

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

Школа: Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки: 16.04.01 «Техническая физика»
Отделение школы (НОЦ): Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| Тема работы |
|--|
| Исследование свойств медных покрытий, полученных с помощью магнетрона с жидкофазной мишенью |

УДК 621.793.1:669.3:621.385.64

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| ОДМ61 | Николаев Михаил Вячеславович | | |

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--|-------------------------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель НОЦ Б.П. Вейнберга | Юрьева Алена Викторовна | к.т.н. | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--|-----------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент отделения социально-гуманитарных наук | Меньшикова Екатерина Валентиновна | к.ф.н. | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---|----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Ассистент отделения ядерно-топливного цикла | Гоголева Татьяна Сергеевна | к.ф.-м.н. | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|-----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Руководитель НОЦ | Кривобоков Валерий Павлович | д.ф.-м.н, профессор | | |

Томск – 2018 г.

**Результаты обучения магистров
направления 16.04.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

| Код результата | Результат обучения (выпускник должен быть готов) | Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон |
|-------------------------------------|---|---|
| <i>Профессиональные компетенции</i> | | |
| Р1 | Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий. | Требования ФГОС (ОПК-2). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| Р2 | Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий | Требования ФГОС (ОПК-1). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| Р3 | Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучково-плазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты | Требования ФГОС (ОПК-5, ПК-5, ПК- 8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| Р4 | Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучково-плазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств. | Требования ФГОС (ПК-6, 7). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| Р5 | Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учетом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ. | Требования ФГОС (ПК-12,13,14). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| Р6 | Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии. | Требования ФГОС (ПК-15, 16). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| Р7 | Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу | Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов |

| Код результата | Результат обучения (выпускник должен быть готов) | Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон |
|---|--|--|
| | обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии | EUR-ACE и FEANI |
| P8 | Заниматься организационно-управленческой деятельностью, владеть приемами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий. | Требования ФГОС (ПК-17, 18, 19). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| P9 | Осуществлять научно-инновационную деятельность, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучково-плазменных технологий, внедрять новые наукоемкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов. | Требования ФГОС (ПК-1, 2, 3, 4). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| <i>Универсальные компетенции</i> | | |
| P10 | Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять свое научное мировоззрение. | Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| P11 | Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения | Требования ФГОС (ОК-3, ОПК - 4). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |
| P12 | Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач. | Требования ФГОС (ОК-4, 5, ОПК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI |

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

Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки (специальность): 16.04.01 «Техническая физика»
Отделение школы (НОЦ): Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Кривобоков В.П.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

| |
|--------------------------|
| Магистерской диссертации |
|--------------------------|

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|---------------------------------|
| ОДМ61 | Николаеву Михаилу Вячеславовичу |

Тема работы:

| | |
|---|--|
| Исследование свойств медных покрытий, полученных с помощью магнетрона с жидкофазной мишенью | |
| Утверждена приказом директора (дата, номер) | |

Срок сдачи студентом выполненной работы:

| | |
|--|--|
| | |
|--|--|

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|--|---|
| Исходные данные к работе | <ol style="list-style-type: none">1. Магнетронная распылительная система с жидкофазной мишенью.2. Молибденовый тигель.3. Экспериментальное оборудование: КВО, блок электрического смещения, блок предварительного нагрева подложек. |
| Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (| <ol style="list-style-type: none">1. Аналитический обзор литературных источников с целью выяснения неисследованных параметров системы.2. Постановка цели и задач научного исследования.3. Исследование влияния режимов работы системы на свойства получаемых медных |

| | |
|--|---|
| | <p>покрытий.</p> <p>4. Обсуждение результатов проведенных исследований.</p> <p>5. Заключение по проделанной работе.</p> |
| <p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p> | <p>Актуальность.</p> <p>Зависимость свойств от температуры подложки.</p> <p>Цель.</p> <p>Оборудование.</p> <p>Режимы работы.</p> <p>Рентгено-структурный анализ.</p> <p>Измерение шероховатости.</p> <p>Сканирующая электронная микроскопия.</p> <p>Сопротивление пленок.</p> <p>Адгезия покрытий.</p> <p>Заключение.</p> <p>Список публикаций.</p> |
| <p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> | |
| <p>Раздел</p> | <p>Консультант</p> |
| <p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p> | <p>Доцент отделения социально-гуманитарных наук ШБИП, к.ф.н., Меньшикова Екатерина Валентиновна</p> |
| <p>Социальная ответственность</p> | <p>Ассистент отделения ядерно-топливного цикла ИЯТШ, к.ф.м.н., Гоголева Татьяна Сергеевна</p> |
| <p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p> | |
| <p>Экспериментальное оборудование и методика измерений.</p> | |

| | |
|--|--|
| <p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p> | |
|--|--|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---|------------------------------------|------------------------|---------|------|
| <p>Старший преподаватель НОЦ Б.П. Вейнберга</p> | <p>Юрьева Алена Викторовна</p> | <p>к.т.н.</p> | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------------|-------------------------------------|---------|------|
| <p>ОДМ61</p> | <p>Николаев Михаил Вячеславович</p> | | |

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

Студенту:

| | |
|---------------|---------------------------------|
| Группа | ФИО |
| ОДМ61 | Николаеву Михаилу Вячеславовичу |

| | | | |
|----------------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Школа | ИЯТШ | НОЦ | Б.П. Вейнберга |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | 16.04.01 «Техническая физика» |

