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

Институт – Физико-технический
Направление подготовки - Физика
Кафедра – Общая физика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ЖИДКОФАЗНОЙ МИШЕНЬЮ

УДК _533.9.07_

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б21	Кушебина А.К.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭФ ФТИ	Юрьева А.В.			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Сечина А.А.	к.х.н		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОФ	Лидер А.М.	к.ф.-м.н.		

Томск – 2016 г.

Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник способен)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Общекультурные компетенции		
Р1	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности	Требования ФГОС3+ (*ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4*)
Р2	К самоорганизации и самообразованию, работать в коллективе, к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.	Требования ФГОС3+ (*ОК-5,ОК-6,ОК-7, ОК-8, ОК-9*)
Общепрофессиональные компетенции		
Р3	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.	Требования ФГОС3+ (*ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-7)*
Р4	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.	Требования ФГОС3+ (ОПК-4,ОПК-5, ОПК-6)
Р5	Получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.	Требования ФГОС3+ (ОПК-8, ОПК-9)
Профессиональные компетенции		
Р6	Научно-исследовательская деятельность Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, физики плазмы с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.	Требования ФГОС3+ (*ПК-1, ПК-2)*
Р7	Научно-инновационная деятельность Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения в результате освоения профильных дисциплин для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.	Требования ФГОС3+ (*ПК-3*,ПК-4, ПК-5)
Р8	Организационно-управленческая Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике методы управления в сфере природопользования	Требования ФГОС3+ (ПК-6, ПК-7, ПК-8)
Р9	Педагогически-просветительская Проектировать, организовывать, анализировать педагогическую деятельность, владеть последовательностью изложения материала с использованием междисциплинарных связей физики с другими дисциплинами, участвовать в информационно-образовательных мероприятиях по пропаганде и распространению научных знаний	Требования ФГОС3+ (ПК-9)

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

Институт – Физико-технический
Направление подготовки - Физика
Кафедра – Общая физика

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ _____ _Лидер А.М._
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	**ФИО**
0Б21	Кушебина Айгерим Казбековна

Тема работы:

Исследование алюминиевых покрытий, полученных с помощью магнетронной распылительной системы с жидкофазной мишенью	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе *(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).*	Магнетронная распылительная система (МРС) с жидкофазной мишенью. Тигли из молибдена и графита. Мишень из алюминия. Режим работы при 3-4 кВт. Остаточное давление в рабочей камере – 10^{-2} Па.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов *(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).*	Изучить физические методы получения покрытий из газовой фазы. Рассмотреть существующие конструкции МРС с жидкофазной мишенью и определить необходимые требования к конструкционным элементам МРС. Получить алюминиевые покрытия с помощью МРС с жидкофазной мишенью. Выявить зависимость скорости осаждения от мощности и материала тигля. Исследовать свойства полученных тонкопленочных алюминиевых покрытий.
Перечень графического материала *(с точным указанием обязательных чертежей)*	

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Сечина А.А. к.х.н, доцент
Социальная ответственность	Федорчук Ю.М. д.т.н, профессор

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

Введение

Приборы и методика измерений

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭФ ФТИ	Юрьева А.В.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б21	Кушебина А.А.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 116 страниц, 26 рисунков, 25 таблиц, 43 источника, 1 приложение.

Ключевые слова: магнетронная распылительная система с жидкой мишенью, материал тиглей, алюминиевые покрытия, адгезия, шероховатость.

Объектом исследования являются покрытия алюминия, полученные с помощью МРС с жидкой мишенью при использовании разных тиглей.

Цель работы – оценка влияния режимов работы и материалов тиглей МРС с жидкофазной мишенью на свойства тонкопленочных алюминиевых покрытий.

В процессе исследования проводилось: осаждение алюминиевых пленок с помощью МРС с жидкой мишенью при использовании разных тиглей; измерение температур мишени и тиглей; определение влияния режима на скорость осаждения; определение зависимости скорости осаждение от мощности разряда; измерение адгезионной прочности и шероховатости; проведение рентгеноструктурного анализа; измерение коэффициента отражения, полученных алюминиевых пленок.

В результате исследования выяснилось, что с увеличением мощности происходит увеличение скорости осаждения покрытий независимо от материала тигля и от наличия или отсутствия аргона в рабочей камере; адгезионная прочность и шероховатость практически не зависят от режима работы МРС с жидкофазной мишенью. Выявлена зависимость коэффициента отражения алюминиевых покрытий от материала тигля. Наилучший результат получен при использовании в качестве материала тигля вещества с наименьшей степенью черноты (Mo).

Область применения: алюминиевые покрытий применяются в оптических приборах вследствие того, что они не тускнеют и имеют высокий коэффициент отражения.

Оглавление

Введение 8

1. Классификация методов нанесения покрытий 10

1.1. Метод термического испарения 12

1.2. Нанесение покрытий с использованием процесса распыления 17

2. Магнетронные распылительные системы 19

2.1. Магнетронные распылительные системы с твердой мишенью 19

2.2. Магнетронная распылительная система с жидкофазной мишенью 24

2.2.1. Требования к материалам МРС с жидкой мишенью 30

3. Экспериментальная установка 35

3.1. Схема экспериментальной установки 35

3.2. Приборы и методика измерений 38

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, ресурсосбережение 49

5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения 50

5.1.1. SWOT-анализ 50

5.2. Планирование научно-исследовательских работ 54

5.2.1. Структура работ в рамках научного исследования 54

5.2.2. Разработка графика проведения научного исследования 55

5.2.3. Бюджет научно-технического исследования 59

5.2.3.1. Расчет материальных затрат 60

5.2.3.2. Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы 60

5.2.3.3. Отчисления на социальные нужды 63

5.2.3.4. Накладные расходы 63
5.2.3.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта 64
5.3. Определение сравнительной эффективности исследования 64

Введение

Тонкопленочные покрытия нашли широкое применение в различных областях науки и техники. Значение таких покрытий в современном мире велико. Всем известно, что требования, которые предъявляются к промышленному изделию, в основном предъявляются к поверхностному слою материала, из которого оно изготовлено. Использовать дорогие и редкие (дефицитные) материалы будет неэкономично. Поэтому изделия получают требуемые свойства за счет специальных покрытий, они и обеспечивают нужный набор свойств [1].

Пленки алюминия широко используются в качестве отражающего слоя с высокой проводимостью. Зеркала с алюминиевыми покрытиями на лицевой поверхности широко используются в оптических приборах за счет высокого коэффициента отражения [2]. На данный момент в сферах применения таких пленок требуется непрерывное повышение качества, прочности и долговечности покрытий.

Одним из самых распространённых способов напыления плёнок – магнетронные распылительные системы (МРС). Одними из главных достоинств являются отсутствие капельной фазы (в отличие от термического испарения с использованием вакуумно-дугового нагрева или дугового распыления), ионное ассистирование поверхности и относительная простота конструкции.

Однако для МРС характерны и недостатки: низкая скорость напыления (по сравнению с дуговыми распылителями и термическим испарением в вакууме), высокая степень примесей в осаждённых плёнках и низкая энергетическая эффективность, за счет отвода мощности разряда системами охлаждения.

Следовательно, сегодня актуальными задачами в области методов магнетронного распыления являются увеличение скорости осаждения и

равномерности нанесения, улучшения адгезионных свойств и снижения количества вредных примесей в покрытиях [1].

Вышеуказанных недостатков лишены магнетроны с жидкофазной мишенью за счет того, что в качестве катода металл в тигле, который теплоизолируется от системы охлаждения и нагревается до температуры плавления под воздействием ионов плазмы.

Преимущество МРС с жидкофазной мишенью от других систем состоит в большей скорости напыления плёнок, и уменьшении удельных затрат энергии на удаление атома мишени.

Целью работы является оценка влияния режимов работы и материалов тиглей МРС с жидкофазной мишенью на свойства тонкопленочных алюминиевых покрытий.

Задачи:

- ознакомиться с существующими конструкциями МРС с жидкофазной мишенью;
- получить алюминиевые покрытия с помощью МРС с жидкофазной мишенью;
- выявить зависимость скорости осаждения от мощности и материала тигля;
- исследовать свойства полученных тонкопленочных алюминиевых покрытий.

1. Классификация методов нанесения покрытий.

Существует классификация покрытий по методам получения, которая происходит исходя из физической сущности процессов. Такие процессы лежат в их основе, и определяют физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий:

1) по состоянию вещества для получения покрытий (твердое, жидкое, атомарное или ионизованное);

2) по способу получения вещества для нанесения покрытий (CVD, PVD и комбинированные);

3) по составу транспортной, защитной или реакционной атмосферы (вакуум, инертный газ, плазма, реактивный газ);

4) по способу активации процесса формирования покрытий (термический, плазменный, ионная бомбардировка, электронная или фотонная стимуляция); 5) по характеру процессов, протекающих в зоне формирования покрытий (физическая конденсация, химические или плазмохимические реакции, диффузионное насыщение и т.п.) [3].

Такое большое количество классификационных признаков для способов получения покрытий объясняется существованием различных методов, а также достаточным для внимания отличием свойств покрытий, получаемых разными методами [4].

Процесс, где устойчивые твердые продукты реакции зарождаются и нарастают на подложке в среде с протекающими в ней химическими реакциями называется химическим газофазным осаждением (CVD). Чаще всего это диссоциация, восстановление и др. В таком процессе используются различные источники энергии, например, плазма, ультрафиолетовое излучение и т.д. [3].

Существует процесс, который описывает три основных способа нанесения покрытий: испарение, распыление и ионное осаждение. Такой процесс называется физическим газофазным осаждением (PVD). При таком

процессе материал покрытия из твердого состояния переходит в газовую фазу в результате испарения. Это происходит под воздействием тепловой энергии или же за счет кинетической энергии столкновения частиц материала в результате распыления. Все процессы происходят в вакууме или в атмосфере рабочего газа при достаточно низком давлении (около 1 Па). Это делается для того, чтобы частица, преодолевала путь от источника (мишени) к изделию, при этом столкновения с атомами или молекулами газа сводились к минимальному количеству. А также этим условием объясняется прямой поток частиц, в результате которого покрытие наносится только на ту часть изделия, которая ориентирована к источнику частиц. Важную роль также играет относительное расположение источника и материала. Именно от расположения зависит скорость осаждения (скорость нанесения покрытия). Систематизировать движение материала или применять несколько источников, расположенных определенным образом необходимо для того, чтобы получить равномерное покрытие. Наносится будет покрытие только в определенных участках поверхности, «в прямой видимости источника», оставив другие участки без покрытия. Такое при использовании метода химического газофазного осаждения получить невозможно [3].

Существует несколько стадий при котором проходит процесс осаждения покрытий:

1. Материал из твердой фазы переходит в паровую.

2. От источника к подложке происходят перенос паров.

3. Происходит зарождение роста пленки из-за конденсации паров на подложке [3].

