

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 – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Моделирование формирования металлических покрытий при работе магнетронных распылительных систем

УДК 621.793.7:621.385.64

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Оруджов Эльвин Эльшад оглы		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Т.Б.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н., доцент		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК(У)-9	Способен проявлять предприимчивость в практической деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
ОПК(У)-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	Способен осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, предоставлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-3	Способен использовать в профессиональной деятельности современные информационные системы, анализировать возникающие при этом опасности и угрозы, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
ПК(У)-1	Готов принимать участие в теоретических исследованиях в различных областях физики, связанных с современными высокотехнологическими способами энергетического воздействия на материалы, основанными на использовании радиационных и плазменных потоков, разрабатывать адекватные физические и математические модели изучаемых процессов.

Код компетенции	Наименование компетенции
ПК(У)-2	Способен участвовать в экспериментальных исследованиях в различных областях физики, связанных с воздействием плазмы и пучков заряженных частиц на вещество, самостоятельно осваивать современную физическую аналитическую и технологическую аппаратуру, применять современные методы исследования свойств материалов и различных структур, проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов, оборудования и изделий.
ПК(У)-3	Способен осуществлять самостоятельный поиск, изучение и использование научно-технической информации по тематике исследования, применять современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области
ПК(У)-4	Способен проектировать плазменно-пучковые технологические процессы и оборудование для применения в научных исследованиях и промышленности
ПК(У)-5	Готов к участию в производственно-технологической деятельности, связанной с применением плазменных и пучковых технологий для обработки материалов и синтеза новых материалов (в том числе нанесению функциональных покрытий), определению основных параметров технологических процессов, анализу физических и механических свойств изделий и материалов.
ПК(У)-6	Способен применять современные цифровые технологии и пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров, обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов.
ПК(У)-7	Способен к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования

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

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки – 14.03.02 Ядерные физика и технологии
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Блейхер Г.А.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А8Б	Оруджов Эльвин Эльшад оглы

Тема работы:

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№47-2/с от 16.02.2022 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2022 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ol style="list-style-type: none">1. Программный код NASCAM2. Язык программирования Python3. Аналитические модели различных аспектов процесса магнетронного осаждения/испарения из жидкой фазы
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1. Произвести моделирование роста алюминиевых покрытий при различных режимах осаждения2. Выявить влияние на морфологию и структуру покрытий факторов скорости осаждения, энергетического распределения атомов, отрицательного смещения на подложке, типа рабочего газа

Перечень графического материала	<ol style="list-style-type: none"> 1. Титульный лист 2. Актуальность работы 3. Цель и задачи работы 4. Описание NASCAM 5. Экспериментальные данные 6. Энергетический спектр 7. Влияние режима осаждения на свойства покрытий: 3D-модель покрытия, шероховатость, пористость 8. Влияние газа и потенциала смещения на свойства покрытий: 3D-модель покрытия, шероховатость, пористость 9. Заключение
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Якимова Татьяна Борисовна
Социальная ответственность	Передерин Юрий Владимирович

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	04.10.2021 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н., доцент		04.10.2021 г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Оруджов Эльвин Эльшад оглы		04.10.2021 г.

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А8Б	Оруджов Эльвин Эльшад оглы

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей в соответствии со штатным расписанием НИ ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- районный коэффициент- 1,3; - коэффициент дополнительной заработной платы -1,18; - накладные расходы – 20%
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды – 30,2 % от заработной платы

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Проведение конкурентного анализа. Определение и сегментирование целевого рынка. SWOT-анализ проекта.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Планирование этапов работы, определение календарного графика и трудоемкости работы, расчет бюджета
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Расчёт сравнительной эффективности исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Т.Б.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Оруджов Эльвин Эльшад оглы		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А8Б	Оруджов Эльвин Эльшад оглы

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ Б.П. Вейнберга
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, освещение, шумы, электромагнитные поля, физические и нервно-психологические нагрузки) – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду – чрезвычайных ситуаций
2. <i>Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i>	ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ ГОСТ 12.1.019-2017 ГОСТ 22.0.01-94

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)
3. <i>Охрана окружающей среды:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);

	<ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.
<i>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий
<i>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А8Б	Оруджов Эльвин Эльшад оглы		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 110 страниц, 25 рисунков, 17 таблиц, 45 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: моделирование, магнетронное распыление, тонкие плёнки, структура, морфология.

Объектом исследования является процесс магнетронного распыления металлических покрытий.

Цель работы – выявление особенностей формирования структуры и морфологии металлических покрытий при магнетронном распылении испаряющихся мишеней на примере осаждения алюминия.

В процессе исследования проводилось моделирование процесса осаждения тонких металлических плёнок с помощью программного кода NASCAM. Исследовались закономерности формирования шероховатости и пористости осаждаемых плёнок.

В результате работы был выявлен ряд особенностей формирования структуры и морфологии металлических покрытий.

Содержание

Введение.....	13
Глава 1. Анализ возможностей компьютерного моделирования в исследованиях процессов, связанных с формированием поверхностных структур, и постановка задачи исследований.....	15
1.1 Обзор подходов к моделированию процессов, связанных с формированием поверхностных структур на атомарном уровне	15
1.2 Сведения о программном коде NASCAM, предназначенном для анализа особенностей формирования тонкопленочных структур	19
1.3 Особенности физических условий, имеющих место при формировании покрытий методами, использующими магнетронное распыление	20
1.4 Постановка задачи исследований с помощью программного кода NASCAM.....	24
Глава 2. Описание программного кода NASCAM как инструмента для изучения особенностей формирования структуры металлических покрытий.....	26
2.1 Физические сущности алгоритмов, заложенных в NASCAM	26
2.2 Структура рабочего пространства, в котором производится настройка и запуск моделирования	30
2.3 Содержание файлов с входными и выходными данными.....	33
2.3.1 Входные данные	33
2.3.2 Список основных выходных файлов.....	38
2.4 Возможности NASCAM для моделирования формирования структурных особенностей покрытий, влияющих на их функциональные характеристики ...	39
2.4.1 Выбор параметров моделирования.....	39
2.4.2 Анализ выходных данных	41
Глава 3. Результаты исследований и их анализ	44
3.1 Описание условий осаждения металлических покрытий в разных режимах работы распылительной системы.....	44
3.2 Задание входных данных для программного кода NASCAM.....	46
3.3.2 Эмпирические данные	46
3.3.3 Определение энергетического спектра осаждаемых частиц	50
3.3.4 Параметры модели NASCAM	54

3.3	Особенности структуры металлических покрытий, выявленные при моделировании с помощью программного кода NASCAM	55
3.3.1	Влияние режима осаждения (скорости осаждения и энергетического спектра частиц) на свойства покрытий.....	55
3.3.2	Влияние рабочего газа и напряжения смещения на свойства покрытий	61
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение		66
4.1	Оценка коммерческого потенциала	67
4.1.1	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	67
4.1.2	SWOT-анализ	69
4.2	Планирование научно-исследовательской работы	70
4.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	71
4.2.2	График проведения научного исследования	73
4.3	Бюджет научно-технического исследования.....	75
4.3.1	Материальные затраты НТИ	75
4.3.2	Расчёт заработной платы	75
4.3.3	Расчёт затрат на страховые взносы	77
4.3.4	Амортизационные отчисления.....	77
4.3.5	Расчёт накладных расходов.....	77
4.3.6	Формирование бюджета затрат НТИ	78
4.4	Оценка сравнительной эффективности исследования.....	79
4.4.1	Интегральный показатель финансовой эффективности.....	79
4.4.2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	80
4.4.3	Интегральный показатель эффективности разработки и аналога	82
4.4.4	Сравнительная эффективность разработки	82
Вывод по главе 4		83
Глава 5. Социальная ответственность.....		84
5.1	Анализ вредных и опасных производственных факторов	85
5.1.1	Микроклимат	87
5.1.2	Повышенный уровень шума.....	90
5.1.3	Физические и нервно-психологические перегрузки.....	90

5.1.4	Электромагнитное излучение	93
5.1.5	Освещенность	94
5.1.6	Электробезопасность	96
5.1.7	Пожаровзрывобезопасность	96
5.2	Анализ вероятных чрезвычайных ситуаций (ЧС)	98
	Вывод по главе 5	101
	Заключение	102
	Список использованных источников	103
	Приложение А	108

Введение

В настоящее время модифицирование поверхностных свойств различных материалов и твердотельных структур путем осаждения различных пленок и покрытий рассматривается как один из наиболее эффективных подходов к созданию новых материалов и изделий.

Одной из важных задач является прогнозирование различных структурных характеристик, влияющих на функциональные свойства получаемых изделий в целом. Так как набор управляющих параметров часто бывает довольно обширным, то исключительно экспериментальный подход при проведении исследований не является оптимальным. Целесообразно комбинировать его с численным моделированием. Математическое моделирование помогает выявлять роль различных факторов и механизмов на различных стадиях формирования покрытий, а также определять оптимальные рабочие (управляющие) параметры разрабатываемой технологии.

В научно-образовательном центре Б.П. Вейнберга ТПУ ведутся исследования высокоскоростного осаждения покрытий с использованием магнетронных распылительных систем (МРС). Особенность подхода, реализуемого в этих методах, состоит в том, что создаются условия, при которых мишень МРС сильно разогревается и испытывает испарение дополнительно к распылению. Были получены закономерности увеличения скорости осаждения покрытий в зависимости от мощности МРС и других параметров. С помощью экспериментов выявлен ряд особенностей формирования структурных и функциональных свойств металлических покрытий, полученных этим методом. Однако их причины далеко не всегда являются понятными. Поэтому было решено привлечь математическое моделирование процессов на поверхности растущей плёнки с учётом условий осаждения, имеющих место в экспериментах.

Необходимо выяснить, как влияют механизмы роста покрытия в этих условиях на их структуру и морфологию.

Инструментом моделирования формирования покрытий и исследования их свойств был выбран пакет программ статистического моделирования NASCAM. Данное программное обеспечение позволяет рассчитывать системы, состоящие из сотен тысяч атомов, и не требует большой вычислительной мощности.

Целью работы является выявление особенностей формирования структуры и морфологии металлических покрытий при магнетронном распылении испаряющихся мишеней на примере осаждения алюминия.

Были поставлены следующие **задачи**:

- описать физическую модель формирования покрытий на основе высокоскоростного осаждения алюминия на медную подложку;
- задать плотности потоков и построить энергетическое распределение осаждаемых атомов, определить все входные параметры для расчётной модели;
- с помощью NASCAM «вырастить» плёнки в разных режимах магнетронного осаждения;
- получить данные о показателях шероховатости и пористости плёнок в разных режимах осаждения покрытий;
- выявить влияние факторов рабочего газа и отрицательного потенциала смещения на показатели шероховатости и пористости.

Глава 1. Анализ возможностей компьютерного моделирования в исследованиях процессов, связанных с формированием поверхностных структур, и постановка задачи исследований

1.1 Обзор подходов к моделированию процессов, связанных с формированием поверхностных структур на атомарном уровне

Процесс получения покрытия при магнетронном распылении можно условно поделить на несколько этапов:

- 1) атомы распыляются на мишени магнетронной распылительной системы;
- 2) атомы летят от мишени к подложке, в том числе через газоразрядный промежуток, сталкиваясь с другими атомами (преимущественно с атомами рабочего газа);
- 3) атомы попадают на подложку, образуя покрытие.

Для математического моделирования каждого из этапов существуют различные подходы.

Одним из популярных методов является метод молекулярной динамики. Его суть заключается в интегрировании уравнения движения отдельных частиц для отслеживания общей эволюции системы [1]. Для работы с большим количеством частиц этим методом требуется большая вычислительная мощность и/или длительное время моделирования. Плюсом данного подхода является присутствие физических обоснований в расчётах. В процессе магнетронного распыления данный метод может быть использован для расчёта траекторий электронов и ионов в газоразрядном промежутке [2].