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

| | |
|---|--|
| <i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> | Стоимость сырья и материалов Размер окладов и выплат исполнителям проекта |
| <i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i> | Согласно проектной документации |
| <i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i> | Отчисления во внебюджетные фонды |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке

| | |
|--|--|
| <i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i> | Разработка анализа конкурентоспособности |
| <i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i> | Планирование работ; построение иерархической структуры ВКР |
| <i>3. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i> | График проведения ВКР – диаграмма Ганта |

Перечень графического материала

| |
|--|
| <i>1. Оценка конкурентоспособности технических решений</i> |
| <i>2. Матрица SWOT</i> |
| <i>3. График проведения и бюджет НИИ</i> |

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

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|--|-----------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Доцент отделения социально – гуманитарных наук | Меньшикова Екатерина Валентиновна | к.ф.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|------------------------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| ОДМ61 | Николаев Михаил Вячеславович | | |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

| | |
|---------------|---------------------------------|
| Группа | ФИО |
| ОДМ61 | Николаеву Михаилу Вячеславовичу |

| | | | |
|---------------------|--------------|---------------------------|----------------------------------|
| Школа | ИЯТШ | НОЦ | Б.П. Вейнберга |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | 16.04.01 «Техническая физика» |

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

| | |
|---|---|
| 1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения: | <ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитные поля, ионизирующее излучение; – опасных проявлений факторов производственной среды: электрической, пожарной и взрывной природы. |
| 2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме. | <ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность, пожаробезопасность, требования охраны труда при работе на ПВМ, требования безопасности при работе на установке КВО. |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|--|---|
| 1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: | <ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты коллективной защиты, индивидуальной защитны. |
| 2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности: | <ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия); – механические опасности; – термические опасности. |

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

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|--|----------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Ассистент отделения ядерно – топливного цикла ИЯТШ | Гоголева Татьяна Сергеевна | к.ф.-м.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|------------------------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| ОДМ61 | Николаев Михаил Вячеславович | | |

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 97 с., 25 рисунков, 19 таблиц, 46 источников литературы, 1 приложение.

Ключевые слова: жидкофазная магнетронная распылительная система, скорость осаждения, электропроводящие покрытия, структурные свойства, медные покрытия.

Объектом исследования является ЖМРС и влияние условий осаждения на свойства медных покрытий. Для этого система работала в режиме осаждения с аргоном и в режиме «самораспыления». Изучалось влияние электрического смещения на подложку и предварительного нагрева подложек.

Цель работы – получить данные о влиянии режимов работы жидкофазной магнетронной распылительной системы (ЖМРС) на свойства медных покрытий.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования структуры, шероховатости, электрического сопротивления и поверхности покрытий, полученных при разных условиях осаждения

Основные результаты:

Осаждение медных покрытий из жидкой фазы с помощью МРС с испаряемой мишенью позволяет получить высокие скорости осаждения, низкое удельное электрическое сопротивление и хорошую адгезию пленок с подложкой по сравнению с осаждением из твердофазной МРС.

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение | 11 |
| 1. Механизмы формирования тонких пленок..... | 13 |
| 1.1 Процессы на поверхности подложки | 13 |
| 1.2 Адсорбция падающих НЧ..... | 15 |
| 1.3 Зародышеобразование..... | 16 |
| 1.4 Механизмы роста и микроструктура пленок..... | 21 |
| 2. Способы получения тонкопленочных покрытий | 28 |
| 2.1 Термическое испарение в вакууме | 28 |
| 2.2 Магнетронное распыление | 30 |
| 2.3 Магнетронная распылительная система с жидкофазной мишенью | 32 |
| 3. Экспериментальное оборудование и методика измерений | 34 |
| 3.1 Схема экспериментальной установки | 34 |
| 3.2 Измерение шероховатости и толщины покрытий | 37 |
| 3.3 Исследование адгезионной прочности покрытий | 40 |
| 3.4 Измерение электрического сопротивления покрытий | 41 |
| 3.5 Изучение структуры поверхности пленок | 42 |
| 3.6 Рентгено-структурный анализ | 44 |
| 4. Результаты работы и их обсуждение | 45 |
| 4.1 Рентгено-структурный анализ | 47 |
| 4.2 Шероховатость покрытий..... | 50 |
| 4.3 Структура покрытий | 53 |
| 4.4 Сопротивление покрытий..... | 54 |
| 4.5 Адгезия покрытий | 55 |
| 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..... | 57 |

| | |
|--|----|
| 5.1. Предпроектный анализ | 57 |
| 5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования | 57 |
| 5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | 57 |
| 5.1.3. SWOT-анализ..... | 59 |
| 5.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации | 60 |
| 5.2. Инициация проекта | 62 |
| 5.3. План проекта | 64 |
| 5.4 Бюджет научного исследования..... | 64 |
| 6. Социальная ответственность | 70 |
| 6.1. Анализ вредных производственных факторов. | 70 |
| 6.2. Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на установке КВО и ПВМ..... | 72 |
| 6.2.1. Организационные мероприятия | 72 |
| 6.2.2. Требования к ПЭВМ и организация работы. | 72 |
| 6.2.3. Условия безопасной работы | 75 |
| 6.3. Электробезопасность | 77 |
| 6.4. Пожарная безопасность | 78 |
| 6.5 Правила безопасной работы на установке КВО | 80 |
| Заключение..... | 83 |
| Список литературы | 84 |
| Приложение А | 88 |

Введение

Технологии получения тонких пленок в настоящее время используются во многих областях науки и техники: в электронике наносятся проводящие покрытия для металлизации интегральных схем, в оптике применяются поглощающие, отражающие и фильтрующие покрытия, в машиностроении распространились износостойкие и защитные пленки, кроме того, возможно использование для декоративных целей и получение теплосберегающих покрытий.