Большим плюсов метода PVD в отличие от метода химического газофазного осаждения покрытий является то, что возможен контроль каждой из этих стадий нанесения покрытий независимо от остальных.

Так как данная работа выполнялась с помощью магнетронной распылительной системы с жидкофазной мишенью, в которой сочетаются

методы термического испарения и магнетронного распыления, то рассмотрим эти два метода более подробно.

1.1. Метод термического испарения.

Один из самых изученных методов, существующих на сегодняшний день, является получение пленок термическим испарением вещества в вакууме с последующей конденсацией его на подложке. Но этот метод также является одним из самых универсальных методов получения пленок различных веществ.

Испарение вещества происходит путем нагревания. Кинетическая энергия атомов и молекул вещества возрастает до уровня необходимого для отрыва от поверхности и распространения в окружающем пространстве. Увеличение энергии и возрастание количества молекул, отрывающихся от поверхности, происходит с повышением температуры [5].

Нагреваясь, твердые вещества обычно расплавляются, после этого переходят в газообразное состояние. Существует такой процесс, как сублимация. При таком процессе некоторые вещества, минуя жидкую фазу, могут переходить газообразное состояние [6].

Характер испарения вещества и состав газовой фазы можно в первом приближении оценить, сравнивая величины теплоты сублимации и энергии связи (теплоты образования) данного соединения. Так, если теплота сублимации больше теплоты образования, то при испарении будет наблюдаться диссоциация или разложение соединения. В этом случае необходимо сравнить упругости паров компонентов при данной температуре.

Обычно при испарении в вакууме вещество разогревается до такой температуры, при которой давление пара над его поверхностью достигает 10^{-1}- 10^{-2} Па. Эту температуру часто называют «температурой испарения».

Скорость испарения, т.е. количество вещества, испаряемого в 1 секунду с единицы площади поверхности испарителя, определяется по уравнению Ленгмюра:

$$\omega = \alpha_s P_s \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \quad (1)$$

где P_s – упругость паров вещества при температуре T;

M – молекулярный вес испаряемого вещества, моль;

T – температура испарения, К;

α_s – коэффициент испарения или коэффициент Ленгмюра, определяемый как отношение реальной скорости испарения к гипотетической, равновесной, которая рассчитывается по уравнению (1).

Чем выше скорость испарения, тем загрязненность пленки будет меньше, однако высокие скорости роста негативно сказываются на структуре тонкопленочных слоев [7].

Создавая такие условия, при которых движения частиц преимущественно будет осуществляться по направлению к подложке, возможно получить необходимые скорости роста пленки, а также возможна экономия расходования материала, которое нередко является дорогостоящим. При этом, как говорилось выше, необходим достаточно глубокий вакуум. Вакуум необходим для исключения столкновения молекул остаточного газа с молекулами вещества и рассеивания их потока на пути к подложке.

Энергия испаренных атомов определяется температурой испарителя и составляет 0,1-0,3 эВ, а ионизация частиц практически отсутствует [4].

Вакуумное термическое испарение может осуществляться как непосредственно в вакуумной камере («открытое» испарение), так и в некотором ограниченном объеме, помещенном в этой камере («квазизамкнутый» объем).

Самый простой метод в техническом отношении является «открытое» испарение. Оснастка вакуумной камеры для проведения процесса, в таком случае, состоит из испарителя, заслонки и держателя подложки с

нагревателем. Обычно используют испарители прямого нагрева, разогреваемые до высокой температуры прямым пропусканием тока. Их выполняют из графита или тугоплавкого металла, имеющего к тому же малую упругость пара, например, W, Mo, Ta, Nb или их сплавы.

На рисунке 1 изображена схема термического испарения.

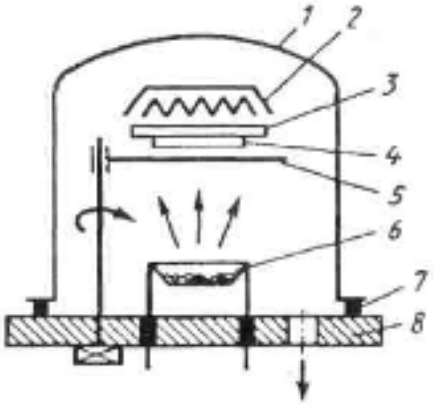

Рисунок 1 – Схема термического испарения в вакууме: 1 – колпак; 2 – нагреватель; 3 – подложкодержатель; 4 – подложка; 5 – заслонка; 6 – испаритель; 7 – уплотнительная прокладка; 8 – опорная плита установки [7].

При выборе материала испарителя главным условием является отсутствие легкоплавких эвтектик и химического взаимодействия с испаряемым веществом, что приводит к разрушению испарителя.

В справочной литературе обычно приводятся наиболее приемлемые пары материал испарителя - испаряемое вещество. Для примера в таблице 1 представлены рекомендуемые материалы испарителя для испарения некоторых металлов [7].

Таблица 1 – Рекомендуемые пары испаряемый металл-материал испарителя

Испаряемый материал	Al	Au	Cu, Ag	Zn	Cd	Ni, Fe	Ge	Ti
Материал испарителя	W, Ta, Nb	W, Mo	Mo, Ta, Nb	W, Mo, Nb	Ta, Nb	W	Ta, Mo	W, Ta

В ряде случаев используют испарители косвенного нагрева, выполненные из термостойкого оксида, например, кварца, оксидов бериллия, алюминия, тория, или нитридов, обогреваемые вольфрамовой или молибденовой спиралью.

Конструкции испарителей могут быть самыми различными (проволочные, ленточные типа лодочки, конусовидные и др.) и определяться целым рядом факторов: количество испаряемого материала, площадь подложки и др.

Разогрев испарителя, в который помещают испаряемый материал, обычно проводится за счет электрической энергии (резистивный нагрев); для металлов и полупроводников применяют высокочастотный или электроннолучевой нагрев.

Дискретное испарение (метод вспышки, взрывное испарение) применяется для получения пленок сложных по составу материалов (сплавов или смесей) с различающимися давлениями паров компонентов. Воспроизведение состава испаряемого материала в пленке достигается полным испарением малых порций материала, непрерывно подаваемых на испаритель, температура которого (обычно около 2000 °С) достаточна для испарения наименее летучего компонента. При этом стехиометрический состав газовой фазы, а, следовательно, и синтезируемого слоя, достигается статистическим сложением потоков от разных частиц, находящихся на разных стадиях испарения. Для проведения дискретного испарения используется специальная испарительная система с дискретной подачей компонента. Испаряемый материал в виде мелких гранул размером от 0,1 до 0,8 мм подается на испаритель из контейнера за счет вибраций. Для нагрева подложек используется резистивный нагреватель. Температура нагрева обычно варьируется от 100 до 400 ° [7].

Электронно-лучевое испарение используется для получения пленок высокой чистоты, так как в этом случае ликвидируется основной источник загрязнений – испаритель. Испарение материала осуществляется за счет его

нагрева при бомбардировке потоком электронов (электронной пушкой) части кристаллического материала, помещенного на охлаждаемый анод.

Различные виды электронно-лучевого испарения отличаются только типом и мощностью используемой электронной пушки.

При синтезе пленок в «квазизамкнутом» объеме испаритель и подложка располагаются достаточно близко с радиальным ограничением пространства обогреваемыми стенками таким образом, что перепад температур между ними сводится к минимуму. Это приводит к увеличению давления паров испаряемого вещества над подложкой, уменьшению пересыщения и формированию слоев в условиях, близких к равновесным. Такой метод позволяет получать пленки со свойствами, близкими к свойствам монокристаллов, что особенно важно для полупроводниковых материалов [7].

Далее перечислим достоинства и недостатки метода термического испарения по сравнению с другими методами нанесения пленок.

Достоинствами метода термического испарения являются:

- высокая скорость испарения веществ и возможность управления ею в широких пределах за счет изменения подводимой к испарителю мощности;
- высокая производительность;
- возможность одновременно с осаждением пленки получать требуемую конфигурацию тонкопленочных элементов пассивной части ИС за счет использования металлических ("свободных") масок;
- возможность проводить процесс, как в высоком вакууме, так и в окислительной и восстановительной среде разреженного газа.

К недостаткам термического испарения можно отнести:

- невысокую воспроизводимость свойств пленок;
- трудность испарения тугоплавких материалов и материалов сложного состава;
- появление поверхностных дефектов в результате вылета мелких частиц, нарушающих непрерывность пленочного покрытия;

- небольшой срок службы и высокую инерционность испарителей;
- загрязнение пленки материалом испарителей;
- невысокую адгезию пленок к подложке [4].

(Адгезия – сцепление поверхностей разнородных твёрдых и/или жидких тел [7])

1.2. Нанесение покрытий с использованием процесса распыления

Распыление – это процесс передачи импульса, в котором быстрая частица, например, ион аргона Ar^+, выбивает атом с поверхности (как правило) катода. При распылении вещества, ион передает импульс энергии его атому. Атом может передать импульс другим атомам, тем самым спровоцировав каскад столкновений [4].

Если импульс энергии поверхностного атома распыляемого материала будет достаточным для обеспечения разрыва связи ближайшими атомами, он покинет ее. Тогда направление полета этого атома будет соответствовать направлению полученного импульса.

Для определения эффективности процесса существует некий коэффициент распыления. Коэффициент распыления это число выбитых атомов на каждый падающий ион. Интервал минимальной энергии ионов, которая приводит к выбиванию атомов с поверхности составляет от 15 до 30 эВ, Распыление сопровождается эмиссией вторичных электронов, которые ускоряются в электрическом поле, вызвав при этом дополнительную ионизацию [8].

В установках с катодным распылением скорость роста покрытия имеет порядок 1 нм/с. Предельная скорость роста покрытия определяется возможностями теплосъема с мишени. Недостатками являются нерегулируемость и недостаточно высокие энергии распыленных атомов, низкая степень ионизации осаждаемых потоков (не более 1%) [4].

По сравнению с термическим испарением в вакууме распыление ионной бомбардировкой позволяет:

1) получать пленки из тугоплавких металлов;

2) наносить на подложку соединения и сплавы без диссоциации и фракционирования, т.е. без изменения исходного состава;

3) осаждать оксидные, нитридные и другие пленки за счет химического взаимодействия распыляемого материала с вводимыми в камеру химически активными газами (реактивное катодное распыление);

4) получать равномерные по толщине пленки на большой площади, в частности, при наличии поверхностного рельефа;

5) многократно использовать мишень в качестве источника материала, что повышает однородность процесса и облегчает его автоматизацию (например, в установках непрерывного действия);

6) обеспечивать высокую адгезию пленок к подложке благодаря специфическим условиям на подложке и высокой энергии осаждающихся атомов (частичное внедрение в решетку материала подложки) [9];

Основным недостатком ионного распыления являются относительно низкие скорости нанесения покрытий.

