5 рублей.

4.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам

государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Ставка отчислений во внебюджетные фонды для учреждений, осуществляющих научную и образовательную деятельность, на 2023 год составляет 30% (ПФ – 22%, ФФОМС – 5.1%, ФСС – 2.9%)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб.} = k_{внеб.} \cdot (Z_{осн.} + Z_{доп.}) \quad (10)$$

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

Расчет отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{внеб.} = (104834.64 + 13628.5) \cdot 0.3 \approx 35538.94 \text{ руб.}$$

4.3.6. Расчет затрат на научные и производственные командировки

При проведении научно-исследовательской работы в научных и производственных командировках не было необходимости.

4.3.7. Накладные расходы (расчёт затрат на электроэнергию)

Потребляемая мощность анализатора составляет 7 кВт/час. Длительность еженедельной работы на комплексной технологической установке составляет 2 часа. Стоимость электроэнергии в Томске составляет 5.748 рубля за 1 кВт/час. Стоимость электропотребления за 5 месяцев рассчитывается по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об.} \cdot C_{э} \cdot t_{об.}, \quad (4.11)$$

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

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Затраты на электроэнергию

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

4.3.8. Формирование бюджета затрат

Расчет бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты НИИ	28788.00	9.28
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	124714.00	40.20
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	104834.64	33.79
Затраты на дополнительной заработной плате исполнителей темы	13628.5	4.39
Отчисления во внебюджетные Фонды	35538.94	11.46
Затраты на научные и производственные командировки	-	0
Накладные расходы	2732.4	0.88
Итого: бюджет затрат НИИ	310236.5	100

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

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

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется по следующей формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{истп}} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.12)$$

где Φ_{ri} – стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта; $I_{\text{финр}}$ – интегральный финансовый показатель разработки.

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

$$I_{ri} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.13)$$

В таблице 4.14 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. Данный проект сравнивается с методикой качественного анализа материалов, заложенной в программе как базовая.

Таблица 4.14 – Сравнительная оценка характеристик

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Разработка	Базовая методика
Способствует росту производительности труда	0.25	5	5
Соответствует требованиям потребителей	0.15	4	4
Энергосбережение	0.2	4	3
Надежность	0.2	4	4
Материалоемкость	0.2	5	4
Итого I_{ri}		4.45	4.25

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

Пример расчёта интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_p = \frac{I_{PP}}{I_{финр}^P} = \frac{0.25 \cdot 5 + 0.15 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 4 + 0.2 \cdot 5}{1} = 4.45$$

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

$$I_{исп} = \frac{I_{Pi}}{I_{финр}}, \quad (4.14)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{CP} = \frac{I_{Д.П.}}{I_{исп}}, \quad (4.15)$$

В таблице 4.15 представлена сравнительная эффективность данного проекта с базовой методикой качественного анализа материалов.

Таблица 4.15 – Сравнительная эффективность

Показатели	Разработка	Базовая методика
Интегральный финансовый показатель	1	1
Интегральный показатель ресурсоэффективности	4.45	4.25
Интегральный показатель эффективности	4.45	4.25
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.05	0.95

Как видно из таблицы 4.15, разработанная методика эффективнее базовой. Традиционная оценка экономической эффективности полученных результатов невозможны, т.к. они носят чисто научный характер.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

1. В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент» был проведен анализ конкурентоспособности модификации поверхности пучками ионов субмиллисекундной длительности с использованием численного моделирования, была подтверждена перспективность данного метода.

2. Проведённый SWOT-анализ проекта, раскрыл сильные и слабые стороны, выявил риски, а также определил возможности для улучшения.

3. Установлено, что в календарных днях длительность работ для научного руководителя составило 72.8 дней, для сотрудника-техника 10.8, а для инженера 92.7 дней.

4. На основе временных показателей по каждой из произведенных работ был построен календарный план-график Ганта, по которому можно увидеть, что самая продолжительная по времени работа – подбор и изучение материалов.

5. Бюджет затрат научно-технического исследования составил 310236.5 рублей. Наибольшая статья расходов приходится на амортизационные отчисления, в связи с большим количеством дорогостоящего специального оборудования (40.2%). На втором месте затраты на основную заработную плату (33.79%).

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

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа ОБМ11		ФИО Гурулеву Александру Валерьевичу	
Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение (НОЦ)	ОЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика конденсированного состояния

Тема ВКР:

Экспериментальное исследование и численное моделирование динамики изменения температурных полей в различных мишенях при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p><i>Объект исследования:</i> ионно-модифицированные слои. <i>Область применения:</i> машиностроение. <i>Рабочая зона:</i> лаборатория <i>Размеры помещения:</i> 35 м². <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> персональный компьютер. <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> снятие профилей поверхности модифицированных образцов, исследование шлифов модифицированных образцов, численное моделирование процесса имплантации.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. ПНД Ф 12.13.1-03. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях. Федеральный закон N 426-ФЗ “О специальной оценке условий труда.” от 28 декабря 2013 г., с изменениями от 28 декабря 2022 года.</p>
<p>2. Производственная безопасность при эксплуатации</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов – Расчет уровня опасного или вредного производственного фактора 	<p>Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Опасность поражения электрическим током; 2. Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, вызывающих риск получения ожогов; 3. Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов <p>Вредные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Отклонение показателей микроклимата; 2. Отсутствие или недостаток необходимого естественного и искусственного освещения; 3. Повышенный уровень шума; <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: использование защитных костюмов, перчатки, виброизолирующая обувь, беруши, наушники. Расчет: расчет системы искусственного освещения</p>
<p>3. Экологическая безопасность при эксплуатации</p>	<p>Воздействие на селитебную зону: наличие промышленных отходов (вторцвет- и чермет, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника) Воздействие на литосферу: в ходе работы дугового</p>