Медные покрытия являются одним из самых распространенных материалов, используемых в качестве проводящих слоев микросхем и силовых элементов.

Долгое время металлические покрытия осаждались методом термического испарения в вакууме [1], пока в 70-х годах прошлого века не было изобретено магнетронное распыление [2]. Преимущество данного метода перед предшественниками заключается в хорошей адгезии покрытия к подложке, возможности нанесения при температурах вплоть до комнатных и хорошей управляемости процесса. Однако, магнетронное распыление уступает термическому испарению в скорости осаждения покрытий, что является проблемой при желаемой толщине покрытия более 1 мкм. Объединение положительных сторон двух технологий реализовано в жидкофазной магнетронной распылительной системой (ЖМРС) [3].

Данная система работает за счет тепловой изоляции мишени от охлаждаемой магнитной системы. Таким образом энергия от налетающих ионов не уходит с охлаждающей жидкостью, мишень плавится и активизируется процесс испарения. В таком случае поток осажденных частиц состоит из распыленных и испаренных атомов. Преимуществом ЖМРС перед другими методами осаждения является высокая скорость осаждения (сравнимая с термическим испарением) [4], пониженное рабочее давление, тепловой поток

на подложку за счет нагрева мишени, что возможно позволит получать пленки с улучшенными свойствами. Но до конца не изучено влияние различного рода воздействий на растущую пленку при таком интенсивном потоке вещества и энергии.

В качестве воздействующих факторов рассматривается предварительный нагрев подложки, который может привести к увеличению размера зерна тонкой пленки; электрическое смещение на подложку, добавляющее в поток распыленных и испаренных атомов ускоренные ионы с большей энергией; мощность разряда, которая определяет поток тепла и вещества к подложке. Таким образом, целью работы является получение данных о зависимости свойств медных покрытий, полученных с помощью МРС с жидкофазной мишенью, от режимов осаждения.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- провести литературный обзор по механизмам роста металлических покрытий;
- получить медные покрытия с помощью ЖМРС при разной мощности, подаче электрического смещения на подложку и предварительном нагреве подложек;
- исследовать адгезию, шероховатость, сопротивление, размеры зерна и структуру поверхности;
- выявить закономерности влияния режимов осаждения на свойства медных покрытий.

1. Механизмы формирования тонких пленок

Изучение тонких пленок представляет большой интерес с научной точки зрения. В тонких пленках возможны эффекты, отсутствующие у массивных материалов. Очевидно, что переход от трехмерных к квазидвумерным системам должен сопровождаться значительными изменениями физических и химических свойств материала, таких как электропроводность, химическая активность, значения термодинамических параметров. Микроструктура пленки может существенно отличаться от структуры объемного материала такого же состава, а свойства тонких пленок в значительной степени определяются их морфологией. Структурные дефекты в массивных материалах, не оказывающие существенного влияния на свойства, в тонких пленках могут кардинально влиять на их поведение. Шероховатость поверхности практически не влияет на характеристики массивных материалов, в то время как для пленочных материалов она может являться фактором, определяющим многие параметры. Поэтому при исследовании тонкопленочных материалов возможно открытие новых явлений и закономерностей, которые могут стать основой создания принципиально новых технологий и устройств [5].

1.1 Процессы на поверхности подложки

Во всех теориях зародышеобразования первым этапом считается столкновение атомов или молекул пара с подложкой. В результате столкновения частицы пара могут адсорбироваться и прочно закрепиться на подложке, могут через конечный промежуток времени после адсорбции снова испариться, а могут и мгновенно упруго отразиться от подложки. В общем случае незаряженные нейтральные частицы (НЧ) пара падают на поверхность с энергиями, значительно большими kT , где T – температура подложки. Поэтому возникает вопрос, сможет ли такая частица, например атом пара достаточно быстро прийти в равновесие с подложкой так, чтобы смогла

произойти его адсорбция, или он отразится от подложки, не отдав ей при этом всей своей энергии. Мак-Фи [6] и Леннард-Джонс [7] показали, что время, необходимое для того, чтобы падающий атом потерял свою избыточную кинетическую энергию и закрепился на подложке, порядка $2/\nu$, где ν частота колебаний решетки в подложке. Таким образом, атом, столкнувшись с подложкой, за несколько колебаний решетки теряет почти всю свою избыточную энергию. Поэтому будем в дальнейшем полагать, что установление равновесия происходит мгновенно.

Упругое отражение без изменения кинетической энергии НЧ наблюдается при энергии падающих частиц от 0,03 до 0,5 эВ. Коэффициент отражения зависит от сорта налетающих атомов и подложки. В случае многоатомных НЧ возможен обмен энергией с подложкой, когда кинетическая энергия НЧ при отражении не меняется, но колебательная и вращательная энергия может передаваться подложке.

Неупругое отражение с поверхностной ионизацией возможно для нагретых поверхностей. Например, соединения KF, KBr, KCl отдают электрон подложке с вероятностью 0,25. Возможен и захват электрона налетающей частицей, например для F, Br, Cl, O, NO, O₂.

Неупругое отражение с поверхностным тушением случается, когда падающая НЧ находится в возбужденном состоянии. При таком отражении, вероятнее всего, она попадает в основное состояние, энергию передает поверхности.

Эмиссия электронов возможна по кинетическому и потенциальному принципу. Потенциальная эмиссия происходит при условии запаса внутренней энергии НЧ, причем запас превышает работу выхода электрона с поверхности. При сближении на расстояние 0,2-0,3 нм происходит полевая эмиссия электрона с вероятностью до 0,05. Кинетическая эмиссия происходит, если энергия НЧ выше 500 эВ, механизм сводится к ударной ионизации поверхности с вероятностью от 0,001 до 0,05.