2. Магнетронные распылительные системы

2.1. Магнетронные распылительные системы с твердой мишенью

Магнетронные распылительные системы относятся к системам распыления диодного типа. Распыление в таких системах происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа (обычно аргона), образующимися в плазме аномального тлеющего разряда. Такие системы являются наиболее распространенными устройствами ионно-плазменного напыления. У данной системы есть большие перспективы промышленного применения, так как получаемые пленки (слои металлов, диэлектриков и сплавов) получаются с хорошей адгезией и низкой шероховатостью.

На данный момент основной системой, используемой для получения тонкопленочных покрытий, является магнетронные распылительные системы с твердой мишенью [5,6,8]. Существует несколько видов таких систем, которые широко используются. Рассмотрим наиболее применимые из них.

Принцип действия магнетронной распылительной системы показан на рисунке 2.

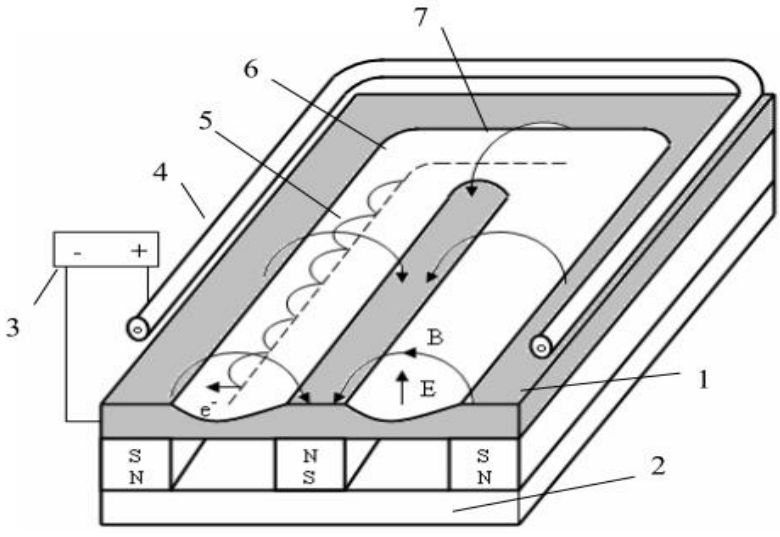

Рисунок 2 – Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью [8]: 1 – мишень; 2– магнитная система; 3 – источник питания; 4 – анод; 5 – траектория движения электрона; 6 – зона распыления; 7 – силовая линия магнитного поля.

Мишень, анод и магнитная система – это основные элементы устройства. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени расположена между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки. Геометрия такой дорожки определяется формой полюсов магнитной системы.

Аномальный тлеющий разряд возбуждается неоднородным электрическим полем, которое возникает при подаче постоянного напряжения между анодом (положительный или отрицательный потенциал) и мишенью (отрицательный потенциал). У распыляемой поверхности мишени находится замкнутое магнитное поле, которое позволяет локализовать плазму разряда у мишени. Электроны эмитируют с катода, и, находясь под действием ионной бомбардировки, оказываются захваченными магнитным полем. Движение, которое им сообщается, является сложным циклоидальным и происходит по замкнутым траекториям у поверхности мишени.

Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращаемым электроны на катод, а с другой стороны – поверхностью мишени, отталкивающей электроны.

До тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, электроны будут циклировать в этой ловушке. При столкновении электрон теряет энергию, которая была получена от электрического поля. Следовательно, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение. Такой процесс намного увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности катода. Этим объясняется увеличение интенсивности ионной бомбардировки поверхности мишени и значительный рост скорости распыления, и это значит, что скорость осаждения пленки тоже растет [8].

Рабочие параметры магнетронных распылительных систем приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры магнетронных распылительных систем [4]

Давление, Па	10^{-2}-1
Напряжение на мишени, В	300-700
Удельная мощность, Вт/см^2	~100
Плотность ионного тока, мА/см^2	200
Расстояние до подложки, см	5-20
Степень использования материала мишени, %	До 80
Однородность толщины нанесений пленки, %	$\leq \pm 1{,}2$
Площадь подложек, м^2	До 3,2×6

Классификация схем магнетронных распылительных систем может быть проведена по нескольким видам. Например, по видам питающего напряжения и тока разряда, форме мишени, типу магнитной системы и фазовому состоянию катода.

Основным элементом МРС является распыляемый катод. Можно отметить три наиболее применяемых типов магнетронов, которые различаются по форме катода:

- плоские МРС с дисковым катодом или протяженным катодом (планарные МРС) (рисунок 3а);
- цилиндрические МРС (рис. 3б);
- МРС с конической мишенью (рис. 3в).

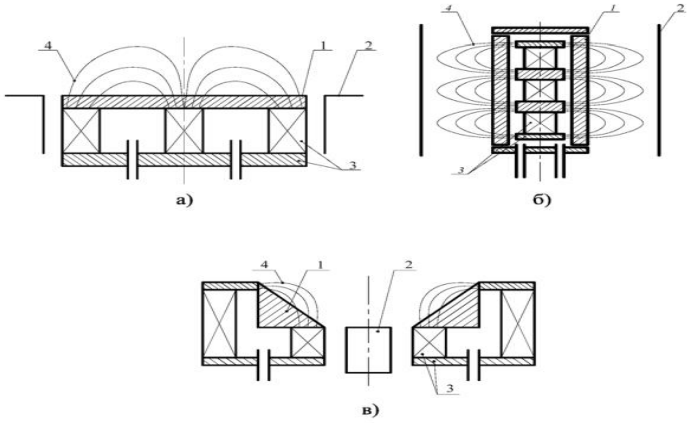

Рисунок 3 – Основные конструктивные схемы МРС (а - планарная МРС, б - цилиндрическая МРС; в - МРС с конической мишенью) [10]:
1 – катод-мишень; 2– анод; 3 –магнитная система; 4 – силовые линии магнитного поля

Самыми распространенными системами является магнетронная распылительная система с плоской мишенью.

Плоские МРС с дисковым катодом используются в небольших установках для нанесения упрочняющих покрытий, проводящих дорожек в микросхемах, отражающих и интерференционных покрытий на небольшие оптические детали.

МРС с цилиндрической формой катода используются при необходимости обеспечить максимальную загрузку камеры обрабатываемыми изделиями.

Существует также некая комбинация, в которой объединяется МРС с плоским дисковым катодом и МРС с коническим катодом. С помощью такой комбинации можно получить высокую равномерность толщины покрытий на дисковой подложке с диаметром равным наружному диаметру конического катода. Такие устройства применяются для нанесения магнитных покрытий на диски накопителей информации.

Основные рабочие характеристики магнетронных распылительных систем – напряжение на электродах, ток разряда, плотность тока на мишени и удельная мощность, величина индукции магнитного поля и рабочее давление. От перечисленных выше параметров, которые связаны между собой, зависят стабильность разряда и воспроизводимость процесса нанесения пленок. МРС относятся к низковольтным системам распыления [8].

Давление рабочего газа (аргона), при котором работают магнетроны, составляет 0,03–0,5 Па. Эффективность магнетрона снижается, если давление будет выше, при этом разряд будет гореть. Расстояния от катода до подложки обычно более 0,1 м. При давлениях выше 0,5 Па длина свободного пробега менее 0,02 м. Это приводит к снижению потока распыленного материала за счет столкновений распыленных атомов с атомами аргона. Поэтому желательно обеспечить работу магнетронной распылительной системы при более низких давлениях. Разряд в МРС можно зажечь при давлениях ниже 0,03

Па, причем нижняя граница допустимого давления сильно зависит от конструктивных особенностей МРС и конфигурации магнитного поля [10].

Одной из основных характеристик разряда является вольтамперная характеристика (ВАХ).

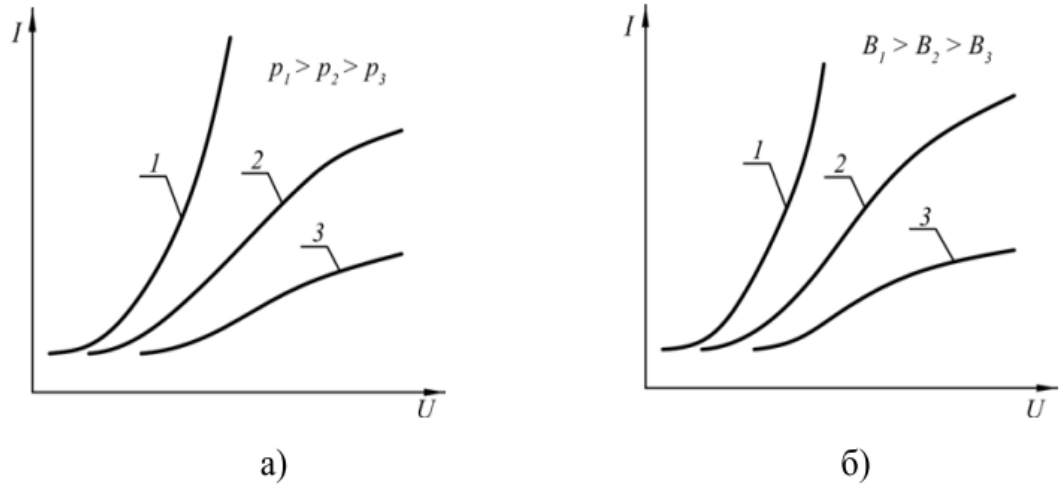

Рисунок 4 – Влияние давления рабочего газа p (а) и индукции магнитного поля *B* (б) на поверхности катода на вольтамперную характеристику разряда в магнетронной распылительной системе [10].

Существенное влияние на нее оказывают рабочее давление *p* и индукция магнитного поля *B*. Рост индукции магнитного поля приводит к возрастанию тока разряда при неизменных значениях напряжения и давления. Рост давления рабочего газа вызывает возрастание тока при постоянных величинах напряжения и индукции поля *B* на поверхности катода (рисунок 4).

Так как МРС широко используется для создания атомных потоков в технологических схемах, реализующих вакуумно-конденсационные методы осаждения покрытий, то встает задача повышения интенсивности образующихся потоков и снижения энергозатрат на их генерацию. Весьма перспективными для решения поставленных задач могут быть МРС с сильно разогретыми мишенями. В частности, из экспериментов известно [11], что скорость осаждения металлических пленок заметно выше, если мишень переведена в расплавленное состояние. Дальнейшим развитием МРС является система с испаряющимся катодом, то есть магнетрон с жидкофазной мишенью.

Распыление материала магнетронным разрядом может происходить независимо от его состояния, оно может быть, как жидким, так и твердым. Для того, чтобы распылить металл из жидкой фазы, его необходимо поместить в тигель, который должен быть термически изолированным от магнитной системы. При зажигании разряда, металл катода разогревается и плавится. Скорость распыления металла при этом значительно выше скорости распыления холодного твердого катода. Если повышается плотность тока, то при этом повышается температура расплава и давление паров металла над катодом. Горение разряда в парах собственного катода (режим самораспыления) возможно только при достаточно высокой для этого плотности паров.