	<p>испарителя может образовываться осажденный слой (тяжелые металлы) на поверхности анода, очистка которого приводит к загрязнению литосферы.</p> <p>Воздействие на гидросферу: наличие частиц металлов и абразива при использовании шлифовально-полировальной машины</p> <p>Воздействие на атмосферу: масляные пары форвакуумного насоса</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при эксплуатации</p>	<p>Возможные ЧС: Природные катастрофы (ураган); Техногенные аварии (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, взрыв газовых баллонов);</p> <p>Наиболее типичная ЧС: пожар (неисправность в электрических сетях, нарушение технологического режима)</p>
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	Гурулев Александр Валерьевич		

ГЛАВА 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы проводилось экспериментальное исследование и численное моделирование динамики изменения температурных полей в различных мишенях при воздействии на их поверхность мощных пучков ионов субмиллисекундной длительности. Численное моделирование, а также исследование полученных образцов проводилось в научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов учебного корпуса № 11.

Работа подразумевает численное моделирование процесса имплантации, а также исследование полученных образцов на профилометре STIL 3D Micromesure и растровом электронном микроскопе Hitachi S-3400 N. Имплантация проводилась ионами титана в мишени из кремния и алюминия.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Трудовой кодекс РФ [28] устанавливает права и обязанности работника и работодателя, правила нормирования и оплаты труда, трудоустройство, вопросы охраны труда. Обеспечение прав работников на охрану труда включает права и гарантии на обеспечение условий, соответствующих требованиям. В статье 219 трудового кодекса РФ детализированы права работников, согласно которым у каждого работника должно быть рабочее место, соответствующее правилам охраны труда. Государство гарантирует работникам защиту их права на труд в условиях, соответствующих требованиям охраны труда (ТК РФ Статья 220). Обеспечение работников средствами индивидуальной защиты, а также оснащения рабочих мест средствами коллективной защиты (ТК РФ Статья 221).

Согласно ГОСТ 12.2.032-78. «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» стол должен соответствовать современным требованиям эргономика и позволять расположить на рабочей поверхности все

необходимое оборудование, в зависимости от характера выполняемой работы. Соответствие рабочего места требованиям ГОСТ 12.2.032-78 представлено в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Требования к организации рабочего места [29]

Требование	Требуемое значение	Значение параметров в помещении
Высота рабочей поверхности стола	Регулируемая высота (680-800 мм) Нерегулируемая высота (более 725 мм)	Нерегулируемая высота 750 мм
Рабочий стул (кресло)	Подъемноповоротный, регулируемый по высоте и углу наклона спинки	Не соответствует
Расположение монитора от глаз пользователя	600-700 мм	Соответствует

Для выполнения всех требований нормативных актов по организации рабочего места лаборатории необходимо подать заявку на приобретения рабочего стула с функциями регулировки по высоте и углу наклона спинки для профилактики монотонии и переутомления.

5.2 Производственная безопасность

Анализ возможных вредных и опасных факторов при работе в научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов представлен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Возможные вредные и опасные факторы

Факторы	Нормативные документы	
Опасные	Электробезопасность (Поражение электрическим током)	ГОСТ 12.1.009-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ) ГОСТ Р12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»
	Производственный травматизм	ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)
Вредные	Отклонение показателей микроклимата	ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
	Недостаточная освещенность рабочей зоны	СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение (с Изменением №1 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
	Повышенный уровень шума	ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением № 1)
	Пожарная опасность	СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред.

	изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643) ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования
Перенапряжение зрительного анализатора	ГОСТ 12.0.230-2007 ССБТ. Системы управления охраной труда. Общие требования СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
Монотонность труда	МР 2257-80 Рекомендации по устранению и предупреждению неблагоприятного влияния монотонии на работоспособность человека в условиях современного производства Дата актуализации: 01.01.2021

В деятельности лаборатории широко используется электричество, которое при замыкании электрической цепи может быть опасным источником для организма человека. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, согласно ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов» представлены в таблице 5.2.1.

Таблица 5.2.1 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [30]

Род тока	U, В	I, мА
	Не более	
Переменный, 50 Гц	2.0	0.3
Переменный, 400 Гц	3.0	0.4
Постоянный	8.0	1.0

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, указанных в таблице. Средствами защиты от воздействия электрического тока являются: изолирующие устройства и покрытия, предохранительные устройства, устройства автоматического отключения, предупредительная сигнализация, знаки безопасности

Требования к производственному оборудованию согласно ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ: конструкция производственного оборудования и его отдельных частей должна исключать возможность их падения, опрокидывания и самопроизвольного смещения при всех предусмотренных условиях эксплуатации [31].

Микроклимат производственных помещений определяется действующими на организм человека температурой, относительной

влажностью и скоростью движения воздуха, а также температурой окружающих поверхностей.

Длительное воздействие на человека неблагоприятного микроклимата резко ухудшает его самочувствие, снижает производительность труда и приводит к заболеваниям. Воздействие высокой температуры и влажности быстро утомляет, может привести к перегреву организма, повышению артериального давления, обезвоживанию организма. Понижение температуры и повышение скорости движения воздуха способствуют усилению конвективного теплообмена и процесса теплоотдачи при испарении пота, что может привести к переохлаждению организма, частым респираторным заболеваниям. Оптимальные и допустимые метеорологические условия температуры и влажности устанавливаются согласно СанПиН 2.2.4.548-96. «Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений» приведены в таблице 5.2.3.

Таблица 5.2.3 – Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений [32]

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	I _a (до 139)	22-24	21-25	60-40	Не более 0.1
Теплый	I _a (до 139)	23-25	22-26	60-40	Не более 0.1

Оптимальные микроклиматические условия обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах. Недостаточная освещенность рабочей зоны вызывает нарушение работы зрительного аппарата и общее утомление, может быть причиной головных болей, снижает производительность труда. Оптимальная освещенность производственных помещений и рабочей зоны обеспечивает гигиенические условия для работающего персонала. Правильно подобранные и расположенные источники света повышают эффективность труда,

предотвращают заболевания персонала и минимизируют риски нарушения техники безопасности.