Физическое распыление поверхности возможно при энергиях выше энергий связи атомов подложки или поверхностных атомов, обычно не ниже 15-30 эВ, вероятность выбивания до 0,001. Оно может сопровождаться внедрением падающего атома в поверхностные слои подложки.

Десорбция слабосвязанных инородных частиц схожа с физическим распылением, отличается только пороговая энергия, которая составляет 0,01 - 0,5 эВ.

1.2 Адсорбция падающих НЧ

При сближении падающей частицы с поверхностью на расстояние около 1 нм возникают силы взаимодействия.

Физической адсорбцией называют результат Ван-дер-Ваальсовского взаимодействия, при которой деформируются внешние электронные оболочки атомов и энергия связи составляет 0,01 – 0,3 эВ. Сила проявляется на расстоянии не более 1 нм.

Слабая хемосорбция представляет собой связывание подложки и налетающей частицы при перекрытии электронных оболочек атомов на расстоянии 0,3 – 0,1 нм. Образуется химическая ковалентная связь с энергией до 1 эВ. Если материал падающей частицы и поверхности совпадает, энергия связи может достигнуть 30 эВ.

Адсорбция под действием кулоновских сил является самой сильной, с энергией связи порядка единиц эВ. Гетерополярные силы возникают при сближении на 0,1 нм и передаче электрона от падающей частицы. Так образуется слой ионов на поверхности, индуцирующий в материале подложки заряд обратного знака, притягивающий ионы.

Адсорбция как процесс характеризуется снижением свободной энергии поверхности, уменьшением энтропии из-за потери степеней свободы падающей частицы, что в итоге приводит к выделению тепла (разогреву) подложки.

После попадания атомов на поверхность при достаточном запасе энергии они начинают движение, называемое миграцией. Миграция более присуща физически адсорбированным частицам из-за слабой связи с подложкой. В процессе миграции атом может соединиться с другим мигрирующим атомом, либо десорбироваться с подложки [8].

1.3 Зародышеобразование

Зародыш – скопление адатомов. Зародышеобразование – процесс формирования скоплений адатомов до уровня формирования критического зародыша. Критический зародыш – зародыш критического размера, после достижения которого рост зародыша становится необратимым, т.е. невозможен его распад на отдельные адатомы или кластеры. Такой зародыш преодолевает барьер зародышеобразования – потенциальный энергетический барьер роста зародыша, после преодоления которого рост зародыша становится устойчивым. Кластер – система из большого числа слабо связанных атомов или молекул.

На рисунке 1.1 представлена зависимость свободной энергии Гиббса от размера для зародышей при разной температуре.

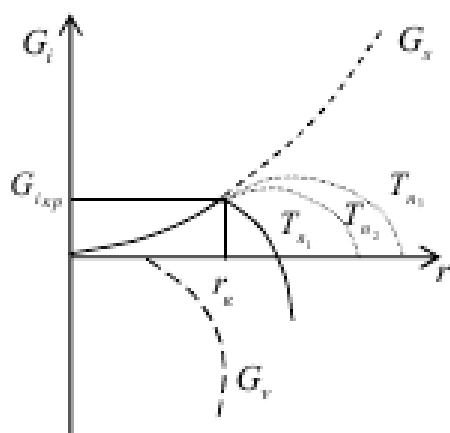


Рисунок 1.1 – Зависимость изменения свободной энергии образования зародышей от их радиуса.

В процессе роста зародышей происходит захват окружающих их адатомов с результирующим обеднением адатомами зон захвата вокруг

зародышей. К тому же разросшиеся зародыши соприкасаются друг с другом и срастаются с образованием островка, занимающего площадь меньше, чем сумма площадей двух начальных зародышей, что приводит к увеличению свободной поверхности подложки.

Для некоторых материалов скопление из двух адатомов уже считается зародышем. При наличии 10 – 100 адатомов начинает формироваться кристаллическая решетка материала.

У тугоплавких металлов (V, W, Mo, Ta) устойчивые зародыши могут быть очень маленькими (вплоть до двух атомов). Следовательно, при осаждении таких металлов возникает большое количество зародышей и формируется мелкозернистая пленка.

Для более легкоплавких металлов (Cd, Mg, Zn) устойчивы более крупные зародыши. Следовательно, образуется более крупнозернистая пленка.

Кроме того, при осаждении пленок существует температура, выше которой невозможно зародышеобразование, и она называется критической температурой конденсации атомов на подложке.

Процессы зародышеобразования и роста зародышей описывают две модели – капиллярная и атомная. По первой модели постулируется следующее: для того, чтобы из пересыщенного пара образовывались зародыши конденсированной фазы, необходимы положительные флуктуации свободной энергии, приводящие к преодолению барьера зародышеобразования и к формированию критического зародыша. Эта модель позволяет вычислить размеры и свободную энергию критического зародыша и скорость зародышеобразования.

По атомной модели рассчитывается энергия связи объединения двух и более адатомов, рассматривается только их дискретное расположение и дискретное изменение размеров зародыша и его свободной энергии [9].