Такие магнетронные распылительные системы имеют наиболее высокие скорости распыления катода и наибольшие коэффициенты использования материала [10]. Далее рассмотрим подробнее такие системы.

2.2. Магнетронная распылительная система с жидкофазной мишенью

Соединяя достоинства термического испарения и магнетронного распыления, метод магнетронного распыления металлов из жидкой фазы является одним из перспективных методов получения покрытий. Магнетроны с жидкофазной мишенью обладают очень высокой производительностью, но трудны в исполнении. Кроме того, они слабо изучены, и это обстоятельство служит препятствием для их практического применения [12].

Как уже было описано выше, большинство современных МРС основан на распылении поверхности мишени потоками плазмы. Обычно мишень собрана в единое целое с магнитной системой и корпусом магнетрона. Тепло, которое выделяется в мишенном узле в присутствии горящей плазмы, отводят от него с помощью системы охлаждения, чтобы предотвратить, перегрев

магнитной системы. При этом мишень, как правило, имеет хороший контакт с магнитной системой и поэтому ее температура остается на не высоком уровне [11].

Для материала в твердом состоянии максимально допустимая удельная мощность, а, следовательно, и скорость распыления ограничивается его теплопроводностью. Для большинства металлов при нагреве теплопроводность постепенно снижается и при переходе из твердого состояния в жидкую фазу ее суммарное увеличение обычно не превышает пятикратного значения. В расплавленном состоянии к мишени можно подводить большие мощности, увеличивая тем самым скорость генерации вещества и повышая температуру расплава до такого значения, при котором наряду с распылением начинается интенсивный процесс испарения. В связи с изложенным представляется целесообразным применять тепловую энергию, которая в настоящее время затрачивается на нагрев воды, на генерацию вещества путем его испарения, и таким образом объединить процесс распыления и испарения в единый распылительно-испарительный процесс [13].

Соотношение вкладов этих компонент зависит от температуры поверхности металла, которая, в свою очередь, определяется мощностью потока энергии из плазмы и свойствами вещества мишени.

Таким образом, энергию, которая при распылении из твердой фазы теряется в виде тепла, можно использовать на дополнительную генерацию распыляемого вещества.

При достаточно высоких плотностях энергии возможен переход магнетронного разряда в режим самораспыления, при котором в качестве рабочего газа выступают атомы материала мишени, что существенно снижает загрязнение пленки остаточными газами [11].

Обзор конструкций магнетронных распылительных систем с жидкофазной мишенью. Рассмотрим известные конструкции МРС с жидкофазной мишенью.

Для распыления материала из жидкой фазы используется магнетронная распылительная система, изображенная на рисунке 5.

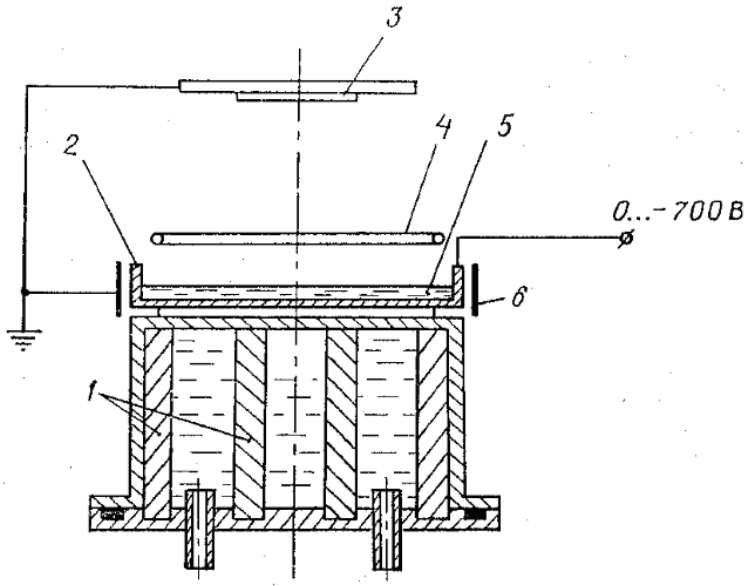

Рисунок 5 – Схема устройства для распыления из жидкой фазы [8]:
1– магнитная система тигель, 2 – тигель, 3 – подложка, 4 – экран, 5 – мишень, 6 – анод

Непосредственно под тиглем 1, изготовленным из немагнитного материала, располагают водоохлаждаемую магнитную систему 2, между корпусом которой и тиглем 1 сделан зазор, ограничивающий отвод тепла от тигля в процессе его разогрева. В тигель помещают диски 3 из Al или Cu, выполняющие роль мишени. Снижение лучистого теплоотвода от тигля обеспечивается радиационным экраном 4. Анод 5 в виде охлаждаемой медной трубки располагают на расстоянии 25 мм над тиглем [8].

Еще одна конструкция магнетронной распылительной системы с жидкофазной мишенью представлена на рисунке 6.

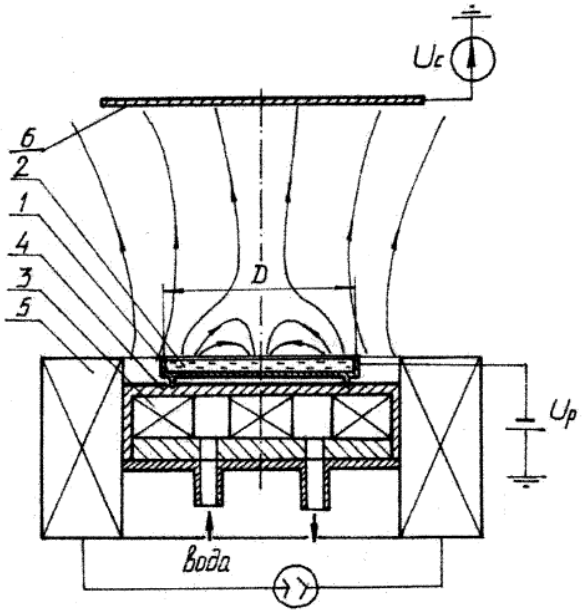

Рисунок 6 – Магнетрон с жидкометаллическим катодом [14]:
1- тигель; 2- расплав материала катода - мишени; 3- магнитная система; 4- корпус магнетрона; 5- внешняя электромагнитная катушка; 6 - подложка

Распыляемый материал (2) помещается в тигель (1) из тугоплавкого немагнитного материала. В качестве материала мишени используются обычно алюминий, медь, свинец и олово. Между тиглем и водоохдаждаемой магнитной системой сделан небольшой зазор, шириной около 2 мм, который препятствует отводу тепла от тигля. Тигель устанавливается на магнитной системе на тонких ножках-иголочках. Ножки помещены в паз корпуса магнитной системы и обеспечивают фиксацию тигля в определенном положении относительно магнитной системы, так чтобы магнитное поле над мишенью было арочной конфигурации, а также создают необходимый теплоизоляционный зазор при минимальной площади контакта с охлаждаемой поверхностью. Арочное магнитное поле над мишенью создается магнитной системой на постоянных магнитах. Магнитная система состоит из центрального магнита и внешнего магнитного кольца (3) закрепленных на пластине из ферромагнитного материала и помещенных в медный водоохлаждаемый корпус (4).

Для регулирования площади распыляемой поверхности используется внешняя электромагнитная катушка (5). Изменяя направление и силу тока во внешней катушке можно воздействовать на величину магнитной индукции и конфигурацию магнитного поля над поверхностью мишени. Магнетрон и электромагнитная катушка крепятся на корпус вакуумной камеры, являющейся анодом [14].

Недостатком данной конструкции является его маленькие размеры. Данный магнетрон сложен в реализации и его невозможно использовать при напылении пленок на подложки большой площади. Также в данной системе нет процесса испарения, что соответственно снижает скорости распыления.

Следующий вид магнетронной распылительной системы с жидкофазной мишенью представлен на рисунке 7.

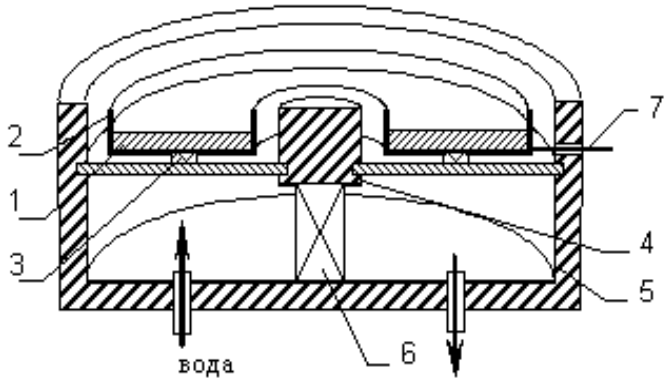

Рисунок 7 – Конструкция магнетрона с жидкофазной мишенью [15]:
1 – мишень; 2 – тигель; 3 – керамические вставки; 4 – центральный магнитопровод; 5 – корпус магнетрона; 6 – постоянные магниты; 7 – термопара

Мишень (1) помещена в тигель(2) из тугоплавкого материала, который теплоизолирован от корпуса (5) посредством керамических вставок (3), и окружен полюсными наконечниками центрального (4) и внешнего (6) магнитопроводов. Магнитная система включает в себя магнитопровод (4) и набор постоянных магнитов (6), охлаждаемых проточной водой. Кольцо выполнено из магнитопроводящего металла и служит для развязки магнитного поля устройства. Отличительной особенностью данной конструкции от

классической МРС является то, что тигель и мишень выполнены в виде кольца. Это и является ее основным недостатком, т.к. осложняет ее исполнение [15].

Конструкция с кольцевой мишенью лишена недостатка неравномерного плавления мишени, так как вся мишень находится непосредственно в зоне горения разряда и, следовательно, происходит ее равномерное расплавление.

Сначала магнетрон начинает работу в обычном режиме. Мишень остаётся твёрдой. Но по мере воздействия плазмы магнетронного разряда она постепенно нагревается и плавится. После чего совершенно меняется характер эрозии её поверхности, так как значительная часть атомов покидает мишень вследствие испарения, а не распыления как в случае твердотельной мишени. При этом их количество может быть настолько большим, что есть возможность отключить подачу рабочего газа и магнетрон будет работать на парах металла. Следует отметить, что доля металлических ионов в газоразрядной плазме постепенно повышается ещё и из-за того, что их потенциал ионизации ниже, чем у аргона. Таким образом, магнетрон переходит в режим самораспыления, где в качестве рабочего газа выступают атомы материала мишени. Поле того, как вся мишень полностью перешла в жидкое состояние, она не находиться в состояние покоя, а начинает круговое вращение. Это объясняется взаимодействием электрических и магнитных полей в жидком металле. Вследствие этого появляется сила, которая и заставляет жидкий металл двигаться в направлении, которое устанавливается известным правилом левой руки. Такое поведение жидкого металла положительно влияет на процесс распыления, так как происходит удаление остаточных загрязнений с поверхности мишени на стенки тигля.