Для решения задач, связанных с оценкой различных свойств покрытий могут применяться полуэмпирические подходы. Теория функционала плотности позволяет рассмотреть систему атомов с точки зрения квантовой механики. Метод требует большой вычислительной мощности и подходит для исследования систем, состоящих из небольшого количества атомов. Одной из программ, выполняющих данные задачи, является Abinit [3].

Ещё одним популярным методом математического моделирования является статистическое моделирование, а именно кинетический метод Монте-Карло. Данный метод основывается на оценке вероятностей различных возможных событий, по которой рассчитывается общая эволюция системы [4]. Огромным преимуществом данного метода перед другими являются относительно небольшие требования к вычислительной мощности, вследствие чего имеется возможность моделирования систем с большим количеством данных.

При моделировании процесса магнетронного осаждения можно рассчитывать большой набор параметров: скорость распыления, скорость осаждения, энергетическое и угловое распределение налетающих на подложку частиц, структуру и свойства получаемых покрытий.

Моделирование формирования структуры покрытия является наиболее сложной задачей, так как включает в себя необходимость учитывать последовательное взаимодействие большого числа осаждаемых атомов между собой и с подложкой. Для выполнения подобных задач применяются преимущественно статистические методы.

Для решения задач, не требующих учета взаимодействия и относительного расположения атомов, применяются аналитические модели.

Одна из моделей роста покрытий методом МРС [5] учитывает скорость осаждения и толщину покрытия без учета её структуры на основе второго закон Ламберта-Кнудсена. Скорость нанесения пленки для протяженных участков зоны распыления согласно этой модели:

$$V(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{min}}^{R_{max}} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{v_t(x_1) \cos \phi^2(x_1, y_1)}{l^2(x_1, y_1)} dx_1 dy_1, \quad (1.1)$$

где L – ширина протяженной зоны;

R_{max} – внешний радиус скругления магнетрона;

R_{min} – внутренний радиус скругления магнетрона;

l – расстояние от точки распыления до точки конденсации,

ϕ – угол между нормалью к поверхности мишени и направлением распространения эмитированных частиц.

Количество атомов материала мишени, распыленных в единицу времени можно рассчитать из выражения:

$$v_t(r_1) = Y_t \cdot \frac{j_i(r_i)}{e}, \quad (1.2)$$

где Y_t – коэффициент распыления мишени;

e – заряд электрона;

$j_i(r_i)$ – плотность ионного тока на поверхности мишени на радиусе r_1 , которая может быть посчитана по формуле:

$$j_i(r_i) = \frac{j_t(r_i)}{1 + \gamma_t}, \quad (1.3)$$

где γ_t – коэффициент ионно-электронной эмиссии материала мишени;

$j_t(r_i)$ – плотность тока разряда на радиусе r_1 .

Общая толщина нанесенного слоя за время прохода зоны нанесения на расстоянии x_2 от оси магнетрона высчитывается путем интегрирования скорости осаждения по времени:

$$W(x_2) = \int_{-\frac{t_{dep}}{2}}^{\frac{t_{dep}}{2}} V(x_2) dt, \quad (1.4)$$

где t_{dep} – время нахождения зоны нанесения в области осаждения.

Еще одна модель [6] учитывает структуру поверхности покрытия, получаемого цилиндрическим плоским магнетроном, путем сочетания различных методик. Данная модель требует большого количества входных данных в виде параметров налетающего потока, параметров магнитного поля и снимков напылённых образцов покрытий.

Магнитное поле моделируется при помощи программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Разряд постоянного тока рассчитывается программным кодом ХООРІС [7]. Расчёт плазмы позволяет получить динамические свойства частиц для моделирования адгезии и когезии покрытия методами молекулярной

динамики. Последним шагом является использование статистической модели PVDPPro [6], позволяющей рассчитать структуру зерна и шероховатость пленок.

На выходе возможно получить данные о размере зерна и о зависимости изменения морфологии поверхности от времени напыления [6].

Хорошие результаты в моделировании процесса роста пленок показал метод Монте-Карло, использующийся в программном обеспечении NASCAM. С помощью неё без проблем были получены зависимости особенностей морфологии поверхности от угла нанесения серебряного покрытия [8]. Пакет программ NASCAM был выбран в качестве инструмента моделирования в рамках данной работы. Аналитические модели, которые заложены в основу NASCAM, описаны в разделе 3.

1.2 Сведения о программном коде NASCAM, предназначенном для анализа особенностей формирования тонкопленочных структур

Одним из доступных инструментов моделирования процесса формирования покрытий, в том числе полученных методом магнетронного распыления, является рабочая среда NASCAM. Данная среда моделирования была разработана в бельгийском Университете Намюр (Université de Namur) [9].

Пакет NASCAM позволяет моделировать процесс осаждения покрытий на подложку. Он имеет большой диапазон входных параметров и тем самым предоставляет возможность изучать формирование плёнок для разнообразных вариантов условий осаждения. В рабочие параметры входят: структура и материал подложки; энергетические спектры осаждаемых частиц, их угловое распределение, скорость осаждения покрытий. Основной модуль позволяет визуально оценить получаемую структуру посредством 3D-визуализации. Различные комбинации параметров приводят к различиям в структуре получаемого покрытия. Эти различия могут быть интерпретированы и проанализированы с помощью дополнительных модулей, встроенных в программу. Дополнительные модули могут быть полезны при анализе оптических свойств, цвета, электрических свойств, пористости и шероховатости покрытий [10].

Подробнее о физических принципах и входных характеристиках данной программы изложено в разделе 2 настоящей работы.

1.3 Особенности физических условий, имеющих место при формировании покрытий методами, использующими магнетронное распыление

Магнетронное распыление является одним из множества методов получения тонкопленочных покрытий. МРС представляет собой катод, состоящий из корпуса, мишени и магнитной системы, и анод. Вблизи мишени при помощи магнитной системы образуется замкнутое магнитное поле. При подаче напряжения образуется неоднородное электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Электроны, сталкиваясь с атомами рабочего газа, ионизируют их. Один электрон может ионизировать несколько атомов рабочего газа, пока не потеряет свою энергию, либо пока не попадёт на подложку. Для усложнения траектории электрона на пути к подложке и тем самым увеличению числа ионизированных молекул используется магнитное поле. Распыление мишени происходит за счёт бомбардировки её поверхности положительными ионами рабочего газа. Под действием электрического поля у поверхности мишени образуется скопление положительных ионов рабочего газа, что в результате приводит к увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и к значительному росту скорости распыления, а, следовательно, и скорости осаждения тонкопленочных покрытий [11-13].

Схема работы МРС представлена на рисунке 1.1.

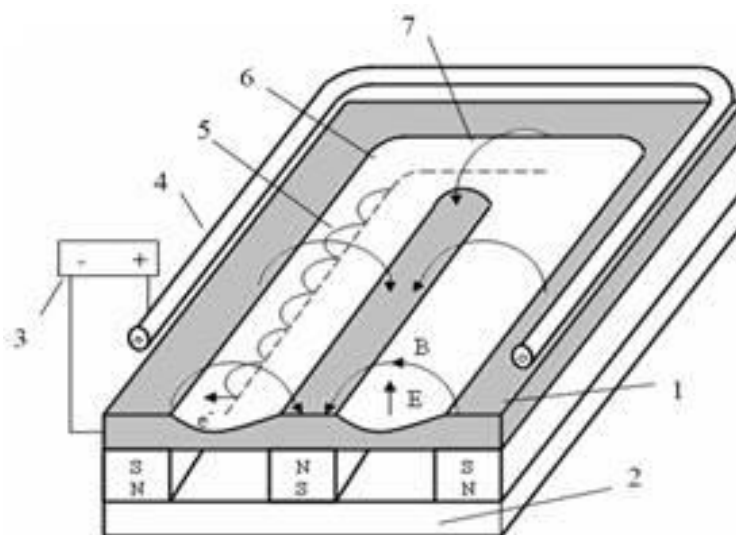


Рисунок 1.1 – MPC с плоским катодом. 1 — катод-мишень, 2 — магнитная система, 3 — источник питания, 4 — анод, 5 — траектория движения электронов, 6 — зона распыления, 7 — силовая линия магнитного поля [14]

Магнетронные распылительные системы могут иметь источник постоянного либо переменного тока. Напряжение разряда лежит в диапазоне 300–800 В. При использовании в качестве источника питания источник переменного тока частота питающего напряжения составляет 2 кГц - 30 МГц. Наиболее частое применение получили магнетронные распылительные системы постоянного тока. При частотах от 2 кГц до 100 кГц работают импульсные магнетроны.

Магнетроны работают при давлении рабочего газа 0,03–0,5 Па. При более высоком давлении эффективность магнетрона снижается. Это объясняется столкновением потока распыляемых частиц с атомами рабочего газа. При более низком давлении разряд гаснет вследствие недостаточного количества атомов для ионизации.

Скорости осаждения металлических покрытий в магнетронных распылительных системах обычно не превышают 5-10 нм/с. Скорость распыления в типичных MPC ограничена потоком ионов на катоде, и в связи с присутствием только распылительного механизма её трудно поднять выше этих значений. Как оказалось, интенсивность образования потока частиц на

поверхности мишени может быть увеличена кардинально путём добавления в систему испарительного механизма. Этого можно достичь двумя способами: используя МРС с жидкофазной, либо горячей твердотельной (при высокой скорости сублимации материала) мишенью. В первом случае будет происходить испарение материала мишени из жидкой фазы, во втором случае будет иметь место сублимация [15].

В конструкции жидкофазной магнетронной распылительной системы (ЖМРС), в отличие от других магнетронных распылительных систем, теплопроводный контакт мишени с охлаждаемым корпусом магнетрона сокращён. Энергия плазмы сохраняется в веществе мишени, в результате чего материал мишени разогревается до высоких температур и переходит из твёрдой фазы в жидкую. Как следствие, начинается интенсивное испарение распыляемого металла, что в совокупности с магнетронным распылением существенно увеличивает скорость осаждения. Экспериментальные данные показывают, что при этом наблюдается уменьшение энергозатрат на создание эрозионного потока [16], а скорость получения тонкой пленки возрастает на 1-2 порядка. Величина испаряемой компоненты зависит от температуры мишени, а также от материала мишени и тигля. [17]

В случае осаждения металлических покрытий методом ЖМРС обнаружена возможность реализации режима самораспыления. В режиме самораспыления разряд поддерживается парами осаждаемого металла, что позволяет проводить процесс осаждения в более чистой атмосфере. Этот режим удастся реализовать за счёт интенсивного испарения мишени.

Экспериментальные данные [18] показывают, что свойства покрытий, осаждённых при использовании испаряющейся мишени, имеют специфические отличия от покрытий, полученных при распылении охлаждаемой мишени: в случае осаждения меди наблюдается уменьшение шероховатости и увеличение электрической проводимости.

Математическое моделирование роста структуры, включающее адсорбцию, миграцию частиц на поверхности различные возможные

механизмы поверхностной диффузии, может помочь выявить, что именно из условий осаждения оказывает значительное влияние на формируемую структуру плёнок, которая обеспечивает эти функциональные изменения, наблюдаемые в экспериментах.

Схематичное изображение МРС с жидкой мишенью представлено на рисунке 1.2.