Критические зародыши по мере поступления адатомов разрастаются до размеров, при которых они могут соединиться друг с другом. После срастания они образуют островок. Островок может мигрировать по подложке. Миграция –

это перемещение островков по подложке, как единого целого. Вследствие роста или миграции осуществляется физическое контактирование островков между собой. Дальнейшее формообразование зависит от температуры подложки и от сил, возникающих на границе зародыш – подложка. Если взаимодействие между островками сильнее, чем между островком и подложкой, а температура подложки достаточно высока, то имеет место коалесценция, т.е. под действием сил поверхностного натяжения происходит слияние островков, утрачивается их исходная форма и образуется единый островок более равновесной конфигурации. Если температура подложки низка, то происходит коагуляция – слипание островков. При этом, в отличие от коалесценции, изменение исходной формы происходит незначительно и ограничивается областью соприкосновения. Схематично коалесценция изображена на рисунке 1.2.

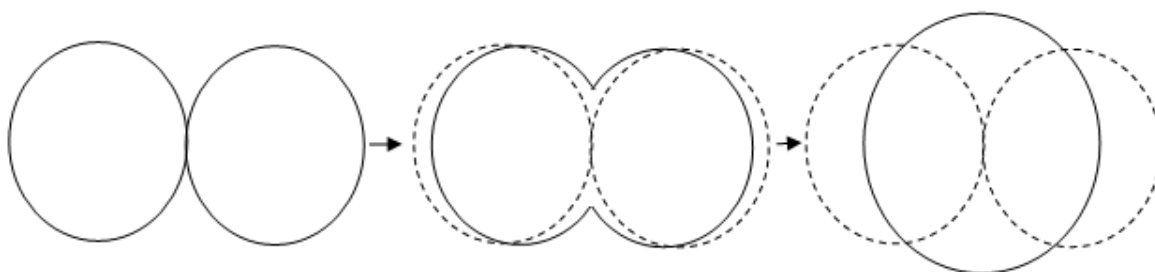


Рисунок 1.2 – Схема изменения формы островков в процессе их коалесценции.

Во время коалесценции или коагуляции уменьшается площадь, занимаемая зародышами на подложке. Причем мелкие зародыши коалесцируют даже в том случае, когда не соприкасаются друг с другом. По мере освобождения поверхности подложки на освободившихся участках появляются новые зародыши, которые сливаются с более крупными.

В случае если рост пленки прекращается на стадии образования островков, то формируется островковая пленка. Такой тип пленок необходим для изготовления специальных пленочных резисторов.

Коалесценция обычно проходит с уменьшением суммарной площади исходных островков, но с увеличением их высоты. До соединения островки

часто имеют кристаллическую огранку, во время срастания огранка становится более сглаженной, а после появления общего островка огранка восстанавливает свою форму.

Движущей силой процесса коалесценции является уменьшение поверхностной энергии. Поэтому результирующий островок приобретает предпочтительную кристаллографическую ориентацию [10].

В дальнейшем, при продолжении осаждения атомов или молекул вещества на подложку, островки приобретают вытянутую форму, и иногда сетчатая структура формируется из них. В узлах этой сетчатой структуры располагаются островки, а между ними располагаются длинные узкие каналы шириной 50 – 200 Ангстрем. Хотя каналы обеднены адатомами, в них все равно происходит возникновение новых зародышей и затем срастание их с островками.

В других случаях при росте пленки сразу возникает структура, состоящая из сросшихся островков с каналами между ними. В каналы попадают адатомы и образуются зародыши, которые, срастаясь друг с другом, формируют мостики через каналы. Хотя такие каналы обычно бывают нерегулярными, граничные области островков обладают кристаллической огранкой. Таким образом, поверхность подложки постепенно заполняется пленкой, но в ней еще присутствуют дырки. Процессы исчезновения каналов и дырок являются проявлением минимизации полной поверхностной энергии растущей пленки посредством ликвидации областей с высокой кривизной поверхности. Когда заполняются атомами дырки, формируется сплошная пленка. Этот процесс отражен на рисунке 1.3.

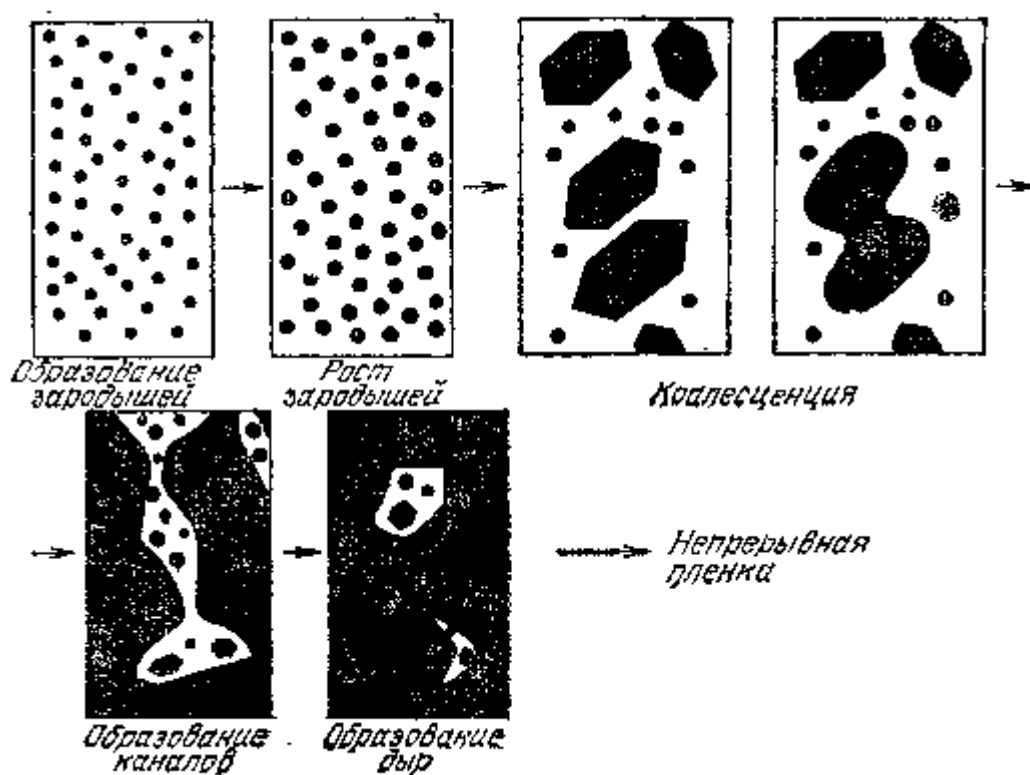


Рисунок 1.3 – Процесс формирования сплошной пленки.