Магнетронные распылительные системы с жидкофазной мишенью являются высокоскоростным способом металлических покрытий, это объясняет сочетание в них распылительного и испарительного процессов. Из всех представленных конструкций более эффективной является модель, в

которой используются тигель и мишень в виде кольца. Данная система решает большинство проблем, связанных с реализацией данного метода.

Но, помимо выбора используемой конструкции, необходимо учитывать ее характерные особенности в работе. Далее будут представлены необходимые рекомендации к выбору основных элементов конструкции МРС с жидкофазной мишенью.

2.2.1. Требования к материалам МРС с жидкой мишенью

Магнитное поле. Наиболее важным проектным параметром магнетронной распылительной системы является максимальная величина параллельной поверхности катода составляющей индукции магнитного поля *B*. Наибольшая величина *B* достигается на поверхности катода, под аркой из силовых линий магнитного поля. Там же достигается наибольшая плотность тока и происходит максимальная выработка катода. Величина *B* лежит в диапазоне 0,02-0,12 Тл [10].

Схема конструкции МРС, предполагающей её интенсивный разогрев, представлена на рисунке 8 (а, б).

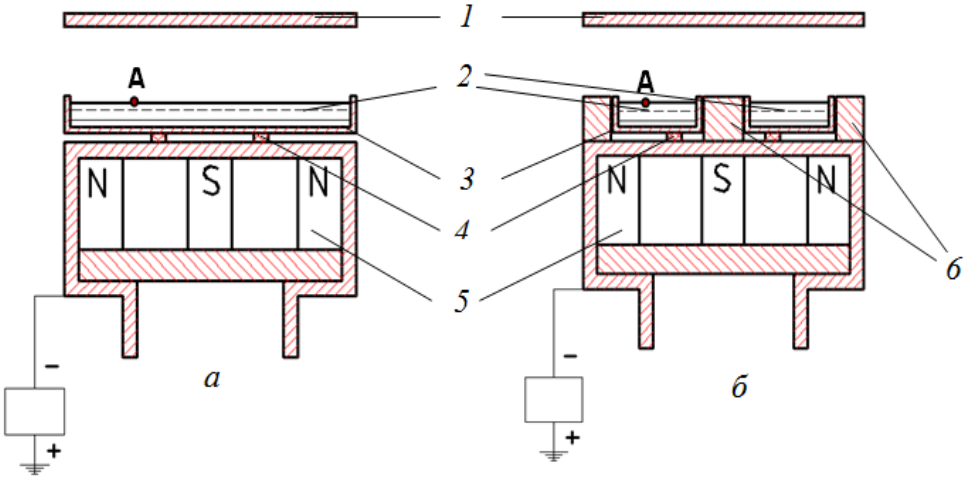

Рисунок 8 – Конструкции МРС с жидкофазной мишенью (а – дисковая мишень, б – кольцевая мишень) [16]: 1 – подложка, 2 – мишень, 3 – тигель, 4 – керамические изоляторы, 5 - магнитная система, 6 – полюсные наконечники.

Поскольку ионизация атомов рабочего газа в МРС осуществляется электронами, движущимися по замкнутым траекториям под действием скрещенных электрического и магнитного полей, её эффективность определяется способностью магнитного поля (величиной горизонтальной составляющей магнитной индукции B_x) захватывать электроны. Чем выше значение B_x, тем выше концентрация электронов у поверхности мишени и степень ионизации газа. Следовательно, увеличение магнитной индукции вблизи поверхности мишени позволяет «поджиг» магнетронного разряда при гораздо меньших давлениях рабочего газа в камере. Это снижает степень загрязненности вакуума и, соответственно, повышает чистоту будущего покрытия [10].

В отличие от МРС с дисковой мишенью, в случае конструкции с кольцевой мишенью последняя окружена полюсными наконечниками. Это позволяет повысить значение магнитной индукции вблизи поверхности по сравнению с конструкцией, использующей диск, с аналогичной магнитной системой.

На рисунке 9 представлены результаты вычислений горизонтальной составляющей магнитной индукции, выполненных с помощью программного пакета Elcut и описанные в работе [16].

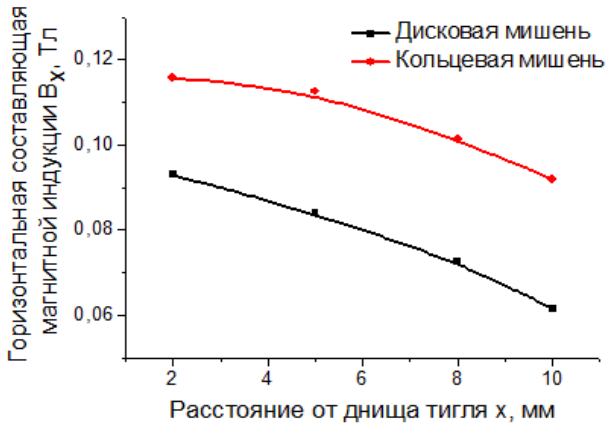

Рисунок 9 – Горизонтальная составляющая магнитной индукции *B* на поверхности мишени (точка А, рис. 6) при изменении ее толщины

Расчет произведен для двух конструкций магнетрона с кольцевой и дисковой мишенями из немагнитных материалов и отражает изменение B_x на поверхности в точке A (рисунок 8) с увеличением толщины мишени. Сравнение абсолютных значений B_x свидетельствует о том, что использование магнетрона с мишенью в виде кольца предпочтительнее, поскольку в этом случае значение магнитной индукции приблизительно на 30 мТл больше [16].

Смачиваемость. Испаряемость материала тигля, когда вещество начинает испаряться, должна быть пренебрежимо малой. Материалу тигля для хорошего теплового контакта необходимо хорошо смачиваться расплавленным испаряемым веществом. Между материалом тигля и испаряемым веществом не должно происходить никаких химических реакций и образовываться легко испаряемых сплавов, так как это приводит к загрязнению наносимых пленок и разрушению испарителей.

Для изготовления испарителей промышленных установок используют тугоплавкие металлы (вольфрам, тантал, молибден) [17].

Температура плавления мишени и тигля. Для того, что провести процесс испарения вещества в вакууме нужно иметь подходящий тигель. Такой тигель должен содержать в себе мишень и поддерживать ее при температуре, необходимой для получения требуемого давления паров. Скорости осаждения пленок могут меняться от величин, меньших 1 А/с, до величин, больших 1000 А/с, при этом температуры испарения разных материалов различны. Чтобы получить приблизительные оценки рабочих температур испарителей обычно основываются на необходимости иметь установившиеся давление паров испаряемого материала порядка 10^{-2} мм рт. ст. для получения используемых скоростей осаждения пленок. Для большинства материалов, которые представляют практический интерес, данные температуры превосходят 1000–2000 ^{0}С. Чтобы избежать загрязнения осаждаемых пленок вещество испарителя должно иметь при рабочей температуре давление диссоциации и незначительную упругость пара. Материалами, которые отвечают этим требованиям, являются окислы и

тугоплавкие металлы [18]. Если температура плавления ниже условной температуры испарения, значит испарение происходит из жидкого состояния. Однако некоторые вещества имеют температуру плавления выше условной температуры испарения, т.е. вещества интенсивно испаряются из твердого состояния.

Инертность. Материал тигля и мишени выбирается, учитывая возможности возникновения реакции между мишенью и материалом тигля, а также вероятность образования сплавов. В случае образования сплава возможно быстрое разрушение тигля, вследствие существенного уменьшения температуры плавления. При возникновении химической реакции возникают легко испаряющиеся соединения, например, низшие окислы, загрязняющие пленку.

Существует проблема поиска подходящих химически инертных тиглей для материалов, которые испаряются при температурах свыше 1000 ^{0}C. Такая проблема решается, когда температура испарения осаждаемого вещества, при которой давление паров составляет 10^{-2} мм рт. ст., близка к температуре его плавления. Такие элементарные вещества, как Cr, Mo, Pd, V, Fe, и Si показывает давление паров 10^{-2} мм рт. ст. раньше, чем они плавятся [15].

Степень черноты тигля. Использование материала тигля с более низким значением степени черноты позволяет существенно повысить долю энергии ионного тока, расходуемую на испарение, и тем самым увеличить производительность осаждения покрытия. Чем меньше значение степени черноты, тем меньше тепловой энергии, переданной мишени и тиглю, расходуется на тепловое излучение и, соответственно, тем больше энергии идет на разогрев и фазовые превращения вещества мишени.

Удельная теплоемкость материалов. Удельная теплоемкость вещества показывает количество энергии, которую необходимо сообщить или отобрать, для того, чтобы увеличить или уменьшить температуру одного килограмма вещества на один градус Кельвина.

Удельная теплоемкость для любого вещества есть величина переменная, то есть она зависит от температуры и агрегатного состояния вещества. Из этого следует, что в качестве материала тигля нужно выбирать материал с высокой удельной теплоемкостью.

Теплопроводность. Тигли из соответствующих тугоплавких металлов будут иметь преимущества перед тиглями, которые сделаны из окислов металлов, хотя испарение загрязнений из окислов, а также совсем незначительное взаимодействие между тиглем и расплавленным испаряемым металлом иногда довольно трудно заметить. Металлические тигли могут быть разными по форме и разными по размерам, также они имеют лучшую теплопроводность и меньшую чувствительность к перепадам температуры, нежели тигли, которые изготавливают из окислов металлов.

3. Экспериментальная установка

3.1. Схема экспериментальной установки

Исследования проводились на лабораторной установке КВО. Конструкция установки позволяет проводить осаждение покрытий в среде рабочего газа или смеси газов, для получения металлических и неметаллических покрытий (оксидов, нитридов и т.п.). Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов обеспечивает очистку поверхности перед осаждением. Управление установкой осуществляется в ручном режиме.

Рабочая камера (РК) представляет собой герметизированный объем круглого сечения. Основное назначение рабочей камеры – осуществление процесса нанесения плазменного покрытия на размещаемые в ней образцы для чего в ней размещается необходимое оборудование и обеспечивается необходимая вакуумно-газовая среда.

Затвор вакуумный предназначен для «отсечения» высоковакуумной части системы откачки от рабочей камеры при выполнении в ней загрузочно-разгрузочных работ.

Вакуумная система (ВС) служит для создания необходимого разрежения в рабочей камере установки для осуществления процесса напыления. Вакуумная схема установки показана на рисунке 10. ВС собрана по стандартной схеме получения высокого вакуума на базе диффузионного паромасляного насоса Н-250.