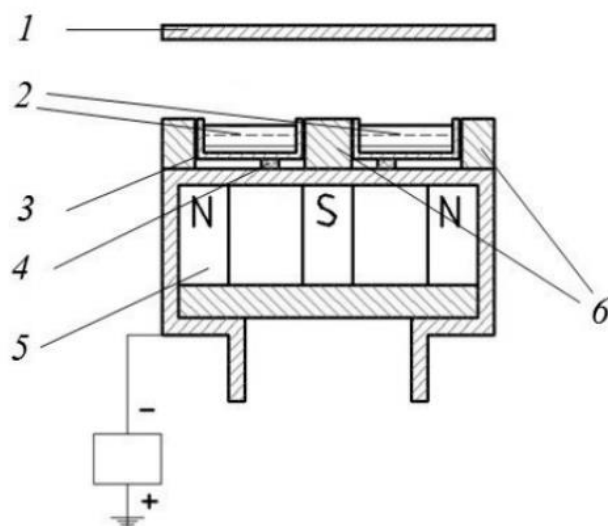


Рисунок 1.2 – Конструкция МРС с жидкофазной мишенью: 1 – подложка, 2 – кольцевая мишень, 3 – тигель, 4 – керамические изоляторы, 5 – магнитная система, 6 – полюсные наконечники [19]

1.4 Постановка задачи исследований с помощью программного кода NASCAM

В рамках работы была поставлена задача выявить особенности формирования алюминиевых покрытий методом магнетронного напыления при вариации следующих параметров: скорость осаждения, энергия осаждаемых атомов, рабочий газ, потенциал смещения на подложке.

Основные задачи:

- описать физическую модель формирования покрытий на основе высокоскоростного осаждения алюминия на медную подложку;
- задать плотности потоков и построить энергетическое распределение осаждаемых атомов, определить все входные параметры для расчётной модели;
- с помощью NASCAM «вырастить» плёнки в разных режимах магнетронного осаждения;
- получить данные о показателях шероховатости и пористости плёнок в разных режимах осаждения покрытий;
- выявить влияние факторов рабочего газа и отрицательного потенциала смещения на показатели шероховатости и пористости.

Работа была разделена на два этапа. На первом этапе исследуется влияние скорости осаждения (плотности потока осаждаемых частиц) и энергетического спектра. На втором этапе рассмотрены факторы рабочего газа и потенциала смещения, подаваемого на подложку для ассистирования осаждения ионной бомбардировкой (этот приём часто применяют для уплотнения структуры растущей плёнки).

Для выполнения вышеназванных задач стало необходимо определить входные параметры, требуемые для процесса моделирования в NASCAM. Основные параметры магнетронной распылительной системы и режимов осаждения были взяты из экспериментальных данных, полученных в НОЦ Б.П.

Вейнберга. Энергетический спектр осаждаемых частиц был рассчитан с помощью формализма, подробно описанного в разделе 3.

Глава 2. Описание программного кода NASCAM как инструмента для изучения особенностей формирования структуры металлических покрытий

2.1 Физические сущности алгоритмов, заложенных в NASCAM

Алгоритмы расчета NASCAM базируются на статистических методах расчёта (кинетический метод Монте-Карло), то есть на анализе вероятностей.

Программа начинает свою работу с чтения входных файлов, в которых содержатся необходимые для моделирования данные и переменные: input.txt, substrate.xyz, pattern.txt [20]. Подробнее о содержании данных входных файлов описано в пункте 2.3.

Осаждение атомов на подложку происходит в равные промежутки времени в случайное место на поверхности подложки. Характерное время между двумя событиями осаждения атома на поверхность может быть рассчитано как:

$$\tau = \frac{1}{F \cdot \text{dim}X \cdot \text{dim}Y}, \quad (2.1)$$

где F – скорость осаждения, МС/с (МС – монослой, плотноупакованный слой атомов);

$\text{dim}X$, $\text{dim}Y$ – размеры подложки, выраженные в количестве межплоскостных расстояний (все переменные содержатся в input.txt).

Всего на подложку осаждается количество атомов N_{dMAX} , заданное пользователем во входном файле.

В данной модели программы между двумя событиями осаждения атомов могут происходить только процессы диффузии или испарения. После осаждения атома, он проверяется на возможности передвижения и учитывается вероятность этого передвижения. Всего программа учитывает 9 возможных термически обусловленных типов передвижений [20], которые перечислены ниже.

- 1) Диффузия из дефекта (*Detrapment event*).

Если в слое ниже диффундирующего атома вблизи имеется дефект, случится передвижение атома в сторону от этого дефекта (возможно перемещение на слой ниже). Энергия активации в данном случае задается как ***Ea_detrapp***.

Диффундирующий атом после процесса диффузии может остаться в том же слое (иметь ту же координату *Z*, что и прежде) (***in-layer diffusion***). В таком случае возможны 4 возможных события, которые перечислены ниже.

- 2) Свободная диффузия. Энергия активации ***Ea_diff***.
- 3) Движение в позицию с тем же либо большим числом соседних атомов. Энергия активации ***Ea_nn_inc***.
- 4) Движение в позицию с меньшим числом соседних атомов. Энергия активации ***Ea_nn_dec***.
- 5) Движение от границы острова в позицию, где нет соседних атомов. Энергия активации ***Ea_detach***.

Диффундирующий атом после процесса диффузии может перейти в другой слой (***layer-to-layer diffusion***). Рассматривается два случая:

- 6) прыжок вверх; энергия активации ***Ea_up***;
- 7) прыжок вниз; энергия активации ***Ea_down***.

Возможно испарение атома. Также рассматривается два случая:

- 8) испарение с атома подложки; энергия активации ***Ea_sub_evap***;
- 9) испарение с атома покрытия; энергия активации ***Ea_lay_evap***.

В определённый момент времени может быть активировано *N* механизмов перемещения атома. Каждый тип перемещения может иметь направление. *v_i* – количество возможных направлений для выбранного механизма передвижения *i*.

Частота типа передвижения *w_i* может быть рассчитана по закону Аррениуса [20]:

$$w_i = w_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right), \quad (2.1)$$

где $w_0 = \frac{2k_B T}{h}$ – частота попытки передвижения атома, s^{-1} ;

k_B – постоянная Больцмана;

h – постоянная Планка.

Временной интервал между двумя событиями перемещения атома Δt :

$$\Delta t = \left(\sum_{i=1}^N v_i w_i \right)^{-1} . \quad (2.2)$$

Подложка может иметь два типа структуры: гексагональную либо кубическую. Эта структура не меняется со временем, поэтому NASCAM не пригоден для расчета фазовых превращений.

В налетающем потоке может быть два типа частиц, которые обозначены как *Metal* и *Gas*. Оба вида потока могут иметь свое энергетическое и угловое распределение. Частицы основного потока (*Metal*) всегда осаждаются на поверхность уже сформированной структуры, частицы второго потока (*Gas*) могут осаждаться только при удовлетворении ряда условий. Оба вида частиц могут передавать свою энергию покрытию и подложке, даже если они не остаются связанными с системой.

При взаимодействии второго потока с подложкой используются следующие допущения [20]:

- атомы могут остаться на поверхности, только оказавшись в газовой ловушке (атом имеет максимально возможное число соседей);
- движение атомов невозможно;
- атомы могут испариться или расплыться с подложки, оказавшись вне газовой ловушки.

Алгоритм работы программного кода NASCAM представлен на рисунке 2.1.

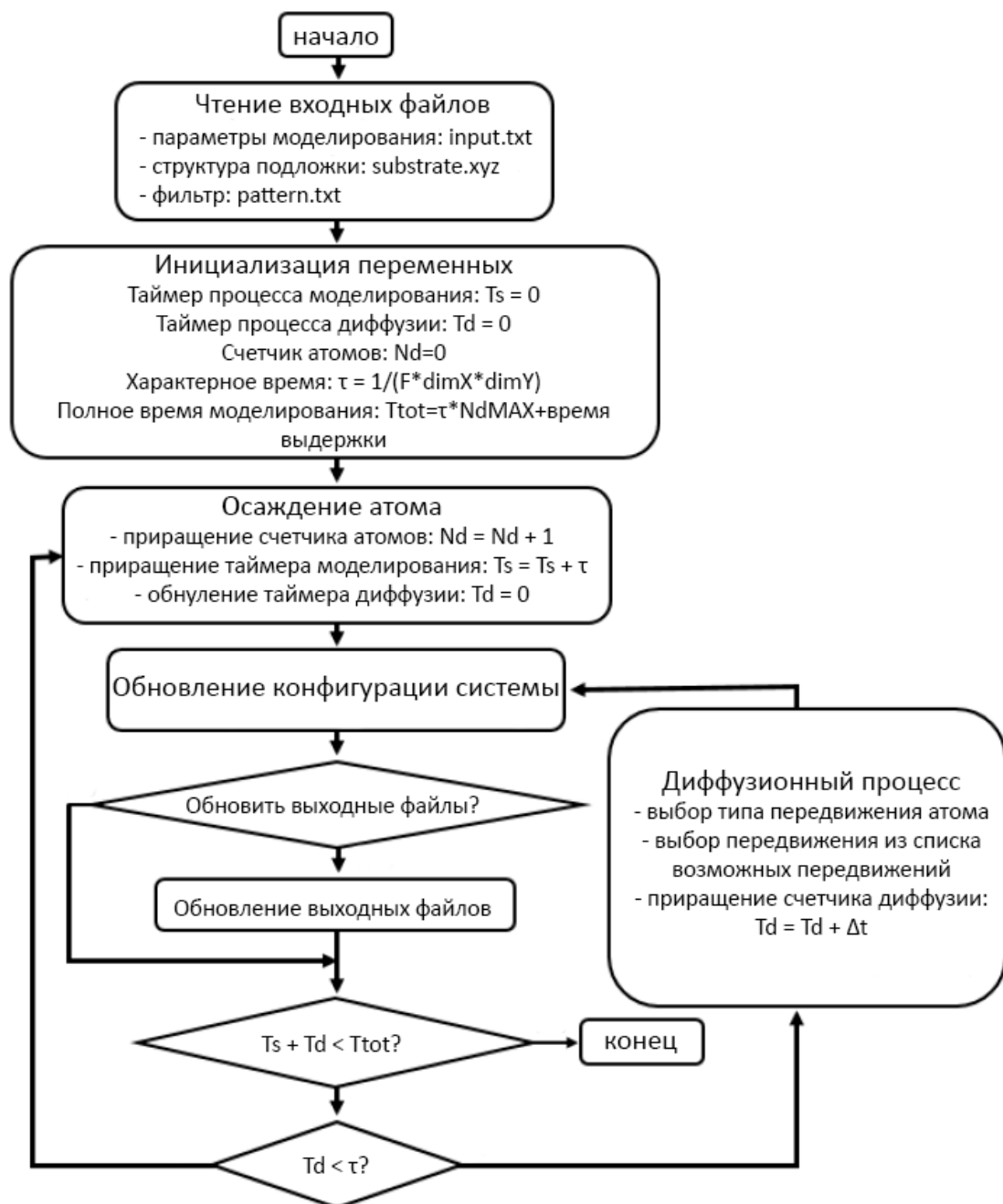


Рисунок 2.1 – Алгоритм программного кода NASCAM

2.2 Структура рабочего пространства, в котором производится настройка и запуск моделирования

Программное обеспечение NASCAM имеет окно пользовательского интерфейса для настройки и запуска процесса моделирования [21]. Другой подход работы с NASCAM подразумевает непосредственную работу с текстовыми файлами, содержащими входные и выходные данные. На рисунке 2.2 изображено основное окно интерфейса программы.

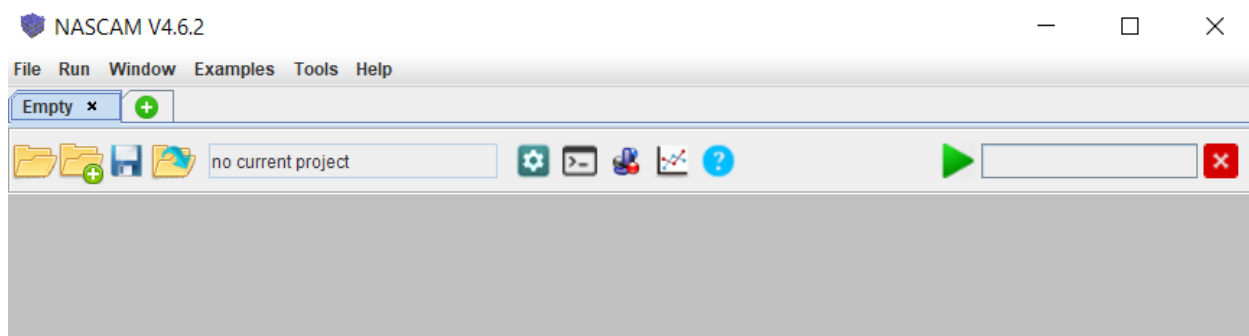













Рисунок 2.2 – Главное окно интерфейса NASCAM

В главном меню размещены меню выбора и сохранения рабочих файлов, ссылки на документацию, параметры симуляции, дополнительные модули, а также параметры пользовательского интерфейса. По умолчанию открыта пустая вкладка проекта, которая на рисунке 2.2 имеет название “Empty”. Имеется возможность открыть новые вкладки, работая с несколькими проектами одновременно. В таблице 2.1 представлено описание интерфейса панели управления.