Как уже говорилось выше, если не происходит коалесценция островков растущей пленки, то между островками формируются границы и образуется поликристаллическая пленка. Между зернами присутствуют другие фазы, аморфный материал, дефекты. Если островки, из которых формируются кристаллики пленки, малы (от 1 до нескольких десятков нанометров), то формируется нанокристаллическая пленка. Чаще всего островки срастаются друг с другом при рекристаллизации, так что размер зерен в готовой пленке много больше первоначального размера островков. Рекристаллизация – процесс образования и роста зерен поликристаллической пленки за счет других зерен той же фазы. Процессы рекристаллизации стимулируются повышением температуры пленки во время ее напыления или отжига, при пластической деформации образца. Скорость рекристаллизации экспоненциально возрастает с температурой. При рекристаллизации уменьшается количество структурных дефектов. В итоге вырастает поликристаллическая пленка с более крупными зернами по сравнению с их первоначальным видом [8].

1.4 Механизмы роста и микроструктура пленок

Одним из основных вопросов изучения тонких пленок является установление взаимосвязи между микроструктурой, элементным составом и физическими свойствами пленок. Поэтому исследование закономерностей роста пленок и формирования их микроструктуры имеет большое значение.

Известно, что пленки могут быть аморфными, монокристаллическими и поликристаллическими. Для аморфных пленок характерно отсутствие дальнего порядка в расположении атомов, присущего кристаллическому состоянию. Монокристаллические пленки образуются при эпитаксии, эпитаксиальная пленка воспроизводит кристаллическую структуру подложки. Поликристаллические пленки демонстрируют наибольшее разнообразие микроструктуры, которая характеризуется размером и кристаллографической ориентацией кристаллитов (зерен). Кристаллические решетки соседних зерен разориентированы между собой, что обуславливает наличие границ между ними. Размер зерен в поликристаллической пленке может изменяться, например, при термообработке и механических деформациях часто наблюдается рост зерен. Этот процесс приводит к изменению микроструктуры пленки и значительно влияет на механические и другие свойства пленки.

Выделяют три основных механизма роста пленок [11, 12]:

- островковый, или механизм Вольмера – Вебера;
- послойный, или механизм Франка – Ван-дер-Мерве;
- смешанный, или механизм Странского – Крастанова.

Островковый механизм роста пленок реализуется на атомно-гладких поверхностях, таких как плотноупакованные грани монокристаллов с малыми индексами Миллера. Островковый рост пленок осуществляется при условии, что атомы пленки сильнее связаны между собой, чем с подложкой. Рост пленок начинается с адсорбции частиц из газовой или жидкой фазы на поверхности подложки. Адсорбированные атомы в результате диффузии сталкиваются и

образуют кластеры. Метастабильные кластеры образуют так называемые критические зародыши. За счет адсорбции поступающих атомов идет процесс роста зародышей с образованием островков. Островки укрупняются, большие островки сливаются (коалесцируют), постепенно образуется непрерывная островковая сетка. Пустоты в сетке постепенно заполняются в результате вторичного зародышеобразования, адсорбции и диффузии поступающих атомов; таким образом формируется сплошная пленка. Атомная гладкость поверхности подложки облегчает поверхностную диффузию адсорбированных атомов, кластеров и островков. На кинетику процессов адсорбции-десорбции, диффузии, и, следовательно, роста пленки, большое влияние оказывает температура подложки. Закономерности островкового роста пленок рассмотрены в работе [13].

При послойном росте по механизму Франка – Ван-дер-Мерве атомы пленки сильнее связаны с подложкой, чем друг с другом. Послойный рост пленок реализуется на поверхностях с регулярным нанорельефом, например, на гранях монокристалла с большими индексами Миллера. Эти грани представляют собой совокупность ступеней, образованных выходящими на поверхность краями атомных плоскостей с малыми индексами Миллера. Поступающие атомы адсорбируются на поверхности и закрепляются на регулярно расположенных наношероховатостях рельефа. Атомно-шероховатая поверхность подложки одновременно по всей площади застраивается атомами с образованием монослоя осаждаемого материала, затем осаждается второй монослой и так далее. Каждый следующий монослой слабее связан с подложкой, чем предыдущий.

После осаждения некоторого количества монослоев энергетически более выгодным может стать рост островков. Смешанный механизм роста пленок, или механизм Странского – Крастанова, реализуется при значительном рассогласовании параметров решетки подложки и осаждаемого материала. При послойном осаждении монослоев в них возникают деформации сжатия или растяжения. Энергия упругой деформации возрастает с увеличением числа

слоев, и когда она становится равной поверхностной энергии, послойный рост пленки меняется на островковый.

В зависимости от условий осаждения, шероховатости подложки, степени рассогласования структур подложки и пленки, а также многих других факторов, формируются монокристаллические (эпитаксиальные) или поликристаллические пленки. Очевидно, что послойный рост приводит к образованию монокристаллической пленки. Однако и при островковом росте, если отдельные растущие зерна имеют одинаковую кристаллографическую ориентацию, образуется единое монокристаллическое покрытие.