ВС включает в себя:

- Диффузионный паромасляный Н-250;
- Пластинчато-роторный насос НВР-20;
- Магистраль откачки диффузионного насоса;
- Затвор 2ЗВЭ–250;
- Клапан вакуумный электромагнитный КВМ–25;
- Клапан вакуумный электромеханический КВМ-63;
- Клапан вакуумный электромеханический КВЭ–63.

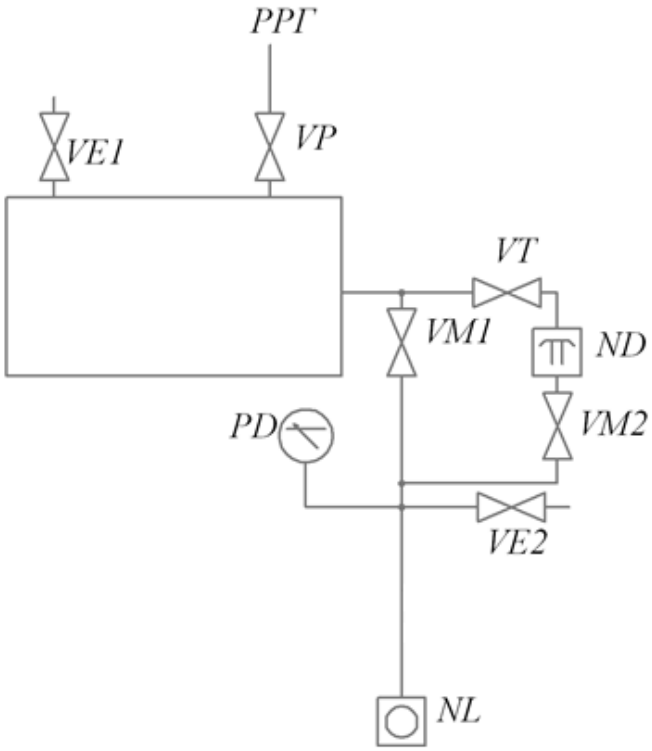

Рисунок 10 – Вакуумная схема установки КВО: РРГ - регулятор расхода газа; VE1- клапан с эл-магн. приводом; VE2 - клапан с эл-магн. приводом; VP - натекатель НМБ-1; VT – затвор с эл. -мех. приводом; VM1- клапан с эл-магн. приводом; VM2- клапан с эл-мех. приводом; PD - вакуумметр; ND - насос диффузионный паромасляный; NL - форвакуумный насос.

Магнетрон предназначен для нанесения покрытий на поверхности образцов.

Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов предназначен для очистки поверхности образцов, расположенных в рабочей камере методом распыления газовыми ионами.

Подготовка установки к работе:

- проверить внешнее состояние токоведущих проводов, кабельного канала и убедиться в отсутствии повреждений и надлежащем расположении;
- проверить положение тумблеров панели управления 6 (должны находиться в среднем или нижнем положении);
- проверить положение ручного вакуумного клапана (должен находиться в закрытом положении);

- проверить положение вакуумного затвора VT (тумблер VT должен находиться в положении «Закрыт»);

- клапаны VE1, VE2, VP, VM1, VM2 должны находиться в положении «Закрыт»).

Включение установки и получение вакуума:

- подать напряжение на установку включив тумблер «380 В 50 Гц» на панели управления;

- включить вакуумметр ВИТ-3 для прогрева;

- включить форвакуумный насос NL кнопкой «ПУСК NL»;

- включить диффузионный насос ND кнопкой «ПУСК ND» на панели управления. Выход диффузионного насоса в рабочий режим происходит через ~ 40÷45 мин.;

- открыть клапан VM2;

После выхода диффузионного насоса в рабочий режим погаснет индикаторная лампа красного цвета таймера времени на панели управления;

- закрыть клапан VM2

- открыть клапан VM1;

- после достижения разряжения в камере ~ 10 Па закрыть VM1, открыть VM2 и VT.

Разгрузка (загрузка) рабочей камеры:

- закрыть затвор VT;

- открыть клапан VE1.

После проведения указанных операций произойдет напуск атмосферы в рабочую камеру. Загрузка рабочей камеры осуществляется в следующем порядке:

- закрыть двери рабочей камеры и зафиксировать их защелками;

- закрыть клапан VE1.

Выключение установки в обратном порядке.

3.2. Приборы и методика измерений

Измерение толщины пленок. Прибор Calotest CAT-S0000 предназначен для измерения толщины металлических, диэлектрических, полимерных пленок, в том числе и многослойных в диапазоне 0,1–50 микрометров. Время анализа не превышает нескольких минут. Могут быть исследованы образцы с плоской, цилиндрической и сферической поверхностью. Технические характеристики Calotest CAT-S0000 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики Calotest CAT-S0000

Размеры рабочей области, мм	80x80
Скорость врщения об/мин	10-3000
Стандартный диаметр шара, мм	10, 15, 20, 25, 30
Время шлифования, сек	2 - 900
Водный раствор алмазной пыли, мм	(0,5-1,0); ≤0.2
Размеры рабочей области, мм	80x80

Исследование производилось следующим образом. Образец помещается на штатив прибора. На валик с электроприводом, размещается шар относительно образца. Задается скорость и время, валик начинает вращаться. Скорость вращения шарика – 100 обор/мин. Вращающийся шар прижимается к поверхности образца при помощи выбранной нагрузки. Положение шара относительно образца и контактная нагрузка являются постоянными. К контактному участку добавляют абразивную пасту, она обеспечивает быстрое формирование на поверхности образца сферического отпечатка.

Рисунок 11 - Прибор для измерения толщины пленок
и покрытий (Calotest CAT-S0000)

Изображение отпечатка анализируется программным обеспечением прибора. На рисунке 12 изображен образец после измерения толщины.

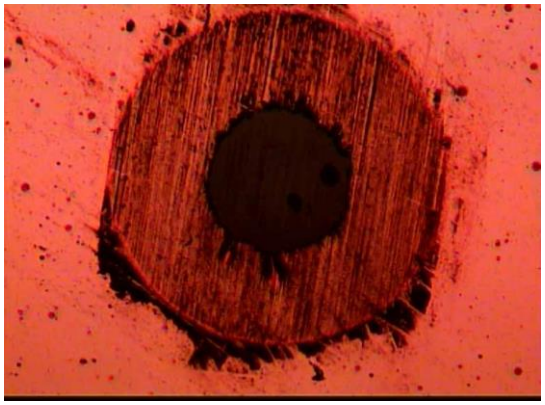

Рисунок 12 – Изображение образца после измерений.

Измерение адгезионной прочности покрытий. Прибор Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 предназначен для исследования адгезионных свойств и износостойкости тонких пленок и покрытий. Применяется для определения числовых параметров системы пленка/основа, таких как:

- сила трения;
- прочность адгезии;
- изображение акустической эмиссии;
- глубины вдавливания индентора.

Рисунок 13 – Прибор для измерения адгезионной прочности покрытий.

При измерении адгезионной прочности покрытия применяется контролируемое нанесение царапины на образец при помощи алмазного индентора. Индентор проходит по поверхности покрытия при постоянной или изменяемой нагрузке. При определенной критической нагрузке покрытие начинает разрушаться. Критическая нагрузка определяется при помощи датчиков акустической эмиссии, силы трения, глубины проникновения, силы нагружения индентора и оптической микроскопии. В устройстве предусмотрена компьютерная обработка данных. Вся информация во время теста отображается в режиме реального времени.

Технические характеристики Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики Micro-Scratch Tester

Диапазон нагрузки, мН	$10 – 30 \cdot 10^3$
Разрешение по нагрузке, мН	0.1
Сила трения, мН	$10 - 30 \cdot 10^3$
Разрешение по силе трения, мН	0,15
Глубина проникновения индентора, мкм	1000
Разрешение по глубине, нм	1,5
Рабочая область стола, мм	75х75
Скорость нанесения царапины, мм/мин	0,1–20
Объективы микроскопа	50х, 200х, 1000х

Измерение шероховатости покрытий. Прибор Micro Measure 3D Station полностью автоматизирован и оснащен мощным программным обеспечением, которое управляет процессом сканирования образца, записью данных, их математической и графической обработкой. Программное обеспечение включает 260 различных функций обработки результатов измерений.

Назначение и область применения:

- Бесконтактные измерения различных глубин с использованием набора компактных оптических датчиков
- Выбор одной, двух или трех осей движения для точного позиционирования и сканирования поверхности предмета
- Анализ твердых и мягких образцов, в том числе и оптически прозрачных
- Расчет расстояний, площадей, объемов отдельных объектов и массивов

Таблица 5 – Технические характеристики Micro Measure 3D Station

Размер зоны сканирования, мм	X=100, Y=100, Z=50
Минимальный размер шага (X и Y), мкм	0,1
Максимальная скорость перемещения по осям X и Y, мм/сек	20
Диапазон измеряемых глубин при использовании различных сенсоров CHR150N2/разрешение по оси Z, мкм	(0-20)/0,001; (0-80)/0,003; (0-300)/0,01
Максимальная скорость сбора данных, точек/сек	1000

Для прямых измерений применяют технологию вычитания двух разных отражений из оптически прозрачной пленки, либо интерферометрический

метод для очень тонких пленок. Для оптически непрозрачных пленок используется метод измерения высоты шага для расчета толщины пленки в том случае, если часть поверхности не имеет покрытия. Прибор идеален для измерений шероховатости, благодаря небольшому размеру светового пятна.

Технические характеристики Micro Measure 3D Station представлены в таблице 5.

Измерение температуры с помощью пирометра. Температура с помощью пирометра измеряется по тепловому электромагнитному излучению. Информация, полученная прибором, предоставляется в удобной для пользователя форме. Наиболее распространенные среди устройств подобного рода являются инфракрасные пирометры. Здесь используется метод радиационной пирометрии (другие названия – инфракрасный термометр или инфракрасный радиометр).

Инфракрасный пирометр измеряет абсолютное значение амплитуды электромагнитного излучения от объекта в инфракрасной части спектра и последующем преобразовании измеренного значения в температуру

Схема пирометра с оптическим видоискателем показана на рисунке 14.

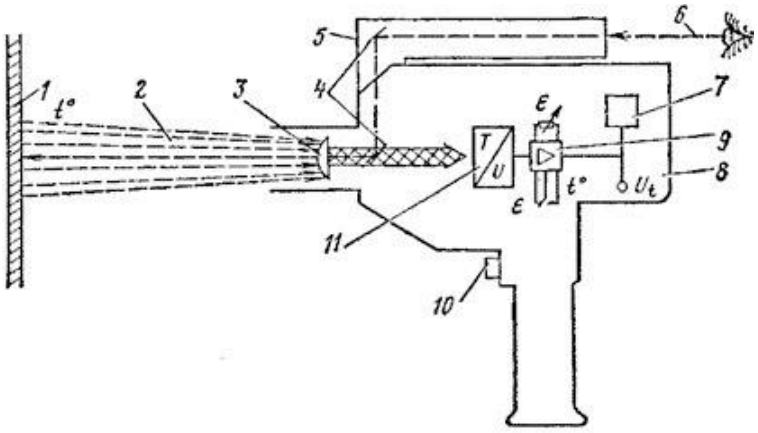

Рисунок 14 - Схема пирометра: 1 - объект измерения; 2 - тепловое излучение; 3 - оптическая система; 4 - зеркало; 5 - видоискатель; 6 - ось видоискателя; 7 - измерительно-счетное устройство; 8 - корпус; 9 - электронный преобразователь; 10 - кнопка; 11 – датчик.