Таблица 2.1 – Описание интерфейса панели управления проектом [21]

	Открыть существующий проект
	Создать новый проект
	Сохранить проект
	Открыть директорию проекта в проводнике
	Открыть окно ввода параметров
	Открыть окно контроля процесса моделирования
	Открыть окно просмотра структуры подложки
	Открыть окно графического представления данных
	Открыть окно помощи
	Запустить/Остановить процесс моделирования
	Закрыть проект

Для начала работы следует создать проект NASCAM или открыть уже существующий. В стандартной версии программы во вкладке “Examples” в главном меню содержатся существующие проекты, демонстрирующие возможности программы. Описание этих проектов подробно описано в соответствующей документации [22]. Создание нового проекта осуществляется либо на панели управления проектом, либо вызовом выпадающего меню “File” и выбора “New Project”. Файл проекта имеет расширение “nascam”.

После создания проекта есть возможность приступить к вводу параметров моделирования, которые затем будут сохранены в считывающийся программным кодом файл input.txt. Для этого необходимо вызвать окно ввода параметров на панели управления проектом. На рисунке 2.3 изображено окно ввода данных в NASCAM.

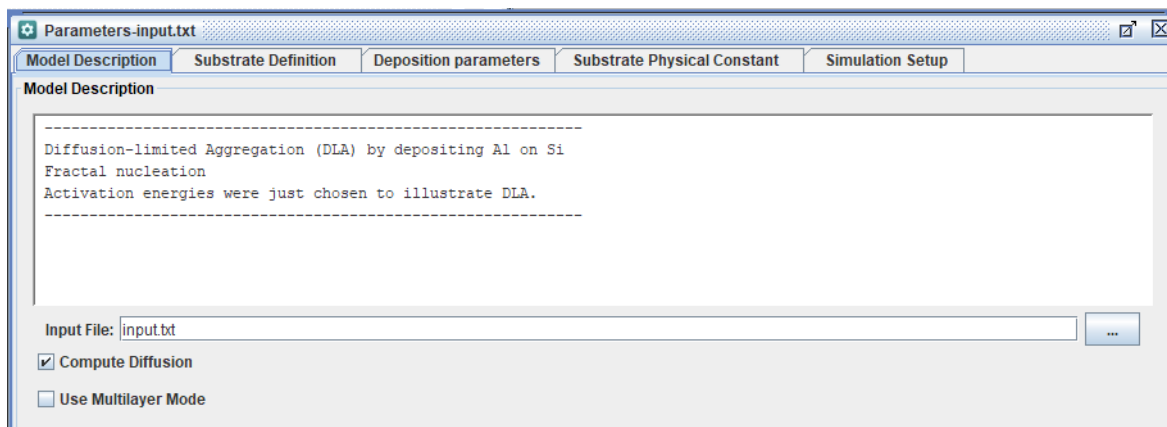


Рисунок 2.3 – Окно ввода параметров моделирования

Входные параметры в окне ввода параметров разбиты по разделам. Полное описание входных параметров, возможных для редактирования, описано в пункте 2.3.

Окно контроля процесса моделирования позволяет отслеживать ход процесса моделирования в реальном времени. Возможные ошибки, которые могут возникнуть при работе программы, также выводятся в данном окне.

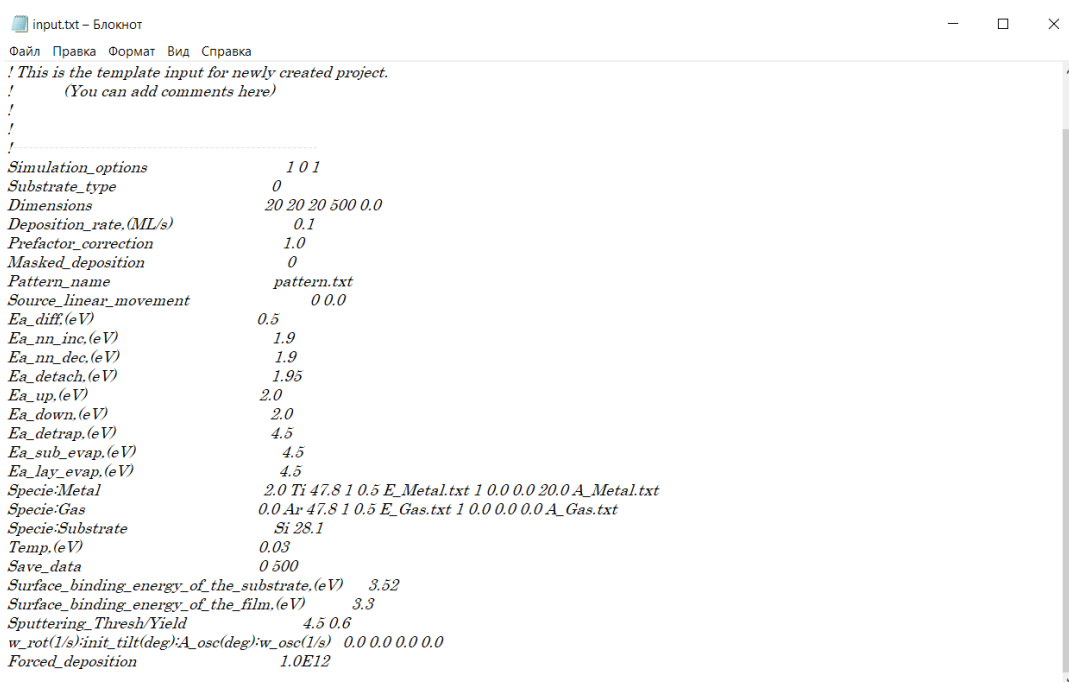
Окно просмотра структуры подложки позволяет взаимодействовать с 3D-изображением подложки и получаемого покрытия.

С помощью окна графического представления данных возможно визуализировать некоторые выходные данные [21].

2.3 Содержание файлов с входными и выходными данными

2.3.1 Входные данные

Как и было сказано ранее, все параметры сохраняются и считываются из файла с названием input.txt. Для корректного считывания входных параметров, они должны быть записаны в определённом порядке. Чтение файла осуществляется с конца строки, поэтому начало каждой строки может быть изменено по желанию пользователя [20]. Если в строке присутствует несколько параметров, они должны быть разделены пробелом. На рисунке 2.4 изображён пример текстового файла input.txt.



```
input.txt - Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
! This is the template input for newly created project.
! (You can add comments here)
!
!
!
-----
Simulation_options      1 0 1
Substrate_type         0
Dimensions             20 20 20 500 0.0
Deposition_rate.(ML/s) 0.1
Prefactor_correction   1.0
Masked_deposition      0
Pattern_name           pattern.txt
Source_linear_movement 0 0.0
Ea_diff.(eV)           0.5
Ea_nn_inc.(eV)         1.9
Ea_nn_dec.(eV)         1.9
Ea_detach.(eV)         1.95
Ea_up.(eV)             2.0
Ea_down.(eV)           2.0
Ea_detrp.(eV)          4.5
Ea_sub_evap.(eV)       4.5
Ea_lay_evap.(eV)       4.5
Specie: Metal          2.0 Ti 47.8 1 0.5 E_Metal.txt 1 0.0 0.0 20.0 A_Metal.txt
Specie: Gas             0.0 Ar 47.8 1 0.5 E_Gas.txt 1 0.0 0.0 0.0 A_Gas.txt
Specie: Substrate      Si 28.1
Temp.(eV)              0.03
Save_data              0 500
Surface_binding_energy_of_the_substrate.(eV) 3.52
Surface_binding_energy_of_the_film.(eV)      3.3
Sputtering_Thresh/Yield 4.5 0.6
w_rot(1/s):init_tilt(deg):A_osc(deg):w_osc(1/s) 0.0 0.0 0.0 0.0
Forced_deposition      1.0E12
```

Рисунок 2.4 – Пример файла input.txt

Далее будут описаны основные параметры из списка на рисунке 2.4.

Simulation_options – имеет три параметра $[n_1, n_2, n_3]$. Первый параметр n_1 связан с частотой вывода информации об осаждённых атомах в окно вывода и в выходной текстовый файл, а также на расчет статистических данных. Значение n_1 значит, что информация о процессе моделирования будет

выводиться или рассчитываться каждые n_1 осаждённых атомов. Вторым параметром n_2 может принимать два значения 1 или 0, определяя, будут или нет учитываться процессы диффузии/испарения во время осаждения покрытия. Последний параметр n_3 также принимает два значения 1 или 0, который включает или выключает расчёт количества и размеров островов осаждённых атомов.

Substrate_type – возможно два значения параметра. 1 для гексагональной структуры решетки подложки, на которую осаждается покрытие, 0 – для кубической.

Dimensions – [X, Y, Z, N, T]. X, Y, Z отвечают за размеры области моделирования, измеряются в количестве атомов. При гексагональной структуре подложки Y должно иметь четное значение. Z может автоматически регулироваться в процессе моделирования, если осаждаемое покрытие выходит за его пределы. Следующий параметр, N, отвечает за количество моделируемых осаждаемых атомов. T – время выдержки, выраженное в секундах. Время выдержки позволяет оценить поведение полученной структуры покрытия в результате диффузионных процессов сразу после осаждения.

Deposition_rate – скорость осаждения покрытий F [MC/c]. Поскольку диффузионные процессы считаются в промежутке между осаждениями двух отдельных атомов, слишком большая скорость препятствует расчёту диффузии из-за сокращения времени между осаждением двух атомов. Также при высоких скоростях осаждения происходит быстрое покрытие адсорбированных атомов, что препятствует их движению вдоль поверхности.

Prefactor_correction – параметр, связанный с частотой рассчитываемых процессов. Для единичных осаждаемых атомов частота без учёта температуры и энергетических констант соизмерима с частотой колебания кристаллической решетки подложки ($w_0 = 10^{13} \text{ c}^{-1}$). Для кластеров атомов данное значение может быть иным. Для его корректировки w_0 умножается на данный параметр.

Masked deposition – принимает значение 0 или 1. При 1 используется определённый шаблон процесса осаждения, определяемый в параметре *pattern_name*.

Pattern_name – название файла с шаблоном процесса осаждения, который находится в директории проекта NASCAM.

Source_linear_movement – имеет два параметра. Первый параметр включает или отключает движение подложки в процессе осаждения. Второй параметр устанавливает скорость в размерности количества межплоскостных расстояний в секунду.

Параметры, связанные с константами энергий диффузионных процессов – постоянные диффузионных процессов, заложенных в расчёты программы. В NASCAM присутствуют стандартные библиотеки, а также шаблоны для нескольких комбинаций материалов подложка-покрытие. Эти параметры будут зависеть от кристаллической ориентации подложки, от материалов подложки и получаемого покрытия. Расчёт этих констант может производиться при помощи методов молекулярной динамики. Одной из таких моделей является модель сильной связи. Еще одним методом является расчёт через потенциал Леннарда-Джонса (потенциал 6-12) [20].

Specie: Metal, Specie:Gas – в процессе осаждения присутствует два потока. С помощью параметров, относящихся к этим переменным можно задать относительную долю двух этих фаз, материалы фаз, энергетическое и угловое распределение осаждаемых атомов для двух фаз.