Поликристаллические пленки растут по островковому или смешанному механизмам. Микроструктура поликристаллических пленок определяется размером, формой и ориентацией зерен, а также различными микродефектами, такими как поры, трещины. Микроструктура пленок оказывает большое влияние на их свойства. В зависимости от типа межзеренных границ, их состава, который может значительно отличаться от состава в объеме зерна, и, как следствие, типа и концентрации носителей заряда в поликристаллических пленках, их свойства могут отличаться очень значительно. С одной стороны, это серьезно осложняет получение поликристаллических плёнок с воспроизводимыми свойствами и требует жесткого соблюдения технологических условий осаждения и синтеза пленок. С другой стороны, на основе поликристаллических пленок возможно получать структуры с разнообразными свойствами путем контролируемого изменения их морфологии.

Понимание закономерностей эволюции микроструктуры поликристаллических пленок имеет большое значение для получения пленок с заданными свойствами. Формирование зернистой микроструктуры начинается уже при осаждении пленки и продолжается при ее термической обработке. Эволюция микроструктуры заключается не только в росте кристаллитов в пленке, но и в изменении кристаллографической ориентации зерен.

Рост зерен обычно происходит посредством миграции границ зерен и их слияния. Эти процессы приводят к увеличению среднего размера зерен и уменьшению числа зерен в поликристалле. Рост зерен посредством миграции и слияния границ зерен рассматривается как основной механизм роста зерен в крупнозернистых поликристаллах. Однако возможен альтернативный механизм, связанный с поворотами кристаллической решетки в зернах, приводящий к исчезновению границ зерен и слиянию соседних зерен. Хотя этот альтернативный механизм не работает эффективно в крупнозернистых поликристаллах, он способен внести существенный вклад в рост зерен в тонких пленках, в которых условия для протекания процессов поворота кристаллической решетки существенно «мягче» по сравнению с таковыми в обычных поликристаллах.

Условия осаждения пленки оказывают существенное влияние на ее микроструктуру. Важным параметром является фактор T_s/T_m , равный отношению температуры осаждения, или температуры подложки T_s , к температуре плавления материала пленки T_m [14, 15]. На основании многочисленных экспериментов и анализа морфологии однокомпонентных пленок, осаждаемых вакуумными методами, была построена модель формирования структуры пленки в зависимости от температуры осаждения. В рамках модели разделяют низкотемпературную (зона 1), высокотемпературную (зона 2) и промежуточную зоны (зона Т), как проиллюстрировано на рисунках 1.4, 1.5. При низких температурах ($T_s/T_m < 0.3$) поверхностная диффузия адсорбирующихся атомов практически отсутствует, в результате образуется множество зародышей со случайной ориентацией, которые растут равноосно (во всех направлениях) до смыкания друг с другом, а после смыкания протекает анизотропный рост, в результате чего формируются пленки с пористой столбчатой микроструктурой. Столбцы обычно представляют собой не единое зерно, а множество сросшихся зерен с одинаковой ориентацией, либо являются аморфными.

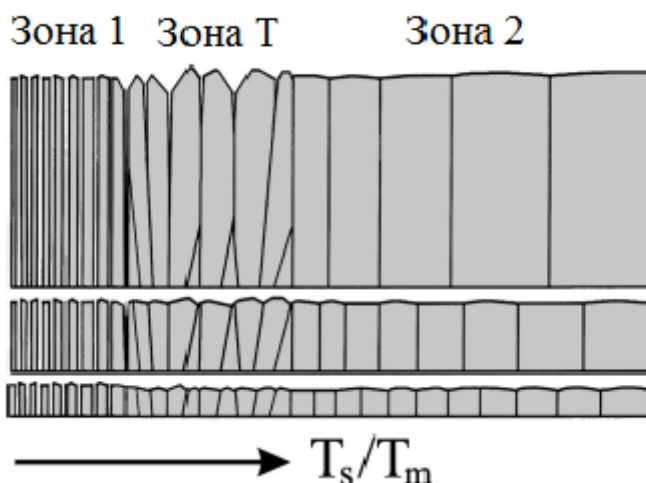


Рисунок 1.4 – Диаграмма эволюции микроструктуры пленки в зависимости от соотношения T_s/T_m и толщины пленки.

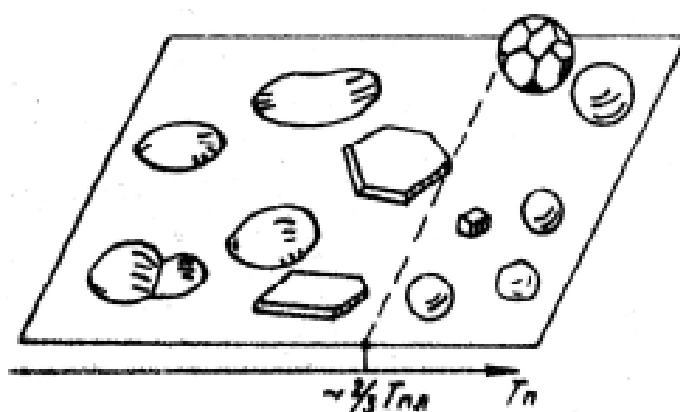


Рисунок 1.5 – Схема изменения форм роста частиц конденсатов легкоплавких металлов при повышении температуры подложки.