По способу размещения и распределению освещенности применяют общее и комбинированное освещение. Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПК должно осуществляться системой общего равномерного освещения.

В случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения, когда к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники, предназначенные для освещения зоны расположения документов. Устройство только местного освещения недопустимо, так как оно создает большую разность освещенности рабочих поверхностей и окружающего пространства, что неблагоприятно сказывается на зрении, согласно СНиП 23-05-95 [33].

Окна в помещениях, где эксплуатируется вычислительная техника, должны быть ориентированы на север и северо-восток. Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения в соответствии с СанПиНом 2.2.1/2.1.1.1278-03 указаны в таблице 5.2.5.

Таблица 5.2.5 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения [34]

Помещения	Рабочая Поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности (Г-горизонтальная, В-вертикальная) и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение	
		КЕО $e_{п}$, %		КЕО $e_{п}$, %	
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
Кабинеты, рабочие комнаты, офисы, представительства	Г-0.8	3.0	1.0	1.8	0.6
Помещение	Искусственное освещение				
	Освещенность, Лк				
	При комбинированном освещении		При общем освещении	Показатель дискомфорта, М, не более	Коэффициент пульсации освещенности
	Всего	От общего			

			и		, Кп %, не более
Кабинеты, рабочие комнаты, офисы, представительства	400	200	300	40	15

Характеристика помещения лаборатории: длина = 7 м; ширина = 5 м; высота = 3.5 м; окраска стен – белая; окраска потолка – белая. Для освещения используются светильники с люминесцентными лампами ОД 2-40, с длиной 1230 мм, шириной 266 мм, высотой 158 мм, КПД 75%.

Расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отраженный от потолка и стен:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_a \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 35 \cdot 1.5 \cdot 1.1}{7 \cdot 0.49} = 5051 \text{ (лм)} \quad (5.6)$$

Нормируемая освещенность, согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 $E_H=300$ лм. В соответствии со значением рассчитанного светового потока $\varphi=5051$ Лм, ближайшей световой люминесцентной лампой является лампа типа ЛХБ с электрической мощностью осветительной системы 80 Вт, световым потоком 5000 лм.

Допускается отклонение светового потока лампы не более чем на -10% – $+20\%$. Для этого выполняется проверка по формуле

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{л.станд} - \Phi_{л.расч}}{\Phi_{л.станд}} \cdot 100\% \leq +20\% = \frac{5000 - 5051}{5000} \cdot 100\% = -1.02\%$$

Таким образом, отклонение составило -1.02% , что не превышает допустимые нормы.

Расчет освещения производится методом коэффициента использования светового потока, который показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность и зависит от:

– индекса помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{35}{3.5 \cdot 12} = 0.83 \quad (5.7)$$

– коэффициента отражения стен (свежепобеленные, с окнами без штор): $\rho_{cm}=50\%$;

– коэффициент отражения потолка (свежепобеленный): $\rho_n=70\%$.

Для общего освещения применяются газоразрядные лампы: дневной (ЛД), холодно-белой (ЛХБ), тепло-белой (ЛТБ) и белой цветности (ЛБ).

Помещение лаборатории имеет следующие параметры:

– высота помещения: $H = 350$ см;

– расстояние светильников от перекрытия: $h_c = 35$ см;

Рассчитаем высоту светильника над полом, высоту подвеса:

$$h_n = H - h_c = 350 - 35 = 315 \text{ см} \quad (5.1)$$

– высота рабочей поверхности над полом: $h_{pp} = 75$ см;

– рассчитаем высоту светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{pp} = 315 - 75 = 260 \text{ см} \quad (5.2)$$

При освещении рабочего помещения двухламповыми светильниками ОД при одиночной установке или при непрерывных рядах из одиночных светильников в соответствии с требованиями наименьшая допустимая высота подвеса над полом составляет 3.5 м. Рассчитанная величина $h=2.6$ м не соответствует требованиям.

– расстояние между соседними светильниками: $L = 3.75$ м;

– расстояние от крайних светильников до стены: $l = 0.9$ м.

Данное расстояние от крайних светильников до стены является подходящим, так как необходимая величина равна:

$$\frac{L}{3} = \frac{3.75}{3} = 1.25 \text{ (м)} \quad (5.3)$$

Отношение расстояния между светильниками L к высоте их подвеса h_n определяет величина, равная:

$$\lambda = L/h \quad (5.4)$$

Оптимальное значение для расположения люминесцентных светильников без защитной решетки типов ОД и ОДО составляет 1.4.

Рассчитаем оптимальное расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1.4 \cdot 2.6 = 3.64 \text{ (м)} \quad (5.5)$$

Расположение светильников в лаборатории соответствует установленным требованиям. Количество рядов светильников с люминесцентными лампами определяется по формуле:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{\left(B - \frac{2}{3}L\right)}{L} + 1 = \frac{\left(5 - \frac{2}{3} \cdot 3.75\right)}{3.75} + 1 = 1.66$$

Исходя из полученных результатов, оптимальным будет расположение светильников в два ряда. Количество светильников с люминесцентными лампами в ряду определяется по формуле:

$$n_{\text{св}} = \frac{\left(A - \frac{2}{3}L\right)}{l_{\text{св}} + 0.5} = \frac{\left(7 - \frac{2}{3} \cdot 3.75\right)}{1.23 + 0.5} = 2.59$$

Оптимальное количество светильников в ряду 3. Таким образом, для соблюдения требований освещения лаборатории необходимо 6 светильников с люминесцентными лампами ОД 2-40.

Превышение уровня шума возникает при работе механических и электромеханических изделий. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83. «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности» допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях с шумным оборудованием, составляет 75 дБ [35].

В научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов основными источниками шума являются: профилометр STIL 3D Micromesur, компьютеры (охлаждение внутри системного блока, оптические приводы DVD-ROM). В соответствии со спецификацией профилометр STIL 3D Micromesur имеет уровень шума 25 дБ. Уровень шума блока питания компьютера составляет 25-30 дБ, уровень шума охлаждающего устройства процессора 15-20 дБ, остальные элементы охлаждения являются пассивными

и их уровень шума не учитывается. Шум, вызываемый работой оптических приводов, также не учитывается, так как они используются в работе незначительно малое время. Звукоизоляция в лаборатории не требуется, так как предельное значение уровня шума не достигается.

В зависимости от характеристик веществ и материалов, находящихся в помещении, по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г и Д в соответствии с СП 12.13130.2009 [36]. Рассматриваемое помещение лаборатории относится к категории В, так как в нем содержатся твердые горючие вещества в холодном состоянии. Возможные причины возгорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоках питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности.

Согласно ГОСТ12.1.004-91 профилактические мероприятия, подразделяются на организационно-технические, эксплуатационные и режимные. Организационно-технические мероприятия заключаются в проведении регулярных инструктажей сотрудников ответственным за пожарную безопасность, обучении сотрудников надлежащей эксплуатации оборудования и необходимым действиям в случае возникновения пожара, паспортизацию веществ, материалов и изделий в части обеспечения пожарной безопасности, изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности. К эксплуатационным мероприятиям относят профилактические осмотры оборудования. Мероприятия режимного характера включают установление правил организации работ и соблюдение противопожарных мер [37].

Соблюдение правил пожарной безопасности, предотвращает возникновение возгораний и пожаров:

- содержание помещений в соответствии с требованиями пожарной безопасности;

- надлежащая эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электропитания, контроль нагрева оборудования);
- обучение производственного персонала правилам пожарной безопасности;
- наличие, правильное размещение и использование средств пожаротушения.

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда, повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а также около выхода из помещения. В лаборатории, на этаже находится 2 огнетушителя ОП-3, переносные порошковые. Лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

5.3 Экологическая безопасность

При работе в лаборатории возможные источники загрязнения окружающей среды с воздействием на:

- Селитебную зону: промышленные отходы (вторцвет- и чермет, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника).
- Литосферу: в ходе работы дугового испарителя может образовываться осажденный слой (тяжелые металлы) на поверхности анода, очистка которого приводит к загрязнению литосферы.
- Гидросферу: наличие частиц металлов и абразива при использовании шлифовально-полировальной машины

- Атмосферу: масляные пары форвакуумного насоса.

Вышедшее из строя ПЭВМ и сопутствующая оргтехника относится к IV классу опасности и подлежит специальной утилизации согласно ГОСТ Р 53692-2009 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами.» Этапы технологического цикла отходов, при которой более 90% отправится на вторичную переработку и менее 10% будут отправлены на свалки [38].

В ходе выполнения работы и обработки результатов также создается бытовой мусор (канцелярские, пищевые отходы, искусственные источники освещения), который должен быть утилизирован в соответствии с определенным классом опасности или переработан, чтобы не оказывать негативное влияние на состояние литосферы.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Под источником ЧС понимают опасное природное явление, аварию или опасное техногенное происшествие, широко распространенную инфекционную болезнь людей, сельскохозяйственных животных и растений, а также применение современных средств поражения

Рассмотрим возможные аварийные ситуации в научной лаборатории высокоинтенсивной имплантации ионов учебного корпуса № 11:

- Пожар в здании в результате неисправности в электрических сетях, нарушения технологического режима, нарушения техники пожарной безопасности сотрудников.

Нормы пожарной безопасности при работе на ПЭВМ и сопутствующей оргтехнике утверждены в ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования» [39].

- Работать только за исправным оборудованием.
- Не подключать одновременно к сети количество потребителей, превышающих допустимую нагрузку.
- Иметь первичные средства пожаротушения (огнетушители, пожарные гидранты).
- Свободные эвакуационные выходы.
- Расположение схемы эвакуационных путей в месте наибольшего сосредоточения сотрудников.

В случае возникновения пожара в здании автоматически срабатывают датчики пожаротушения, и звуковая система оповещает всех сотрудников о немедленной эвакуации из здания. На этаже находится два огнетушителя и пожарных крана, а также три эвакуационных выхода.

Мероприятия по защите населения при возникновении ЧС проводятся согласно ГОСТ Р 22.3.03-94. «Безопасность в ЧС. Защита населения» [40].
Основные положения:

Эвакуация сотрудников из зоны ЧС.

- Использование средств индивидуальной защиты органов дыхания и кожных покровов.
- Проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ в зонах ЧС.
- Проведение мероприятий медицинской защиты (первая медицинская помощь).

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕСТВЕННОСТЬ»

В главе рассмотрены вредные и опасные факторы:

- Электробезопасность (поражение электрическим током)
- производственный травматизм
- отклонение показателей микроклимата в лаборатории
- недостаточная освещенность рабочей зоны
- повышенный уровень шума
- пожарная опасность
- перенапряжение зрительного анализатора

Проведен расчет системы общего равномерного искусственного освещения для лаборатории. Рассмотрены чрезвычайные ситуации, и меры ликвидации их последствий. Мероприятия по предупреждению негативного воздействия вредных и опасных факторов на сотрудников, их соответствие нормативным требованиям описаны в соответствующих разделах главы.

Научная лаборатория высокоинтенсивной имплантации ионов отнесена к классу В по пожароопасности и к 1 категории по электробезопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые продемонстрировано применение численного моделирования динамики изменения температурных полей в мишенях из кремния и алюминия в зависимости от плотности мощности пучка ионов титана субмиллисекундной длительности.