Specie: Substrate – определяет материал подложки. Важно указать название химического элемента и атомную массу в а.е.м.

Temp – задает температуру подложки в [эВ].

Save_Data – включает/выключает сохранение промежуточных выходных записей в файл.

Surface_binding_energy_of_the_surface, Surface_binding_energy_of_the_film – параметры, связанные с энергиями связи

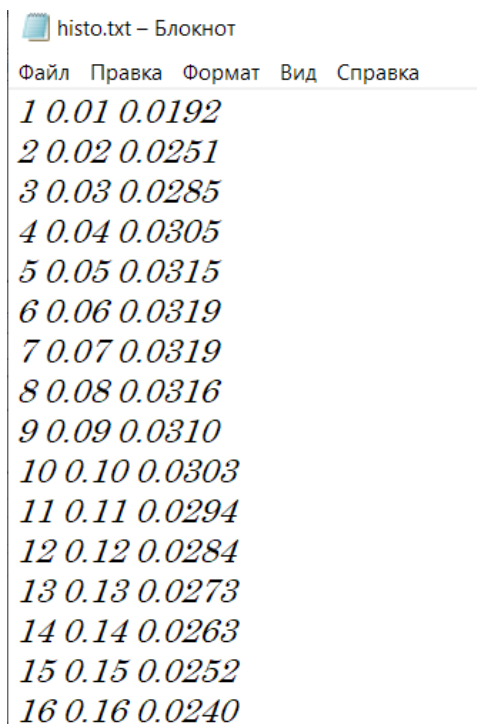
для подложки и покрытия. Эти данные задаются в электронвольтах и используются для расчёта дефектов в подложке и покрытии.

Параметры вращения, наклона и колебательных движений подложки – позволяют смоделировать ситуацию с нестатической подложкой.

Forced_Deposition – ограничивает количество операций расчёта между двумя осаждаемыми атомами, увеличивая скорость моделирования [20].

Входной файл **substrate.xyz** содержит данные о расположении и материале атомов подложки. Сгенерируется автоматически на основе данных `input.txt`, если его не существует. Предназначен для задания первоначальной структуры подложки. Состоит из некоторого числа строк, в каждой из которых через отступ записаны химический элемент и его координаты.

Два потока атомов, попадающих на поверхность (Metal и Gas), имеют энергетическое и угловое распределение. На рисунке 2.4, напротив `Specie: metal` и `Specie:Gas` одними из входных значений являются `E_Metal.txt`, `A_Metal.txt` и `E_Gas.txt`, `A_Gas.txt` соответственно для первого и второго потоков. В файлах с приставкой E описывается энергетическое распределение потока. Содержимое файла состоит из 3 столбцов: порядкового номера строки, энергии налетающего атома в электронвольтах, доли частиц с данной энергией в потоке. Пример файла изображен на рисунке 2.5.



```
histo.txt – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
1 0.01 0.0192
2 0.02 0.0251
3 0.03 0.0285
4 0.04 0.0305
5 0.05 0.0315
6 0.06 0.0319
7 0.07 0.0319
8 0.08 0.0316
9 0.09 0.0310
10 0.10 0.0303
11 0.11 0.0294
12 0.12 0.0284
13 0.13 0.0273
14 0.14 0.0263
15 0.15 0.0252
16 0.16 0.0240
```

Рисунок 2.5 – Пример файла энергетического распределения потока

Файлы с приставкой А содержат информацию об угловом распределении атомов в налетающем потоке. Угловое распределение описывается функцией $p = f(\theta, \phi)$, где θ меняется в пределах $[0, 90^\circ]$, в то время как ϕ имеет пределы $[-180^\circ, 180^\circ]$. Файл состоит из 4 столбцов, содержащих следующие значения: порядковый номер строки, углы θ и ϕ соответственно, вероятность в соответствии с функцией распределения p .

2.3.2 Список основных выходных файлов

coating.xyz и **deposited_layer.xyz** – содержат информацию о расположении и материале атомов после процесса осаждения, формируя данные о 3D-структуре покрытия. Отличие между ними заключается в отсутствии в файле **deposited_layer.xyz** информации о структуре подложки – он состоит только из структуры полученного покрытия.

film_growth.xyz – содержит всю информацию о 3D-структурах покрытия вместе с подложкой за всё время моделирования и может быть использован для визуализации процесса роста покрытия.

log_file.txt – содержит информацию о процессе моделирования: версию NASCAM, входные данные, длительность различных процессов во время моделирования.

stat_film_growth.csv – содержит информацию о росте покрытия во времени.

stat_film_structure.csv – содержит общую информацию о свойствах покрытия, такую как шероховатость поверхности, плотность покрытия, количество димеров, тримеров и атомарных островов.

final_composition.csv – содержит информацию о количестве атомов каждого вида на каждом значении Z.

stat_process.csv – содержит общую информацию о всех процессах, протекавших во время осаждения.

island_distribution.csv – содержит информацию об островах атомов.

2.4 Возможности NASCAM для моделирования формирования структурных особенностей покрытий, влияющих на их функциональные характеристики

2.4.1 Выбор параметров моделирования

Широкий набор входных параметров позволяет моделировать при помощи NASCAM различные процессы, связанные с взаимодействием атомарных структур.

Наиболее распространенным вариантом является моделирование осаждения покрытий из газовой фазы. Для осуществления этого процесса необходимо установить ненулевую скорость осаждения F в параметрах входного файла.

С помощью вариации скорости осаждения и энергетического распределения осаждаемых атомов можно инициировать моделирование различных режимов осаждения: магнетронного распыления, термического испарения, магнетронного распыления из жидкой фазы и др.

Различные вариации углового распределения позволяют оценить особенности формирования структур, встречающихся в реальных экспериментах. На рисунке 2.6 представлен пример сравнения моделирования процесса магнетронного распыления с реальным, полученным в результате технологического процесса, покрытием.

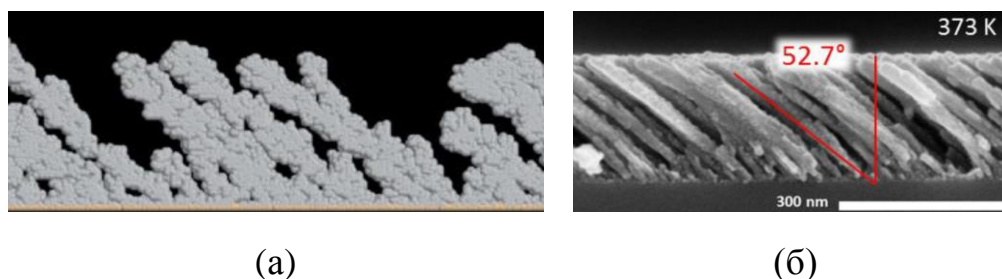


Рисунок 2.6 – Сравнение моделирования NASCAM (а) с реальным экспериментом (б) [23]

Также в NASCAM имеется возможность моделирования различного рода диффузионных процессов. При установлении ненулевого времени выдержки, можно наблюдать эволюцию атомарной системы во времени под действием диффузионных процессов. К таким процессам относится, например, Оствальдовское созревание [22].

2.4.2 Анализ выходных данных

Исследование получаемого в результате моделирования покрытия осуществляется при помощи анализа выходных файлов программы. Выходные файлы содержат информацию о структуре покрытия, его шероховатости и плотности, и эволюции этих величин во времени.

Шероховатость поверхности определяется следующим выражением:

$$R = \sqrt{\langle h^2 \rangle - \langle h \rangle^2}, \quad (2.3)$$

где $\langle h \rangle$, $\langle h^2 \rangle$ – средние значения толщины и квадрата толщины покрытия по всей поверхности подложки.

Для более тщательного анализа структуры и морфологии поверхности покрытия NASCAM предоставляет дополнительные модули, позволяющие обрабатывать выходные данные. Одними из таких дополнительных модулей являются модули “Roughness” и “Porosity”, позволяющие получить детальную информацию о шероховатости и пористости покрытия.

В модуле оценки шероховатости “Roughness” помимо выражения (2.3), позволяющего рассчитать общую шероховатость поверхности, имеются две функции корреляции $G(r)$ и $C(r)$:

$$G(r) = \langle (h(x+r, y) - h(x, y))^2 \rangle, \quad (2.4)$$

$$C(r) = \langle 2(h(x+r, y) \cdot h(x, y)) \rangle, \quad (2.5)$$

где r – радиус корреляции.

Функции корреляции удовлетворяют условию:

$$G(r) + C(r) = 2 \cdot R^2. \quad (2.6)$$

В то время как шероховатость R описывает различие толщины пленки в разных её частях, функции корреляции позволяют оценить характерный размер образовавшихся на поверхности пленки микроструктур. Функция корреляции $G(R)$ будет иметь максимум в точках, равных по величине характерным размерам микроструктур.

Помимо значений функций корреляции, модуль позволяет получить изображение тепловой карты поверхности. Пример такой тепловой карты изображен на рисунке 2.7.

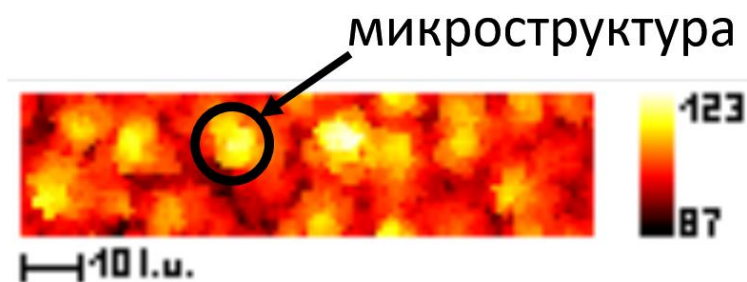


Рисунок 2.7 – Пример тепловой карты поверхности

Дополнительный модуль “Porosity” предназначен для оценки пористой структуры получаемого в результате моделирования покрытия.

Создается трехмерный массив, в который загружаются данные покрытия. Числовыми значениями внутри каждой ячейки массива отмечается наличие либо отсутствие атома. Если слоев покрытия несколько, определяются границы этих слоев для оценки пористости каждого слоя в отдельности.

Следующим шагом является нахождение пор. В ходе этого процесса выделяются все поры с диаметром больше того, что задал пользователь.

На заключающем этапе работы модуля происходит определение типа поры, которая может быть трёх видов:

- закрытые поры – находятся в пределах одного слоя;
- соединенные поры – находятся в пределах нескольких слоёв;
- открытые поры – соединены с поверхностью покрытия.

Также на этом этапе рассчитывается объем пор и процентное соотношение пор разных объемов.

Результатом работы модуля является вывод статистических данных о количестве пор разного объема в файлах формата “csv”, а также 3D-изображение пористой структуры, пример которой изображен на рисунке 2.8.

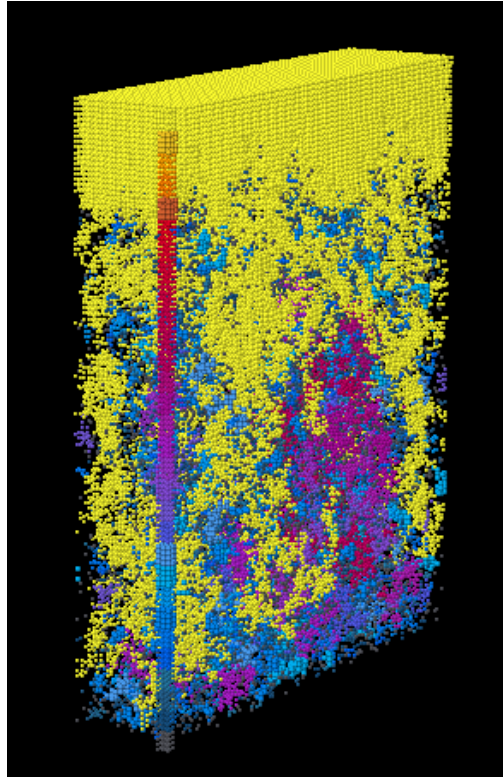


Рисунок 2.8 – Пример 3D-изображения пористой структуры покрытия

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности, конкурентоспособности и соответствия разработок, предлагаемых в рамках научного исследования, современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала разработок;
- планирование научно–исследовательской работы;
- расчет бюджета научно–исследовательской работы;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

4.1 Оценка коммерческого потенциала

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Результатом исследования является получение зависимостей морфологии и структуры тонкопленочных покрытий от параметров осаждения при помощи программного кода NASCAM. Потенциальными потребителями являются научно-исследовательские коллективы.