Тепловой луч, сфокусированный оптической системой, падает на датчик (первичный пирометрический преобразователь), в результате на выходе образуется электрический сигнал, пропорциональный значению температуры объекта измерения. Этот сигнал проходит через электронный преобразователь (вторичный пирометрический преобразователь), попадает в измерительно-счетное устройство и обрабатывается в нем. Результат отображается на дисплее (индикация у современных пирометров, как правило, цифровая).

Чтобы получить точное значение температуры объекта, пользователю нужно лишь включить прибор, навести его на объект измерения и нажать на кнопку. На сегодняшний день этот метод бесконтактного измерения температуры является одним из самых простых и недорогих. Измерения можно проводить практически на любом расстоянии, дальность действия современных пирометров ограничивается только площадью измеряемого пятна и прозрачностью среды.

В экспериментах для измерения температуры тигля и мишени использовался пирометр серии «Термикс». Внешний вид изображен на рисунке 15. Эти пирометры работают в узком спектральном диапазоне длин волн, что обеспечивает более высокую точность измерения температуры по сравнению с пирометрами полного излучения.

Рисунок 15 – Внешний вид пирометра Термикс

Измерение коэффициента отражения пленок на спектрофотометре СФ-2000. Спектрофотометры предназначены для измерения спектральных коэффициентов направленного пропускания жидких и твердых прозрачных образцов.

Принцип действия спектрофотометра основан на измерении двух потоков: светового потока, прошедшего через исследуемый образец, и потока, падающего на исследуемый образец (или прошедший через контрольный образец).

Световой поток от источника излучения поочередно вводятся для определения темного сигнала, расположенный внутри спектрофотометра, контрольный образец и исследуемый образец.

Коэффициент пропускания исследуемого образца рассчитывается по формуле:

$$T=(I - I_T) / (I_K - I_T), \quad (2)$$

где I_T – сигнал, пропорциональный световому потоку, прошедшему через исследуемый образец; I_K - сигнал, пропорциональный световому потоку, прошедшему через контрольный образец; I_T - сигнал, пропорциональный темновому току приемника.

Оптическая схема спектрофотометра приведена на рисунке 16. Она состоит из оптических схем двух каналов («У» и «В»). Каждый из каналов представляет собой полихроматор, построенный на основе вогнутой дифракционной решетки с коррекцией аберраций.

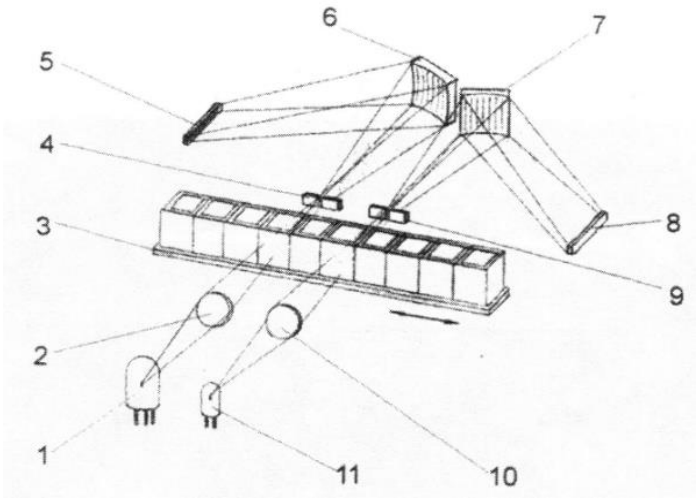

Рисунок 16 - Оптическая схема спектрофотометра.

Свет от источника УФ-излучения 1, попадая на объектив 2, направляется им на образец 3 и проецируется на входную щель 4 канала «У» спектрофотометра. Затем световой пучок попадает на дифракционную решетку 6, после чего дифрагированный свет фокусируется на поверхности многоэлементного приемника 5.

Аналогично, свет от источника видимого излучения 11, попадая на объектив 10, направляется на образец 3, проецируется на входную щель 9 канала «В» спектрофотометра. Затем световой направляется на дифракционную решетку 7, после чего дифрагированный свет фокусируется на поверхности многоэлементного приемника 8.

Каждый из многоэлементных приемников регистрирует свой спектральный диапазон одновременно. Принцип работы многоэлементного приемника состоит в преобразовании светового сигнала в электрический, причем величина электрического сигнала прямо пропорциональна как величине светового сигнала, так и времени освещения приемника (экспозиции).

Спектрофотометр СФ-2000 может оснащаться держателем твердых образцов и волоконно-оптической приставкой зеркального и диффузного отражения с переменным углом СФО-2000, которая позволяет определять степень белизны и цветовые характеристики различных материалов: как

небольших образцов, так и габаритных объектов, находящихся на расстоянии до 1 м от спектрофотометра. Приставка не является средством измерения.

Рентгеноструктурный анализ. Рентгеноструктурный анализ проводился путем анализа дифрактограмм исследуемых образцов, полученных на дифрактометре Shimadzu XRD-7000S внешний вид которого представлен на рисунке 17.

Рисунок 17 – Внешний вид дифрактометра Shimadzu XRD-7000S

В основе рентгеноструктурного анализа лежит явление дифракции. В данном случае под дифракцией понимается явление сильного рассеяния волн на периодической решётке рассеивателя при определенных углах падения и длинах волн. Простейший случай такого явления возникает при рассеянии света на дифракционной решётке. При этом интесивные пики рассеяния наблюдаются тогда, как выполняется условия Вульфа — Брэгга (рисунок 18):

$$2dsin2\theta = n\lambda, \quad (3)$$

где d – расстояние между соседними кристаллографическими плоскостями, θ – угол, под которым наблюдается дифракция, n – порядок дифракции, λ – длина волны монохроматических рентгеновских лучей, падающих на кристалл.

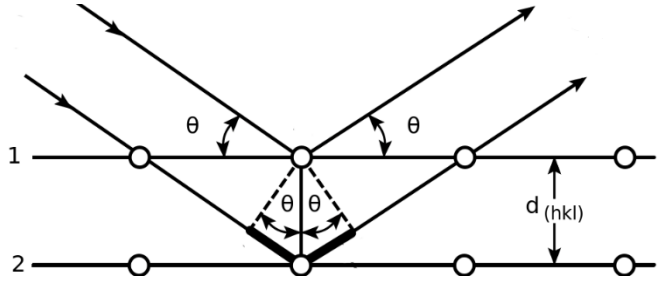

Рисунок 18 – Схема падения и отражения рентгеновского луча

При взаимодействии образца с монохроматическим рентгеновским излучением для каждого сорта плоскостей часть кристаллитов попадает в «отражающее» положение. В этом случае под углом θ наблюдается дифракционный максимум для данного сорта плоскостей, характеризующийся разной интенсивностью. Угловое положение максимума определяется значением межплоскостного расстояния. Значение d определяется геометрией кристаллической решетки.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0Б21	Кушебина Айгерим Казбековна

Институт	Физико-технический	Кафедра	Общая физика
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	Физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. *Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих*	*Стоимость сырья и материалов* *Размер окладов и выплат исполнителям проекта*
2. *Нормы и нормативы расходования ресурсов*	*Согласно проектной документации*
3. *Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования*	*Отчисления во внебюджетные фонды*
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. *Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения*	*Разработка анализа конкурентоспособности*
2. *Планирование и формирование бюджета научных исследований*	*Планирование работ; построение иерархической структуры ВКР*
3. *Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования*	*Оценка сравнительной и финансовой эффективности*
Перечень графического материала *(с точным указанием обязательных чертежей)***:**	
5.1 Оценка конкурентоспособности технических решений *5.2 Матрица SWOT* *5.3 Альтернативы проведения НИ* *5.4 График проведения и бюджет НИ* *5.5 Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ*	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Сечина А.А.	к.х.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Б21	Кушебина А.К.		

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, ресурсосбережение

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

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;

- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

5.1.1. SWOT-анализ

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

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

Таблица 13 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	**Слабые стороны научно-исследовательского проекта:**
	С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С4. Наличие бюджетного финансирования. С5. Квалифицированный персонал.	Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой Сл2. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ Сл3. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования Сл4. Недостаток финансовых средств Сл5. Слабая маркетинговая политика
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Повышение стоимости конкурентных разработок		
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2 Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства У3. Развитие альтернативных технологий и аналогов оборудования.		

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что

означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Интерактивная матрица проекта представлен в таблице 14.

Таблица 14 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		С1	С2	С3	С4	С5
	В1	0	-	+	+	-
	В2	+	-	+	+	+
	В3	+	-	+	+	+
Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		С1	С2	С3	С4	С5
	У1	-	-	-	+	+
	У2	+	0	+	+	+
	У3	-	-	-	+	-
	У4	+	-	+	+	+
	У5	+	-	+	+	+
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	
	В1	-	+	+	+	
	В2	-	+	-	-	
	В3	0	0	0	0	
Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	
	У1	-	-	-	+	
	У2	-	-	-	+	
	У3	-	-	-	+	
	У4	+	0	0	+	
	У5	0	0	0	0	

В рамках третьего этапа составлена итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 15 – Итоговая матрица SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	**Слабые стороны научно-исследовательского проекта:**
	С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С4. Наличие бюджетного финансирования. С5. Квалифицированный персонал.	Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой Сл2. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ Сл3. Большой срок поставок материалов и комплектующий, используемые при проведении научного исследования Сл4. Недостаток финансовых средств Сл5. Слабая маркетинговая политика
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Повышение стоимости конкурентных разработок	Использование инновационной инфраструктуры ТПУ Наличие бюджетного финансирования. Появление дополнительного спроса на новый продукт и повышение стоимости конкурентных разработок Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. Экологичность технологии. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.	Инфраструктура ТПУ позволяет снизить срок поставок, продолжительность стадий и повысить уровень проникновения на рынок. Снижение таможенных пошлин позволяет снизить срок поставок материалов
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства У3. Развитие альтернативных технологий и	Отсутствие спроса может привести к утечке квалифицированных кадров и прекращению бюджетного финансирования. Развитая конкуренция может не дать продукту удержаться на рынке. Ограничение на экспорт может способствовать уменьшению бюджетному финансированию. Введение дополнительных требований к сертификации	Отсутствие спроса, развитая конкуренция и ограничения на экспорт приведут к низкому уровню проникновения на рынок. Введение дополнительных требований к сертификации приводит в сочетании с отсутствием квалифицированных кадров значительно усложняет вывод продукции на рынок.