Представлены результаты экспериментального исследования распределения плотности тока пучка ионов титана. Так было выявлено, что при нахождении секционированного цилиндра Фарадея дальше на 20 мм от геометрического фокуса наблюдается максимальное значение ионного тока. Продемонстрированы зависимости ионного тока на сплошной коллектор от ускоряющего напряжения. Полученные данные использовались для проведения численного моделирования.

Численным моделированием исследована динамика изменения температурных полей в образцах из алюминия и кремния в зависимости от их свойств и плотности мощности ионного пучка субмиллисекундной длительности в диапазоне от $2 \cdot 10^8$ Вт/м² до $3.5 \cdot 10^8$ Вт/м². Определены условия облучения, обеспечивающие импульсный нагрев приповерхностного слоя до высоких температур с обеспечением сверхвысоких скоростей охлаждения и прогревом матричного материала до температур, при которых не происходит существенного ухудшения микроструктуры и эксплуатационных свойств.

Так для образца алюминия площадью 4 см² с толщиной 3 мм, усредненная плотность мощности, при которой еще не наблюдается рост зерна в алюминиевом образце, не превышает $8 \cdot 10^3$ Вт/м², что соответствует температуре стабилизации 330 °С. Данный режим можно использовать для предварительного нагрева образца. После чего, при импульсной плотности мощности по периоду $2 \cdot 10^8$ Вт/м² можно добиться оптимальной температуры в 525 °С для импульсно-периодической высокоинтенсивной ионной имплантации.

Для кремниевого образца площадью 5 см^2 с толщиной 0.38 мкм рост зерна не наблюдается при импульсной плотности мощности $2.5 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$, что соответствует температуре 538 °С . При импульсной плотности мощности в $2 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$ и начальной температуре 538 °С , образец достигает температуры 1084 °С .

Проведенные экспериментальные исследования доказали применимость численного моделирования для предварительного анализа физического эксперимента, что в свою очередь позволяет сократить время дальнейших исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hoshiyama Y., Mizobata R., Miyake H. Mechanical properties of austenitic stainless steel treated by active screen plasma nitriding //Surface and Coatings Technology. – 2016. – Т. 307. – С. 1041-1044.
- 2 Asri R. I. M. et al. Corrosion and surface modification on biocompatible metals: A review //Materials Science and Engineering: C. – 2017. – Т. 77. – С. 1261-1274.
- 3 Yang G. Y. et al. Deposition of TiN/TiAlN multilayers by plasma-activated EB-PVD: tailored microstructure by jumping beam technology //Rare Metals. – 2017. – Т. 36. – №. 8. – С. 651-658.
- 4 Chi Y. et al. Laser surface alloying on aluminum and its alloys: A review //Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Т. 100. – С. 23-37.
- 5 Ivanov Y. F. et al. Superhard nanocrystalline Ti–Cu–N coatings deposited by vacuum arc evaporation of a sintered cathode //Surface and Coatings Technology. – 2012. – Т. 207. – С. 430-434.
6. Ryabchikov A. I. Progress in low energy high intensity ion implantation method development //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 388. – С. 125561.
7. Ryabchikov A. I. High-Intensity Implantation With an Ion Beam's Energy Impact on Materials //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2021. – Т. 49. – №. 9. – С. 2529-2534.
8. Рябчиков А. и др. Формирование мощных импульсных пучков ионов титана субмиллисекундной длительности из плазмы вакуумной дуги. – 2022.
9. Ryabchikov A. I. et al. High intensity metal ion beam generation //Vacuum. – 2017. – Т. 143. – С. 447-453.
10. Ryabchikov A. I. et al. High-intensity low energy titanium ion implantation into zirconium alloy //Applied Surface Science. – 2018. – Т. 439. – С. 106-112.

11. Ryabchikov A. I. et al. Low energy, high intensity metal ion implantation method for deep dopant containing layer formation //Surface and Coatings Technology. – 2018. – Т. 355. – С. 123-128.
12. Ryabchikov A. I. et al. Plasma-immersion formation of high-intensity gaseous ion beams //Vacuum. – 2019. – Т. 165. – С. 127-133.
13. Koval T. V. et al. Formation of high intensity ion beams with ballistic focusing //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 927. – №. 1. – С. 012082.
14. Ryabchikov A. I., Sivin D. O., Bumagina A. I. Physical mechanisms of macroparticles number density decreasing on a substrate immersed in vacuum arc plasma at negative high-frequency short-pulsed biasing //Applied surface science. – 2014. – Т. 305. – С. 487-491.
15. Ryabchikov A. I. et al. Regularities of plasma-immersion formation of long-pulse high-intensity titanium ion beams //Russian Physics Journal. – 2018. – Т. 61. – №. 7. – С. 1338-1346.
16. Poate J. M., Foti G., Jacobson D. C. Surface modification and alloying: by laser, ion, and electron beams. – 2013.
17. Рябчиков А. и др. Модификация стали 40Х при высокоинтенсивной имплантации ионов азота //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61. – №. 2. – С. 60-66.
18. Ryabchikov A. I. et al. High-intensity low energy titanium ion implantation into zirconium alloy //Applied Surface Science. – 2018. – Т. 439. – С. 106-112.
19. Koval N. N. et al. Low-energy high-current plasma immersion implantation of nitrogen ions in plasma of non-self-sustained arc discharge with thermionic and hollow cathodes //Surface and Coatings Technology. – 2018. – Т. 340. – С. 152-158.
20. Lopatin I. V. et al. Low-energy plasma-immersion implantation of nitrogen ions in titanium by a beam with ballistic focusing //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 3. – С. 032043.