Анализ конкурентных технических решений позволяет внести коррективы в техническую реализацию научно–исследовательской работы. Также данный анализ помогает оценить эффективность исследования на примере сравнения с конкурентными методами.

Целесообразно проводить анализ конкурентных технических решений с помощью оценочной карты, приведённой в таблице 4.1. В этой таблице сравнивается техническая ресурсоэффективность определения зависимостей морфологии и структуры тонкопленочных покрытий от параметров осаждения при помощи программного кода NASCAM (ф) с другими конкурентными методами. В точности это:

к1 – определение зависимостей при помощи программного кода Abinit;

к2 – определение зависимостей при помощи программного кода PVDPPro.

Краткое описание конкурентных методов приведено в разделе 1.1 настоящей работы.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок) [27]

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Область возможностей моделирования	0,3	4	2	5	1,2	0,6	1,5
2. Количество входных параметров	0,25	4	4	2	1	1	0,5
3. Возможности анализа выходных данных	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45
4. Скорость расчетов	0,15	5	2	4	0,75	0,3	0,6
5. Точность расчетов	0,15	3	5	4	0,45	0,75	0,6
Итого	1	28	27	28	4,15	3,25	3,65

В результате анализа оценочной карты было выявлено, что рассматриваемый метод, в сравнении с аналогами, является самым ресурсоэффективным по совокупности факторов.

4.1.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой рассмотрение сильных и слабых сторон проекта, его возможностей и угроз [27]. Его применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Удобнее всего представлять данный вид анализа в виде таблицы. SWOT-анализ приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица-SWOT

<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>C1. Заявленная эффективность метода.</p> <p>C2. Высокая скорость расчетов.</p> <p>C3. Перспективная тема исследования (тема является актуальной).</p> <p>C4. Обширная сфера применения.</p> <p>C5. Большое количество выходных данных.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Сложность предсказания результатов исследования.</p> <p>Сл2. Необходимость сравнения с экспериментальными данными.</p> <p>Сл3. Малая нормативная база.</p>
<p>Возможности:</p> <p>B1. Моделирование при обширном наборе входных параметров.</p> <p>B2. Появление дополнительного спроса на исследования такого типа.</p> <p>B3. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<p>Угрозы:</p> <p>У1. Развитая конкуренция методов исследования.</p> <p>У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования.</p> <p>У3. Поломка персонального компьютера, необходимого для проведения исследований.</p>

Интерактивная матрица проекта предназначена для выявления соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта возможностям и угрозам (внешним факторам) [28]. Интерактивные матрицы проекта представлены в таблицах 4.3, 4.4.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица возможностей проекта

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

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные стороны и возможности проекта: B1 – C1C2C5; B2 – C2C3C4.

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица угроз проекта

		Сл1	Сл2	Сл3
Угрозы	У1	+	+	-
	У2	-	-	-
	У3	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабые стороны и угрозы проекта: У1 – Сл1Сл2.

Возможности в совокупности с сильными сторонами проекта могут обеспечить широкую востребованность используемого метода моделирования, повысить финансирование исследований такого типа, использовать метод для решения более широкого спектра задач. Угрозы в совокупности со слабыми сторонами указывают на возможность появления и развития аналогичных методов на рынке.

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

4.2 Планирование научно-исследовательской работы

Для успешного начала необходимо оценить масштабы предстоящей работы, распределить ее по времени и сотрудникам. Наличие плана позволит поддерживать приемлемую планку продуктивности и выполнить работу в относительно короткий срок.

Научно–исследовательские работы разбиваются на этапы в соответствии с [29].

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

В состав рабочей группы входят научный руководитель (НР) и студент (Ст). Для эффективной реализации проекта работу следует разбить на этапы и распределить их по сотрудникам в соответствии с их функциями. Длительность каждого этапа обуславливается его трудоемкостью.

Накопление теоретической базы проводится студентом под надзором научного руководителя. После происходит выбор оборудования, а именно персонального компьютера, на котором будет осуществляться работа. В дальнейшем требуется определить входные параметры модели, моделируемые ситуации. Обработка выходных данных осуществляется на том же персональном компьютере. Результаты анализа входных данных следует поместить в пояснительную записку.

Перечень этапов работы и их распределение по исполнителям приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Длительность, дни	Длительность (с учетом выходных), дни	Должность исполнителя
Накопление теоретической базы	1	Изучение материалов по выбранной теме	6	7	Ст, НР
Техническая часть	2	Выбор оборудования (персонального компьютера)	12	14	НР
Исследовательская часть	3	Определение входных параметров	3	7	Ст, НР
	4	Определение моделируемых режимов	3		НР
	5	Построение энергетических спектров	18	21	Ст
	6	Получение и обработка данных	24	28	Ст, НР
Обобщение и оценка результатов	7	Анализ полученных результатов	6	7	Ст, НР
	8	Составление пояснительной записки	12	14	Ст, НР
	9	Подготовка к защите	6	7	Ст
Итого: 105 дней (с учетом выходных дней)					

4.2.2 График проведения научного исследования

Равномерное распределение количества работы по времени осуществляется исходя из трудоемкости процесса, зависимости процесса от внешних факторов.

Процесс получения теоретического введения по теме ускорен за счет присутствия на данном этапе научного руководителя. Научный руководитель способен структурировать поток информации для студента, ответить на появляющиеся вопросы. Большое количество времени, отводимого на техническую часть работы, обусловлено высоким влиянием внешних факторов на успешность данного этапа. В исследовательской части наибольшее количество времени отводится на задание некоторых входных параметров, таких как энергетический спектр и на получение и обработку выходных данных исследования.

Диаграмма Ганта, иллюстрирующая план-график проведения работ, приведена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Календарный план-график проведения работ

Номер работ	Т _к , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
		февраль			март			апрель			май		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	7	■ □											
2	14		□										
3	3			■ □									
4	4			□									
5	21				■								
6	28					■ □							
7	7									■ □			
8	14										■ □		
9	7											■	

■ - Студент

□ - Научный руководитель

4.3 Бюджет научно-технического исследования

Планирование бюджета научно-технического исследования (НТИ) включает в себя полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его реализацией. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям [30]:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.3.1 Материальные затраты НТИ

Научно-исследовательская работа проводится за персональным компьютером и не требует материальных ресурсов. Затраты по этому разделу равны нулю.

4.3.2 Расчёт заработной платы

Данный подраздел оценивает суммарную заработную плату научного руководителя и студента, с учётом входящих в фонд заработной платы различных премий. Основная заработная плата рассчитывается, опираясь на трудоёмкость выполнения каждого этапа и на величину месячного оклада исполнителя.

Среднедневная тарифная заработная плата ($ZП_{дн-м}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{26,083}, \quad (4.1)$$

где 26,083 – среднее количество рабочих дней в месяце при шестидневной рабочей неделе.

Учёт всевозможных премий и районной надбавки осуществляется путём использования ряда коэффициентов: $K_{\text{пр}} = 1,1$; $K_{\text{доп.зп}} = 1,188$; $K_{\text{р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{и}} = K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{доп.зп}} \cdot K_{\text{р}}, \quad (4.2)$$

$$K_{\text{и}} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699. \quad (4.3)$$

Вышеуказанное значение $K_{\text{доп.зп}}$ применяется при шестидневной рабочей неделе.

Общий расчет затрат на заработную плату всех сотрудников представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	$K_{\text{и}}$	Фон з/п, руб.
Научный руководитель	40000	1533,6	77	1,699	200630,2
Студент	15000	575,1	87	1,699	85007,3
Итого:					285637,5

4.3.3 Расчёт затрат на страховые взносы

Затраты на страховые взносы, включающие в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование согласно 425, 426 НК РФ установлен размер страховых взносов равный $\approx 32\%$. На основании ст.427 для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, водится пониженная ставка – $30,2\%$

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,302, \quad (4.4)$$

$$C_{\text{соц}} = 285637,2 \cdot 0,302 = 86262,5 \text{ руб.} \quad (4.5)$$

Данные взносы идут в Фонд государственного социального страхования (ФСС), Пенсионный фонд (ПФ) и Фонд медицинского страхования (ФФОМС). Данные отчисления необходимы для соблюдения прав граждан в соответствующих аспектах Конституции РФ.

4.3.4 Амортизационные отчисления

Данная статья подразумевает расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта. В исследовании использовался персональный компьютер стоимостью 30 000 тыс. руб. Ускоренная единовременная амортизация данной единицы оборудования равна его стоимости.

4.3.5 Расчёт накладных расходов

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Накладные расходы составляют 20 % от суммы основной и дополнительной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении научного исследования.

$$Z_{\text{накл}} = (\text{Заработная плата исполнителей}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (4.6)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

$$Z_{\text{накл}} = 285637,5 \cdot 0,2 = 57127,5. \quad (4.7)$$

4.3.6 Формирование бюджета затрат НИИ

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведено в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Бюджет затрат НИИ

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы	Z_M	0
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	285637,5
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	85262,5
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	30000
Накладные расходы	$Z_{\text{накл}}$	57127,5
Итого:		458027,5

Согласно расчетам, итоговые затраты составили 458027,5 руб.

4.4 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности [31, 32].

4.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^P = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (4.8)$$

где I_{Φ}^P – интегральный финансовый показатель разработки;

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

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

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

Для сравнения было выбрано два аналогичных проекта по моделированию структуры и морфологии покрытий при помощи программного кода Abinit суммой около 480000 руб. и при помощи программного кода

PVDPro суммой около 500000 руб. Бюджет данного проекта больше ввиду того, что требуется больше времени на определение входных данных модели. В случае данной работы используется программный код NASCAM.

$$I_{\Phi}^p = \frac{458027,5}{500000} = 0,92, \quad (4.9)$$

$$I_{\Phi}^a = \frac{480000}{500000} = 0,96, \quad (4.10)$$

$$I_{\Phi}^{\beta} = \frac{500000}{500000} = 1. \quad (4.11)$$

4.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

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

$$I_m^P = \sum_{i=1}^n a_i b_i^P, \quad (4.12)$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

a_i – весовой коэффициент i -го параметра;

b_i^P – бальная оценка i -го параметра разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности

Критерии	ПО			
	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог α	Аналог β
1. Область возможностей моделирования	0,3	4	2	5
2. Количество входных параметров	0,25	4	4	2
3. Возможности анализа выходных данных	0,15	5	4	3
4. Скорость расчетов	0,15	5	2	4
5. Точность расчетов	0,15	3	5	4
ИТОГО	1	21	17	18

Соответствующий расчёт:

$$I_m^p = 4 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 = 4,15, \quad (4.13)$$

$$I_m^a = 2 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 = 3,25, \quad (4.14)$$

$$I_m^\beta = 5 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 3,65. \quad (4.15)$$

4.4.3 Интегральный показатель эффективности разработки и аналога

Интегральный показатель эффективности разработки ($I_{\text{финр}}^p$) и аналогов ($I_{\text{финр}}^a, I_{\text{финр}}^b$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формулам:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{4,15}{0,92} = 4,51, \quad (4.16)$$

$$I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a} = \frac{3,25}{0,96} = 3,39, \quad (4.17)$$

$$I_{\text{финр}}^b = \frac{I_m^b}{I_\phi^b} = \frac{3,65}{1} = 3,65. \quad (4.18)$$

4.4.4 Сравнительная эффективность разработки

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и самого эффективного аналога позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a} = \frac{4,51}{3,65} = 1,24. \quad (4.19)$$

Вывод по главе 4

Бюджет исследования складывается из множества факторов. Среди них материальные затраты, затраты на заработную плату, страховые взносы, затраты на электроэнергию, амортизационные отчисления и накладные расходы. Общий бюджет проекта составил 458027,5 рублей.