аналогов оборудования.	продукта и несвоевременное финансовое обеспечение влияет на экономичность и цену продукта.	

5.2. Планирование научно-исследовательских работ

5.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

-определение структуры работ в рамках научного исследования;

-определение участников каждой работы;

-установление продолжительности работ;

-построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Таблица 16 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Разработка ТЗ на ВКР	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Составление технического задания	Руководитель, студент
	3	Выбор направления исследований и способов решения задач	Руководитель, студент
	4	Сбор и изучение литературы	Студент
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Разработка методики экспериментальных исследований	Руководитель, студент
	6	Проведение экспериментальных исследований	Руководитель, студент
Обобщение и оценка результатов	7	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель, Студент
Проведение ОКР			
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	8	Составление и оформление	Студент
	9	Подготовка к защите	Руководитель, студент

5.2.2. Разработка графика проведения научного исследования

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от

множества трудно учитываемых факторов. Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости определяется следующей формулой:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{\min i}+2t_{\max i}}{5}, \quad (1)$$

где $t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i-ой работы, чел.-дн.; $t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i-ой работы, чел.-дн.

При известной ожидаемой трудоемкости работ можно вычислить продолжительность каждой работы в рабочих днях $T_р$, учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %. Продолжительность одной работы вычисляется по формуле:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (2)$$

где $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика длительность каждого из этапов работ из рабочих дней переводится в календарные дни. Для этого применяется следующая формула:

$$T_{кi} = T_{рi} \cdot k_к, \quad (3)$$

где $T_{кi}$ – продолжительность выполнения i-ой работы в календарных днях; $T_{рi}$ – продолжительность выполнения i-ой работы в рабочих днях; $k_к$ – коэффициент календарности, который определяется как

$$k_к = \frac{T_к}{T_к - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (4)$$

где $T_к$ – количество календарных дней в году; $T_{вых}$ – количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Пример расчета:

- Коэффициент календарности:

$$k_к = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1{,}4777 \sim 1{,}48$$

- Ожидаемое значение трудоемкости:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5} = \frac{3 \cdot 0{,}5 + 2 \cdot 1}{5} = 0{,}7 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

- Продолжительность работы в рабочих днях:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} = \frac{0{,}7}{1} = 0{,}7$$

- Продолжительность работы в календарных днях:

$$T_{кi} = T_{рi} \cdot k_к = 0{,}7 \cdot 1{,}48 = 1{,}036 \sim 1.$$

В таблице 17 представлены временные показатели проведения научного исследования, рассчитанные по данным формулам.

Таблица 17 – Временные показатели проведения научного исследования

Название Работы (Этапы)	**Трудоёмкость работ**			**Исполнители**	**Длит-ть работ в рабочих днях** T_{pi}	**Длит-ть работ в календарных днях** T_{ki}
	t_{min}, чел-дни	t_{max}, чел-дни	$t_{ожi}$, чел-дни			
Разработка ТЗ на ВКР	0,5	1	0,7	Руководитель	0,7	1
Составление технического задания	5	6	5,4	Руководитель, студент	2,7	4
Выбор направления исследования и способов решения задач	1	2	1,4	Руководитель, студент	0,7	1
Сбор и изучение литературы	14	23	17,6	Студент	17,6	26
Разработка методики экспериментальных исследований	2	4	2,8	Руководитель, Студент	1,4	2
Проведение экспериментальных исследований	25	30	27	Руководитель Студент	13,5	20
Анализ и обработка полученных результатов	7	13	9,4	Руководитель, студент	4,7	7
Составление и оформление	2,5	8	4,7	Студент	4,7	7
Подготовка к защите.	17	32	23	Руководитель, студент	11,5	17

На основании данных таблицы 17 строится календарный план-график (таблица 18).

Таблица 18 – Календарный план-график

Код рабоы (из ИСР)	Вид работ	Исполнители	T_{ki}, дн.	Продолжительность выполнения работ										
				март			апрель			май			июнь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Разработка ТЗ на ВКР	Руководитель	1											
2	Составление технического задания	Руководитель студент	4											
3	Выбор направления исследования и способов решения задач	Руководитель, студент	1											
4	Сбор и изучение литературы	Студент	26											
5	Разработка методики экспериментальных исследований	Руководитель, студент	2											
6	Проведение экспериментальных исследований	Руководитель студент	20											
7	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель, студент	7											
8	Составление и оформление	Студент	7											
9	Подготовка к защите.	Руководитель, студент	17											

- руководитель - студент

5.2.3. Бюджет научно-технического исследования

В процессе формирования бюджета научно-технического исследования используется следующая группировка затрат: затраты на материалы для исследований и оборудование; основная и дополнительная заработная плата исполнителей работы; отчисления во внебюджетные фонды

(страховые отчисления); затраты научные и производственные командировки; контрагентные и накладные расходы.

5.2.3.1. Расчет материальных затрат

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. Результаты по данной статье занесены в таблицу 19.

Таблица 19 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
1. Алюминиевый мишень (сверхчистый 99,99%)	62 $см^2$	2	1800	3600
3. Молибденовый тигель	76,9 $см^2$	1	12000	12000
4. Углеродный тигель	76,9 $см^2$	1	5500	5500
5. Стеклянные подложки	75х25 мм	14	50	700
Итого				**21800**

5.2.3.2. Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы

Основная заработная плата рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы: оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями; стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд и выполнение дополнительных обязанностей.

В раздел включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников непосредственно участвующих в выполнении работ. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы представлен в таблице.

Полная заработная плата включает в себя основную и дополнительную (12-20 % от $З_{осн}$):

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}. \quad (5)$$

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p, \quad (6)$$

где $З_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_м \cdot М}{F_д}, \quad (7)$$

где $З_м$ – месячный должностной оклад, руб.; М – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 48 раб. дней М = 10,4 месяца, 6-дневная неделя); $F_д$ – действительный годовой фонд рабочего времени (таблица 20).

Таблица 20 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Количество дней
Календарное число дней	365
Количество нерабочих дней	118
Отпуск	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	199

Месячный должностной оклад работника:

$$З_м = З_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_д) \cdot k_р, \quad (8)$$

где $З_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ – премиальный коэффициент (равен 0,3); $k_{д}$ – коэффициент доплат и надбавок (составляет примерно 0,2 – 0,5); $k_{р}$ – районный коэффициент (для Томска равен 1,3).

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн}, \quad (9)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Расчет основной и дополнительной заработной платы приведён в таблице 21.

Таблица 21 – Расчёт основной и дополнительной заработной платы

Исполнители	$З_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	$k_{д}$	$k_{р}$	$З_{м}$, руб.	$З_{дн}$, руб.	$T_{р}$, раб. дн.	$З_{осн}$, руб.	$З_{доп}$, руб.
Руководитель	14584,3	–	–	1,3	18959,59	990,85	35,2	34877,9	5231,7
Студент	6976	–	–	1,3	9068,8	473,95	56,8	26920,36	4038,1
Итого								61798,3	9269,8

Пример расчета:

- месячный должностной оклад работника:

$$З_{м} = 14584,3 \cdot 1 \cdot 1,3 = 18959,59 \text{ руб.};$$

- среднедневная заработная плата:

$$З_{дн} = \frac{18959,59 \cdot 10,4}{199} = 990,85 \text{ руб.};$$

$$З_{дн} = \frac{9068,8 \cdot 10,4}{199} = 473,95 \text{ руб}$$

- основная заработная плата:

$$З_{осн} = 990,85 \cdot 35,2 = 34877,9 \text{ руб.}$$

- дополнительная заработная плата:

$$З_{доп} = 0{,}15 \cdot 34877{,}9 = 5231{,}7 \text{ руб.}$$

5.2.3.3. Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$С_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) \quad (10)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

$$С_{внеб} = 0{,}3 \cdot (61798{,}3 + 9269{,}8) = 21320{,}4 \text{ руб.}$$

5.2.3.4. Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$С_{накл} = k_{накл} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) \quad (11)$$

где $k_{накл}$ – коэффициент накладных расходов, руб.

$$С_{накл} = 0{,}8 \cdot (61798{,}3 + 9269{,}8) = 56854{,}48 \text{ руб.}$$

5.2.3.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Затраты научно-исследовательского проекта представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Расчет бюджета затрат

Наименование	Сумма, руб.
Материальные затраты	21800
Затраты по основной заработной плате	61798,3
Затраты по дополнительной заработной плате	9269,8
Отчисления во внебюджетные фонды	21320,4
Накладные расходы	56854,48
Бюджет затрат	171042,98

5.3. Определение сравнительной эффективности исследования

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

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{ф}}^{p} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{ф}}^{p}$ - интегральный финансовый показатель разработки;

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

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

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

$$I_m^a = \sum_{i=1}^{n} a_i b_i^a \, , I_m^p = \sum_{i=1}^{n} a_i b_i^p \, , \quad (13)$$

где I_m - интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

a_i - весовой коэффициент i – го варианта параметра;

b_i^a, b_i^p - бальная оценка i-го варианта параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведено в таблице 23.

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Данный проект	Исп.1	Исп.2
Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	4	3
Соответствует требованиям потребителей	0,15	4	4	5
Энергосбережение	0,2	4	3	4
Надежность	0,2	5	4	4
Материалоемкость	0,2	4	5	5
Интегральный показатель ресурсоэффективности		4,5	4	4,1

В таблице 23 представлена сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта. За исполнение 1 принято привлечение к данной работе персонала из сторонних организаций, за исполнение 2 – использование ресурсов (спецоборудования и материалов) другого предприятия.

Пример расчета интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{\text{р}} = 0{,}25 \cdot 5 + 0{,}15 \cdot 4 + 0{,}2 \cdot 4 + 0{,}2 \cdot 5 + 0{,}2 \cdot 4 = 4{,}5.$$

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

$$I_{\text{исп}} = \frac{I_{\text{р}i}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп}i}}. \quad (14)$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

$$\text{Э}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{д.п.}}}{I_{\text{исп}}}. \quad (15)$$

В таблице 24 представлена сравнительная эффективность разработки.

Таблица 24 – Сравнительная эффективность

№	Показатели	Данный проект	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель	1	0,9	0,8
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	4,5	4	4
3	Интегральный показатель эффективности	4,5	4,5	4,7
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	–	1	1

Пример расчета:

- интегральный финансовый показатель:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{21161784{,}6}{21161520} \cong 1;$$

- интегральный показатель эффективности:

$$I_{\text{исп}} = \frac{4{,}45}{1} = 4{,}5.$$

- сравнительная эффективность вариантов исполнения:

$$\text{Э}_{\text{ср}} = \frac{4{,}5}{4}.$$

По данным таблицы можно сделать вывод, что данный работа является более эффективной, если сравнивать с аналоговыми работами.