21. Ryabchikov A. I. et al. Low energy implantation of nitrogen ions by extended beam with a ballistic focusing in a stainless steel //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1393. – №. 1. – С. 012125.
22. Ryabchikov A. I. et al. Modification of 40X13 steel at high-intensity nitrogen ion implantation //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 3. – С. 032053.
23. Ryabchikov A. I. et al. Modification of the microstructure and properties of martensitic steel during ultra-high dose high-intensity implantation of nitrogen ions //Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 388. – С. 125557.
24. Ryabchikov A. I. et al. Surface modification of Al by high-intensity low-energy Ti-ion implantation: Microstructure, mechanical and tribological properties //Surface and Coatings Technology. – 2019. – Т. 372. – С. 1-8.
25. Ryabchikov A. I. et al. Ballistic formation of high-intensity low-energy gas ion beams //Review of Scientific Instruments. – 2020. – Т. 91. – №. 1. – С. 013326.
26. Шульмин В. А., Усынина Т. С. Экономическое обоснование в дипломных проектах. – 2004.
27. Кнышова Е. Н., Панфилова Е. Е. Экономика организации: Учебник для вузов //М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М. – 2013.
28. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 года № 197-ФЗ (с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.03.2023 г.)
29. ГОСТ 12.2.032-78. «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».
30. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов».
31. ГОСТ 12.2.003-91. «Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности».
32. СанПиН 2.2.4.548-96. «Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений»

33. СНиП 23-05-95. «Естественное и искусственное освещение».
34. СанПиНом 2.2.1/2.1.1.1278-03. «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий».
35. ГОСТ 12.1.003-83. «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности».
36. СП 12.13130.2009. «Определение категорий помещений, заданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».
37. ГОСТ 12.1.004-91. «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования».
38. ГОСТ Р 53692-2009. «Ресурсосбережение. Обращение с отходами».
39. ГОСТ 12.1.004-91. «Пожарная безопасность. Общие требования».
40. ГОСТ Р 22.3.03-94. «Безопасность в ЧС. Защита населения».

Приложение А

Раздел 2

Experimental equipment and research techniques

Обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ11	Гурулев Александр Валерьевич		

Консультант школы отделения (НОЦ) ИШФВП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший научный сотрудник НЛВИИ ИШФВП	Иванова Анна Ивановна	к.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ОИЯ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Квашнина Ольга Сергеевна			

CHAPTER 2. EXPERIMENTAL EQUIPMENT AND RESEARCH TECHNIQUES

2.1 Scheme of the experimental setup

The studies were carried out on a complex technological installation for ion-beam and ion-plasma processing of materials. This complex installation consists of: a vacuum degree control system, a vacuum chamber, a high-vacuum turbomolecular pump, a fore-vacuum rotary vane pump, a high-intensity ion beam formation system, a vacuum degree control system, a signal detection system, and a plasma generator. The installation diagram is shown in Figure 2.1.

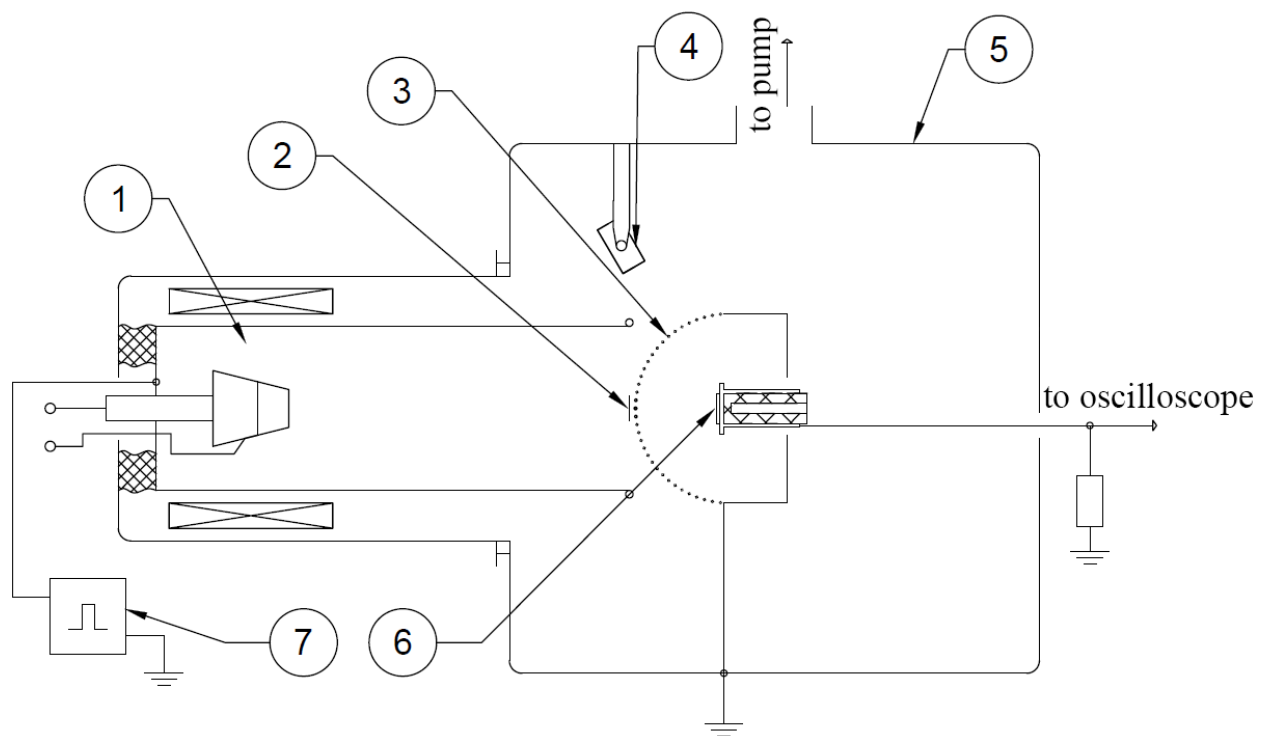


Figure 2.1 - Scheme of the experimental setup: 1 - Vacuum-arc plasma generator; 2 – cutting electrode; 3 – grid electrode; 4 – pulse pyrometer; 5 – vacuum chamber; 6 - sample; 7 - pulse-periodic high-voltage generator.