Оценка сравнительной эффективности рассчитывается из интегральных показателей эффективности проекта и аналога. По результатам анализа метод используемый в работе оказался эффективнее аналогов.

Глава 5. Социальная ответственность

Задачей данного раздела является рассмотрение вопросов, связанных с обеспечением нормативных условий труда, а именно: санитарно-гигиенических условий, пожарной безопасности, а также защиты от опасных производственных факторов. Важным условием является согласование данных действий с нормативными документами, действующими на территории Российской Федерации.

Данная работа посвящена моделированию процесса осаждения покрытий методом магнетронного распыления. Процесс моделирования осуществляется с помощью программного обеспечения, установленного на персональный компьютер. Поэтому, в качестве рабочего пространства используется помещение, оборудованное электронно-вычислительной машиной. Требования и рекомендации, способствующие минимизации вредных и опасных факторов, связанных с работой в таких помещениях, также описаны в данном разделе.

Одной из особенностей работы с электронно-вычислительными машинами (ЭВМ) является минимальное негативное воздействие на окружающую среду. Персональные компьютеры работают на электрической энергии и не выделяют вредных веществ в процессе работы.

Работа проводилась в аудитории 222 11 корпуса ТПУ, которая имеет линейные размеры 4,65×6,3 м и высоту 3 м.

5.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Для идентификации потенциальных факторов был использован [33]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для рабочей зоны и соответствующие им нормативные документы представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
Вредные	Опасные	
Отклонение показателей микроклимата	-	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [33].
Повышенный уровень шума	-	СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [33]

Продолжение таблицы 5.1

Физические перегрузки	-	ГОСТ 12.2.032–78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [35]
Нервно-психические перегрузки	-	ГОСТ Р 50948-01. “Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности” [36]
Электромагнитное излучение	-	ГОСТ Р 50948-01. “Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности” [36]
Недостаточная освещенность рабочего места	-	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [37]
-	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность [38]

Продолжение таблицы 5.1

-	Возгорание	СП 12.13130.2009. Свод правил. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок во взрывопожарной и пожарной опасности [39] СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования [40]
---	------------	---

На инженера, работа которого связана с моделированием на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха, статическое электричество, электромагнитное излучение, освещенность, шум;
- психофизиологические: физические статические перегрузки и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

5.1.1 Микроклимат

Микроклиматом производственных помещений называют метеорологические условия внутри помещений. Эти условия определяются факторами, действующими на организм человека: температура воздуха, относительная влажность, скорость движения воздуха и тепловое излучение.

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение

8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах [34].

При наступлении переохлаждения снижается температура тела, происходит сужение кровеносных сосудов, возникают сбои в работе сердечно-сосудистой системы человека.

Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [34]

Период года		Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Оптимальные параметры	22-24	40-60	0,1
	Допустимые параметры	20-22 / 24-25	15-40 / 60-75	0,1
Тёплый	Оптимальные параметры	23-25	40	0,1
	Допустимые параметры	21,23 / 25-28	15-40 / 40-75	0,1

Допустимые микроклиматические отклонения не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции

и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м^3 на человека – не менее 30 м^3 в час на человека; при объёме помещения более 40 м^3 на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция [41].

Расчет вентиляции в аудитории

Согласно [41] кратность воздухообмена аудитории, учебных кабинетов, лабораторий равна 2 с^{-1} в 1 час, при условии минимального расхода наружного воздуха на 1 человека не менее $20 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Расчетная формула имеет вид:

$$L = k \cdot V, \quad (5.1)$$

где L – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

k – кратность воздухообмена, ч^{-1} ;

V – объем помещения, м^3 .

Объем аудитории рассчитывается:

$$V = 6,3 \cdot 4,65 \cdot 3 = 87,9 \text{ м}^3. \quad (5.2)$$

Таким образом, расход воздуха будет равен:

$$L = 2 \cdot 87,9 = 175,8 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (5.3)$$

Такой воздухообмен может обеспечиваться вентилятором Эра Storm YWF2E 200 ВВ, обладающим производительностью $890 \text{ м}^3/\text{ч}$ [42].

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

Параметры микроклимата в используемой аудитории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность^о – 40%, скорость движения воздуха – $0,1 \text{ м/с}$, температура летом^о – $20-25 \text{ }^\circ\text{C}$, зимой – $13-15 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.1.2 Повышенный уровень шума

Повышенный уровень шума ухудшает условия труда, оказывает вредное воздействие на организм человека, в частности, на органы слуха. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, утверждённых [34].

В таблице 5.3 представлены предельно допустимые уровни звукового давления для лаборатории с шумным оборудованием.

Таблица 5.3 – Предельно допустимые уровни звукового давления для аудитории образовательной организации [34]

Рабочее место	Частота, Гц									Уровень звука, дБА
	Уровень звукового давления, дБ									
Аудитория образовательной организации	31	65	125	250	500	1000	2000	4000	8000	40
	79	63	52	45	39	35	32	30	28	

Предельно допустимым уровнем звука от непостоянных источников шума является 55 дБА [34]. Оборудование, установленное на рабочем месте, а именно персональный компьютер, производит шум в значениях 35-50 дБА.

5.1.3 Физические и нервно-психологические перегрузки

При работе с персональным компьютером, оператор находится в сидячем положении в течение длительного времени, испытывая статическую

физическую нагрузку на спину и шейный отдел позвоночника. Кроме того, работая за персональным компьютером, человек постоянно получает информационные сигналы от компьютера, что приводит к нервно-психологическим перегрузкам.

Длительные нервно-психологические перегрузки приводят к снижению работоспособности, угнетению центральной нервной системы, психическим расстройствам.

Для избежания перегрузок, следует делать перерывы в работе. Также рекомендуется соблюдать нормы планировки рабочего места [35].

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 5.1.

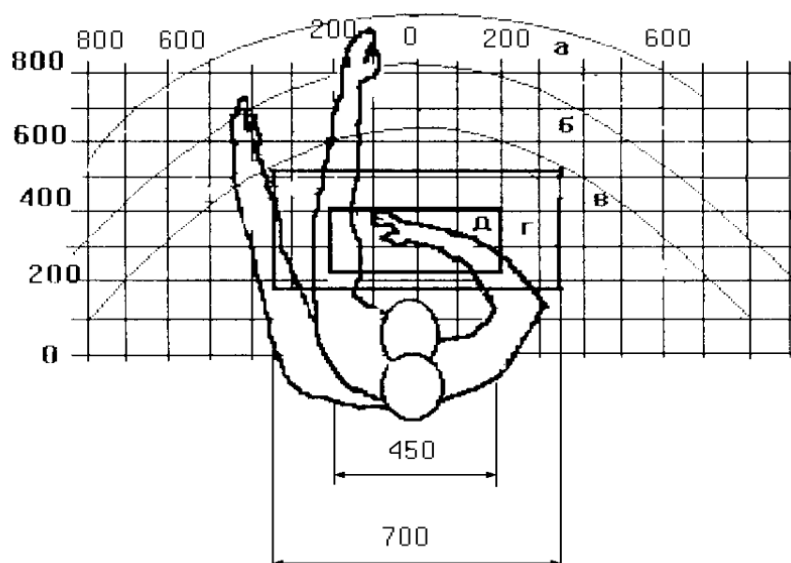


Рисунок 5.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а – зона максимальной досягаемости рук;

б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в – зона легкой досягаемости ладони;

г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зонах г, д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- документация, необходимая при работе размещается в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева);
- литература, не используемая постоянно – в выдвижных ящиках стола [35].

При проектировании письменного стола должен быть учтен ряд требований.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм [35].

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

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 ° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 °. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [35].

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 °. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели [35].

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека [36].

На рабочем месте, аудитории 222 11 корпуса ТПУ, данные требования соблюдены.

5.1.4 Электромагнитное излучение

При работе с компьютером источником электромагнитного излучения является дисплей. Электромагнитные волны приводят к неблагоприятным изменениям в организме, сопровождающиеся [43]:

- угнетением центральной нервной системы (замедление реакции, ухудшение памяти, депрессии разной тяжести, повышенная возбудимость, раздражительность, нарушения сна, бессонница, резкие перепады настроения, головокружения, слабость)

- изменениями в сердечно-сосудистой системе (снижение ЧСС, изменения на ЭКГ, артериального давления),
- нарушение морфологического состава крови (уменьшение количества лейкоцитов, ретикулоцитов, ацидофильных гранулоцитов), что сопровождается нарушениями функционального состояния эндокринной системы, обменных процессов, дистрофическими процессами в тканях мозга, печени, селезенки, яичках.

Плотность магнитного потока должна быть не более [36]:

- 250 нТл - в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц;
- 25 нТл - в диапазоне частот от 2 до 400 кГц.

5.1.5 Освещенность

Данный вредный фактор возникает при неправильном комбинировании света в рабочем помещении. Недостаточная освещенность рабочей зоны оказывает негативное воздействие на зрительную систему человека.

Предусмотрены следующие нормы освещения при работе с ПК [37]. Работа в компьютерных залах относится к классу зрительных работ А-2 – “очень высокой точности”. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть более 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 200 лк.

Соблюдение данных требования способствует установлению светового баланса в рабочем помещении и минимизирует его воздействие на зрительный аппарат.

Расчет освещенности

Для расчёта были выбраны светильники ЭРА SPO910340K070. Этот светильник обладает мощностью 70 Вт, длина светильника равна 595 мм, ширина – 595 мм, световой поток $\Phi_{\text{лд}}$ равен 7350 Лм [44].

Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_3 = 1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z = 1,1$.

Расчетная высота светильника над рабочей поверхностью h :

$$h = H - h_c = 3 - 0,8 = 2,2 \text{ м}, \quad (5.4)$$

где H – высота расположения ламп над уровнем пола, м;

h_c – высота рабочей поверхности, м.

Индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{29,3}{2,2 \cdot (4,65 + 6,3)} \approx 1,25, \quad (5.5)$$

где S – площадь аудитории, м^2 ;

A, B – линейные размеры аудитории, м.

Коэффициенты отражения света от стен и потолка принимаются равными 70 и 50 % соответственно. В связи с этим, коэффициент использования светового потока η равен 0,51.

Необходимое число светильников N рассчитывается по следующей формуле:

$$N = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3}{\eta \cdot \Phi_{\text{лд}}} = \frac{500 \cdot 29,3 \cdot 1,5}{0,51 \cdot 7350} = 5,86 \approx 6 \text{ шт.} \quad (5.6)$$

Потребный световой поток группы светодиодных светильников определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{500 \cdot 29,3 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{6 \cdot 0,51} = 7900 \text{ Лм.} \quad (5.7)$$

Проверка удовлетворения условиям:

$$-10 \% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100 \% \leq 20 \%, \quad (5.8)$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100 \% = \frac{7350 - 7900}{7350} \cdot 100 \% = -7,48 \%. \quad (5.9)$$

Освещение в аудитории 222 11 корпуса ТПУ соответствует установленным нормам [34].

5.1.6 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электрическими установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования [38].

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока.

Рабочее помещение, аудитория 222 11 корпуса ТПУ, относится к классу 1 “Помещения без повышенной опасности” [38] ввиду нормального микроклимата и малого количества токопроводящих поверхностей.

В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их изоляции.

5.1.7 Пожаровзрывобезопасность

Согласно [39], помещение, оборудованное ЭВМ, относится к категории пожароопасности В4, т.е. к помещениям, в которых находятся (обрабатываются) горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие

вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть. Помещения категории В4 надлежит оборудовать системами автоматической противопожарной защиты, в соответствии с требованиями [40].