The vacuum-arc plasma generator of the Raduga-5 ion-plasma source was used as a plasma generator. This source makes it possible to carry out plasma-assisted deposition, as well as to heat the target with an ion beam to the required temperature. One of the features of the Raduga-5 source is the combination of a

continuous plasma flow generated by a vacuum arc and the periodic formation of a pulsed beam of metal ions. The pulse voltage generator of this source with a pulse duration in the range from 150 to 500 μs and an amplitude of up to 40 kV provides ion acceleration. The Raduga-5 source is shown in Figure 2.2.



Figure 2.2 - Source of continuous gas-discharge plasma with a heated cathode "Rainbow-5"

The Raduga-5 ion plasma source consists of a vacuum arc plasma source on metal vapors, a plasma formation zone and a set of grids for extracting ions. The ion beam is generated using a repetitively pulsed vacuum arc discharge. To initiate a discharge, a positive voltage is applied to the trigger electrode, as a result of which a cathode spot is formed on the cold cathode due to a breakdown on the surface of the ceramic insulator located between the cathode and the trigger electrode. The expanding plasma moves from the cathode spot to the anode.

After preliminary evacuation, the residual pressure of the atmosphere in the vacuum chamber before the start of the experiments was 10^{-3} Pa.

2.2 System for the formation of high-intensity ion beams

The formation of repetitively pulsed high-intensity gas ion beams is based on plasma-immersion extraction, acceleration of plasma ions in a high-voltage shell, and their subsequent ballistic focusing in an equipotential drift space [7].

The extraction of ions and their ballistic focusing by the plasma immersion method is carried out by the ion beam formation system. This system consists of a grid electrode connected to a cylindrical electrode, which serves to provide a closed equipotential space in the beam drift area. The grid electrode is made in the form of a part of a sphere with a radius of 130 mm. The grid cell size was $1 \times 1 \text{ mm}^2$ with a transparency of 64%. Samples for irradiation are located in the geometric focus of the focusing system. Figure 2.3 shows the beam forming system.



Figure 2.3 – System for the formation of high-intensity ion beams

The "solar eclipse" system is used to clean the plasma from the microdroplet fraction. This system is a disk electrode located in the center of the focusing mesh electrode. The disk electrode prevents the direct passage of macroparticles of the vacuum arc discharge from the working surface of the cathode into the beam focusing area.

2.3 Experimental methodology

To determine the distribution of the ion beam, a sectioned Faraday cup was used, consisting of nineteen individual collectors. It was located instead of the target in the beam impact zone. The collector has a movement mechanism that allows you to place a sectioned Faraday cup relative to the geometric focus of the

focusing system. The appearance of a sectioned Faraday cup is shown in Figure 2.4.



Figure 2.4 - Sectioned Faraday cup

Due to the large number of collectors and the use of two Rigol MS01104 four-channel digital oscilloscopes, the signal from them was read in groups of 6 collectors. Thus, we got 3 groups of 6 collectors and one group consisting of one nineteenth collector.

Preliminary filling of the drift space with titanium plasma provides a continuous mode of the arc evaporator, which contributes to the neutralization of the space charge of the pulsed ion beam during its generation and transportation. The beam was generated in a repetitively pulsed mode using a pulsed voltage generator with a pulse duration of 500 μs , with amplitude variation in the range from 10 kV to 30 kV.

When registering single oscillograms, strong oscillations were noticed. This is due to the peculiarity of the formation of the ion flux in the arc plasma, as a result of which, for statistical reliability, averaging over sixteen pulses was used. Averaging was carried out by software oscilloscope.

2.3.1 Preparation of samples

For the experiments, we prepared samples of silicon with an area of 5 cm^2 with a thickness of 380 μm and aluminum of 4 cm^2 with a thickness of 3 mm. The

samples were treated with coarse sandpaper using a Saphir 320 grinder and polisher. The final polishing takes place on the felt using a diamond suspension.

2.3.2 Sample temperature measurement

The temperature of the samples was measured using a KLEIBER 740-LO pulsed non-contact fast pyrometer. The temperature of the samples was measured using a KLEIBER 740-LO pulsed contactless high-speed pyrometer. It was installed in a vacuum chamber and recorded the dynamic change in the surface temperature of the irradiated target. To do this, a hole was made in the grid electrode so that the infrared beam of the pyrometer could freely hit the surface of the target being modified. During the experiments, the emissivity of the target surface was taken into account.

2.4 Numerical simulation of the dynamics of changes in temperature fields

The dynamics of changes in the temperature fields in the targets was studied using numerical simulation methods for samples of silicon with an area of 5 cm^2 and a thickness of $380 \text{ }\mu\text{m}$ and aluminum with an area of 4 cm^2 and a thickness of 3 mm . The energy impact on the surface of the material was carried out using high-intensity pulsed and repetitively pulsed beams. The computational domain of the problem is shown in Figure 2.5.

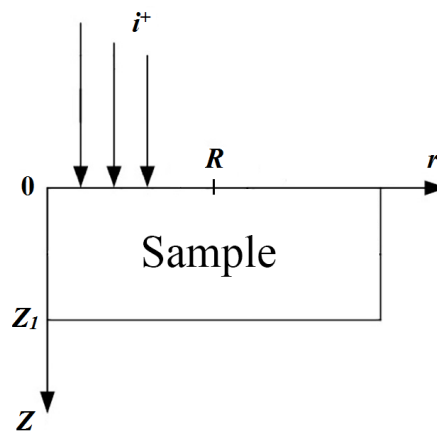


Figure 2.5 - Calculation area: R and Z_1 - radius and thickness of the sample

The mathematical model is based on the heat equation written in cylindrical coordinates with azimuthally symmetry and has the following form:

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

where $T(z, r, t)$ – a space-time function describing the temperature distribution in the irradiated sample, α – the thermal diffusivity of the irradiated material.

The boundary conditions on the modified surface of the sample have the form:

$$\lambda(z) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\substack{z=0 \\ 0 \leq r \leq R}} = -q(r) + \varepsilon_p (T^4 - T_{ch}^4) \quad (2)$$

where $q(r)$ – the ion beam power density averaged over the period, R – the beam cross-sectional radius, T_{ch} – the temperature of the vacuum chamber walls, ε_p – the reduced emissivity of the sample surface, calculated taking into account the reflection of thermal radiation from the walls of the vacuum chamber:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon_{ch}} - 1}, \quad (3)$$

where ε and ε_{ch} are the emissivity of the sample surface and vacuum chamber walls, respectively. In calculations $T_{ch}=300$ K, $\varepsilon_{ch}=1$. On the irradiated surface outside the beam action zone and on the side surface of the sample, the heat sink due to thermal radiation is set, on the axis $r=0$ – $\lambda(z) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$.

The calculations were performed using the power density function $q(r,t)$ constructed from the oscillograms of the current density and ion energy measured in experiments.

For numerical simulation, it is necessary to provide data on the distribution of the ion current density over the beam cross section. For this, a separate experiment was carried out using a sectioned Faraday cup. This collector consisted of five separate collectors with an area of 2×2 mm², located at a distance of 2.5 mm from each other. The obtained data were entered into the calculation program.

The simulation of the experiment is carried out in the Ion Beam program developed at the Tomsk Polytechnic University by Doctor of Physics and Mathematics Galina Alekseevna Bleicher. This program allows you to calculate the temperature from the depth in the center of the target, the temperature at the surface and from the radius of the target. The program interface is shown in Figure 2.6.

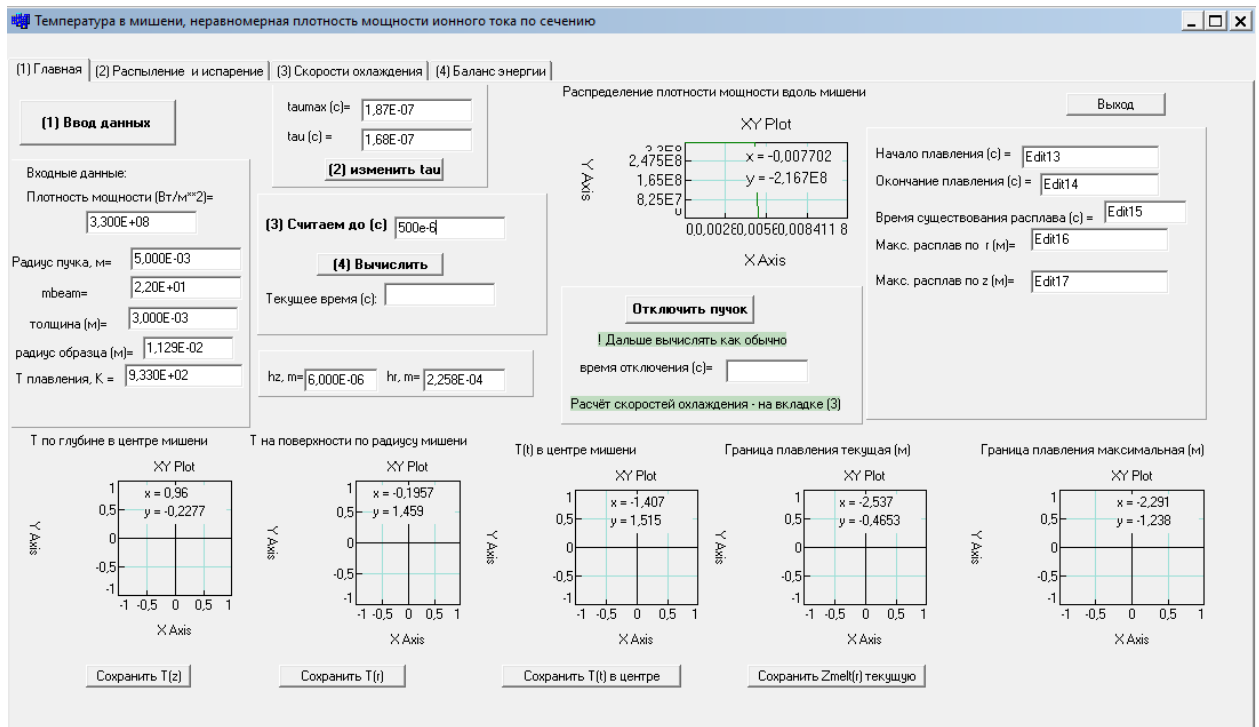


Figure 2.6 - Interface of the program for implantation simulation

To carry out the simulation, it is necessary to indicate the thermophysical properties of the target, such as: thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, molar heat of evaporation, vibration frequency of atoms in the lattice, binding energy of atoms on the surface, and others. It is also necessary to indicate the size and thickness of the sample, the beam radius, the emissivity of the sample, and the mass of the implanted ion.

In this work, the dependences of the target temperature on the duration of ion beam pulses with different power densities were simulated. The pulse duration was 50, 150, 300, and 500 μs .

In addition, the dependence of the target temperature on the irradiation time with an ion beam with a period-averaged power density was modeled. In this case, it was necessary to obtain a way to stabilize the temperature of the samples. After that, it is necessary to choose the power density of the ion beam, at which the temperature of the sample was close to the recrystallization temperature of the target material.

Next, the recrystallization temperature of the target material was used as the initial temperature in order to obtain the temperature dependence on time in the steady state mode of irradiating the sample surface with a high-intensity ion beam with different pulsed power density, bringing the sample surface temperature closer to melting. Here, the beam was turned off after 500 μs , and the sample cooled down to 2000 μs .

The obtained dependencies were used to determine the optimal parameters for the experiment.