Причинами, которые могут вызывать пожар, являются [39]:

- Неисправность электропроводки и приборов;
- короткое замыкание электрических цепей;
- перегрев аппаратуры;
- молния.

Для предотвращения возникновения возгорания следует придерживаться мер безопасности:

- в течение проведения работ содержать в порядке и чистоте рабочее место;
- не закрывать вентиляционные отверстия ПЭВМ;
- не допускать попадания влаги на поверхности устройств;
- не переключать разъемы сетевых (220 В) кабелей;
- не производить вскрытие ПЭВМ.

Меры по ликвидации возгорания описаны в разделе 5.2.

5.2 Анализ вероятных чрезвычайных ситуаций (ЧС)

В таблице 5.4 представлен перечень возможных чрезвычайных ситуаций, меры их предотвращения и меры по ликвидации последствий ЧС.

Таблица 5.4 – Чрезвычайные ситуации, меры их предотвращения и меры по ликвидации последствий ЧС

Чрезвычайная ситуация	Меры предотвращения ЧС	Меры по ликвидации последствий ЧС
Возгорание	<ol style="list-style-type: none">1. Использование только исправного оборудования2. Проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности3. Отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала	<ol style="list-style-type: none">1. Прекратить работу2. Отключить электрооборудование3. Позвонить в подразделение пожарной охраны по телефону 01 или 1124. Сообщить о случившемся руководителю подразделения5. Приступить к тушению огня первичными средствами пожаротушения

Продолжение таблицы 5.4

<p>Поражение электрическим током</p>	<p>1. Использование только исправного оборудования</p> <p>2. Недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения</p> <p>3. Проведение периодических инструктажей по электробезопасности</p>	<p>1. Освободить пострадавшего от воздействия электрического тока</p> <p>2. Проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь</p> <p>3. Позвонить в службу экстренного реагирования по телефону 112</p> <p>4. При необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение</p> <p>5. О произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя подразделения</p>
--------------------------------------	---	--

Продолжение таблицы 5.4

<p>Травмирование в результате падения с высоты собственного роста</p>	<p>1. Обеспечение порядка на рабочем месте 2. Использование предупреждающих знаков при проведении уборки 3. Проведение периодических инструктажей по технике безопасности</p>	<p>1. Проверить состояние пострадавшего и вызвать при необходимости скорую помощь 2. Позвонить в службу экстренного реагирования по телефону 112 3. При необходимости, организовать доставку пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение 4. О произошедшем несчастном случае поставить в известность руководителя подразделения</p>
---	---	---

Вывод по главе 5

В разделе рассмотрены следующие вредные и опасные факторы:

- микроклимат [34];
- шум [34];
- физические и нервно-психологические перегрузки [35, 36];
- влияние электромагнитных волн [36];
- освещенность [37];
- электробезопасность [38];
- пожаровзрывобезопасность [39, 40].

Аудитория 222 11 корпуса ТПУ отнесена:

- по электробезопасности к классу 1 “помещения без повышенной опасности” [38];
- по пожаровзрывоопасности к категории В4 [39].

Также в разделе описан перечень возможных чрезвычайных ситуаций, меры их предотвращения и меры по ликвидации последствий ЧС. Возможные чрезвычайные ситуации:

- возгорание;
- поражение электрическим током;
- травмирование в результате падения с высоты собственного роста.

Заключение

Использование программного комплекса NASCAM, реализующего модель механизмов роста тонких плёнок из простых материалов, позволило выявить ряд особенностей формирования структуры и морфологии металлических покрытий при магнетронном распылении испаряющихся мишеней на примере осаждения алюминия.

Исследованы закономерности формирования шероховатости и пористости осаждаемых плёнок. Показано, что особенности коллективного движения осаждаемых частиц на поверхности растущей плёнки, обусловленные высокой плотностью потока и широким энергетическим распределением, приводят к следующим тенденциям в формировании структурных свойств:

- 1) уменьшению шероховатости поверхности по сравнению с обычным магнетронным распылением охлаждаемых мишеней (этот эффект был ранее зафиксирован экспериментально),

- 2) увеличению количества внутренних пор большого размера,

- 3) уменьшению концентрации открытых пор по сравнению с низкоскоростным осаждением (распыление охлаждаемых мишеней или термическое испарение),

Продемонстрировано, что подача отрицательного смещения на подложку в режиме самораспыления, возможном при магнетронном распылении испаряющихся мишеней, способствует минимизации количества открытых пор и тем самым приводит к формированию более плотной структуры. Осаждение в присутствии рабочего газа приводит к более высокой шероховатости и увеличению открытых пор.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Haile J. M. et al. Molecular dynamics simulation: elementary methods //Computers in Physics. – 1993. – Т. 7. – №. 6. – С. 625-625.
2. Malyukov S. P., Sayenko A. V., Zinovev S. S. Mathematical Modelling of Magnetron Sputtering Process During Thin Films Formation //2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, 2020. – С. 368-373.
3. Gonze X. et al. Recent developments in the ABINIT software package //Computer Physics Communications. – 2016. – Т. 205. – С. 106-131.
4. Колесников С. В. и др. Кинетический метод Монте-Карло: математические основы и приложения к физике низкоразмерных наноструктур //Математическое моделирование. – 2018. – Т. 30. – №. 2. – С. 48-80.
5. Мельников С. Н., Голосов Д. А., Кундас С. П. Моделирование процессов магнетронного нанесения пленочных покрытий на стационарные и перемещаемые подложки. – 2011.
6. Johnson M., Cote P. Modeling magnetron sputter deposition //Materials and manufacturing processes. – 2006. – Т. 21. – №. 6. – С. 628-633.
7. Verboncoeur J. P., Langdon A. B., Gladd N. T. An object-oriented electromagnetic PIC code //Computer Physics Communications. – 1995. – Т. 87. – №. 1-2. – С. 199-211.
8. Hui D. et al. Modeling and Experimental Investigations of Nanostructured Ag Thin Films Produced by Oblique-Angle Deposition and Its SERS Performance //Coatings. – 2021. – Т. 11. – №. 4. – С. 458.
9. NASCAM (NANoSCALE Modeling) - Université de Namur [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.unamur.be/sciences/physique/ur/larn/logiciels/nascam> (Дата обращения: 07.06.2022)
10. S.Lucas, F.Nita, P.Moskovkin NASCAM Plugins Manual. - University of Namur - 2018. - 62с
11. Введение в плазменные технологии и водородную энергетику: учебное пособие / А.В. Юрьева, А.Н. Ковальчук; Томский политехнический

- университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. –90с
12. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. – 1982.
 13. Window B. Issues in magnetron sputtering of hard coatings //Surface and Coatings Technology. – 1996. – Т. 81. – №. 1. – С. 92-98.
 14. Комарова Д.А., Бадараев А.Д., Баженов А.Ю., Егорова М.С. Экономические преимущества инновационных методов магнетронного распыления // Молодой ученый. — 2015. — №10. — С. 228-231. — URL <https://moluch.ru/archive/90/18657/> (дата обращения: 07.06.2022).
 15. Sidelev D. V. et al. High-rate magnetron sputtering with hot target //Surface and Coatings Technology. – 2016. – Т. 308. – С. 168-173.
 16. Bleykher G. A. et al. Energy and substance transfer in magnetron sputtering systems with liquid-phase target //Vacuum. – 2016. – Т. 124. – С. 11-17.
 17. Николаев М. В. Магнетронная распылительная система с жидкофазным катодом / М. В. Николаев, Д. А. Зайцев; науч. рук. А. В. Юрьева // Ресурсоэффективным технологиям - энергию и энтузиазм молодых: сборник научных трудов VI Всероссийской конференции, г. Томск, 22-24 апреля 2015 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — [С. 193-200].
 18. Bleykher G. A. et al. The properties of Cu films deposited by high rate magnetron sputtering from a liquid target //Vacuum. – 2019. – Т. 169. – С. 108914.
 19. Д.С. Рогожников, А.В. Юрьева, А.С. Шабунин Осаждение металлических покрытий с помощью магнетрона с жидкофазной мишенью // XIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, - Томск, 2016.
 20. S.Lucas, F.Nita, P.Moskovkin NASCAM User's Manual for version 4.6.2. - University of Namur - 2018. - 62с
 21. S.Lucas, F.Nita, P.Moskovkin NASCAM GUI User's Manual - University of Namur - 2018. - 41с
 22. S.Lucas, F.Nita, P.Moskovkin NASCAM The description of the examples - University of Namur - 2018. - 52с

23. Dervaux J. et al. Synthesis of nanostructured Ti thin films by combining glancing angle deposition and magnetron sputtering: A joint experimental and modeling study //Thin Solid Films. – 2017. – Т. 636. – С. 644-657.
24. Г.А. Блейхер, А.В. Юрьева, Д.В. Сиделёв, Ю.Н. Юрьев, В.А. Грудинин. Исследование фундаментальных аспектов режима самораспыления при работе магнетронных распылительных систем с испаряющимися мишенями и его влияние на свойства осаждаемых покрытий // Итоговый отчёт по НИР, рег. № НИОКР АААА-А18-118011090005-2. Томск, ТПУ - 2019. – 39 с.
25. Блейхер Г. А., Кривобоков В. П. Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц. – 2014.
26. Ekpe S. D., Dew S. K. Theoretical and experimental determination of the energy flux during magnetron sputter deposition onto an unbiased substrate //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2003. – Т. 21. – №. 2. – С. 476-483.
27. Котлер Ф., Бергер Р., Бикхофф Н. Стратегический менеджмент по Котлеру: Лучшие приемы и методы. – Альпина Паблишер, 2017.
28. Мередит, Дж.. Управление проектами : учебник для вузов : пер. с англ. / Дж. Мередит, С. Мантел. — 8-е изд.. — Санкт-Петербург: Питер, 2014. — 640 с.
29. ГОСТ Р 15.101-2021 Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ
30. Зуб, Анатолий Тимофеевич. Управление проектами : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. Т. Зуб; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ). — Москва: Юрайт, 2014. — 423 с.
31. Романова, Мария Вячеславовна. Управление проектами : учебное пособие / М. В. Романова. — Москва: Форум Инфра-М, 2014. — 256 с.
32. Управление проектами : учебник для бакалавров / А. И. Балашов [и др.]; Высшая школа экономики (ВШЭ), Национальный исследовательский университет (НИУ) ; под ред. Е. М. Роговой. — Москва: Юрайт, 2014. — 383 с.

33. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
34. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
35. ГОСТ 12.2.032–78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
36. ГОСТ Р 50948-01. “Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности”.
37. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*.
38. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
39. СП 12.13130.2009. Свод правил. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок во взрывопожарной и пожарной опасности.
40. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.
41. СП 118.13330.2012*. Свод правил. Общественные здания и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 31-06- 2009.
42. Эра Storm YWF2E 200 ВВ Осевой вентилятор низкого давления
[Электронный ресурс] – Режим доступа:
https://jiner.ru/catalog/sistemy_ventilyatsii/osevye_promyshlennye_ventilyatory/nakladnye_osevye_ventilyatory/era_storm_ywf2e_200_bb_osevoy_ventilyator_nizkogo_davleniya/ (Дата обращения: 07.06.2022)
43. Одинаев Ф. И. и др. Электромагнитные излучения и здоровье человека //Вестник российских университетов. Математика. – 2015. – Т. 20. – №. 6. – С. 1714-1717.

44. Светодиодная панель ЭРА SPO910340K070 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.vseinstrumenti.ru/electrika-i-svet/svetilniki/paneli/era/spo910340k070-70vt-4000k-7350lm-ip40-595x595x40-matovyj-b0051551/> (Дата обращения: 07.06.2022)

45. ГОСТ 22.0.01-94. Безопасность в ЧС. Основные положения.