При более высоких температурах ($0.3 < T_s/T_m < 0.5$) отдельные зародыши-островки вследствие диффузии сливаются в более крупные, далее протекает их независимый рост. В результате образуются кристаллиты большего диаметра, чем в низкотемпературной области, со случайной ориентацией или со слабо выраженной текстурой. С увеличением толщины пленки наблюдается тенденция к развитию текстуры в результате преимущественного роста кристаллитов с определенной ориентацией. Пленки имеют развитую столбчатую микроструктуру с относительно небольшим количеством пор вдоль границ зерен. На поверхности зерна имеют огранку, поэтому в этой области шероховатость пленки сравнительно высокая.

В высокотемпературной области ($T_s/T_m > 0.5$) становится существенной объемная диффузия. Миграция границ зерен протекает как на стадии слияния отдельных островков на начальном этапе роста пленки, так и на протяжении всего процесса осаждения. Преимущественная ориентация роста зерен наблюдается уже на стадии слияния островков. Пленки, осажденные при высоких температурах, имеют плотную зернистую столбчатую структуру, диаметр зерна увеличивается с ростом температуры.

С помощью термообработки возможно модифицировать микроструктуру пленки, сформировавшуюся в процессе осаждения. Так, пленка Si, выращенная методом CVD на горячей подложке ($T_s/T_m > 0.5$), обладает столбчатой микроструктурой, в то время как пленка, осажденная на холодную подложку, изначально аморфная, в процессе термообработки кристаллизуется с образованием равноосной зернистой структуры, в которой зерно имеет приблизительно одинаковые размеры во всех направлениях (рисунок 1.6) [16].

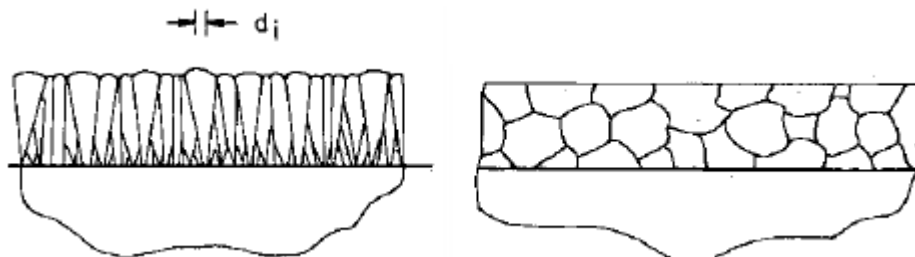


Рисунок 1.6 – Микроструктура пленки Si, осажденной методом CVD на горячую подложку (слева) и на холодную подложку с последующей термообработкой (справа).

Пленка электролита YSZ, осажденная методом импульсного лазерного испарения на холодную подложку из монокристаллического сапфира, изначально была аморфной [17]. При нагревании до температуры $\geq 250^\circ\text{C}$ в аморфной пленке зарождались кристаллиты, и в результате их равноосного роста пленка превращалась в крупнокристаллическую со средним размером зерна, равным толщине пленки.

При осаждении на подложку, нагретую до температуры $\geq 400^\circ\text{C}$, что соответствует низкотемпературной зоне в модели, формировалась пленка с

наностолбчатой структурой (рисунок 1.7).

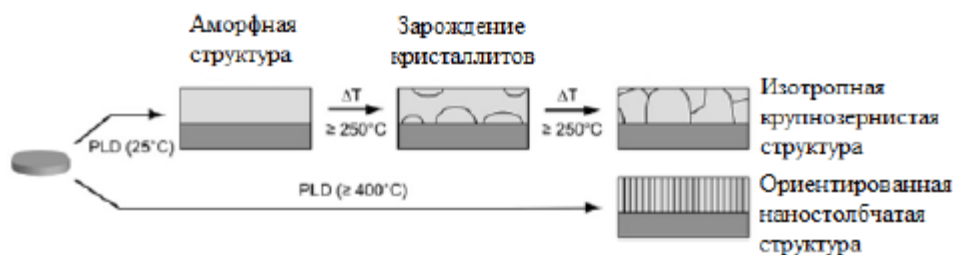


Рисунок 1.7 – Микроструктура пленки YSZ, осажденной методом импульсного лазерного испарения на холодную (25°C) и нагретую ($\geq 400^\circ\text{C}$) подложку из монокристаллического сапфира и её эволюция при термообработке.

В данной главе рассмотрены механизмы роста металлических пленок и факторы, влияющие на них. Замечено, что на микроструктуру, которая в дальнейшем определяет функциональные свойства покрытий, оказывают существенное влияние условия их получения. При этом, дополнительными факторами, влияющими на процесс роста, могут быть подача электрического смещения на подложку и ее предварительный разогрев.

2. Способы получения тонкопленочных покрытий

Обычно способы осаждения тонких пленок делят на физические (Physical Vapor Deposition) и химические (Chemical Deposition) [18]. Основа физических способов – это транспортировка материала пленки поатомно от мишени к подложке, затем происходит конденсация и образование покрытия. Химический способ подразумевает прохождение реакции на поверхности подложки с последующей стадией роста покрытия.

Важно заметить, что не всегда можно отделить химический и физический способ. Например, физическое испарение металлов сочетается с химическим окислением, а электрохимическую технологию стоит выделять в отдельную группу.

2.1 Термическое испарение в вакууме

Методом резистивного испарения получают металлические покрытия из Al, Ag, Cu, Zn, Cd, Cr, Ni, Co.

В данном способе получения пленок используется молекулярный поток испаренного материала, находящегося в тугоплавком тигле. Материал нагревается до температуры, при которой происходит интенсивное испарение. Для увеличения чистоты пленок необходимо увеличить длину свободного пробега атомов, для этого используется высокий вакуум вплоть до 10^{-8} Па. Схема процесса представлена на рисунке 2.1.

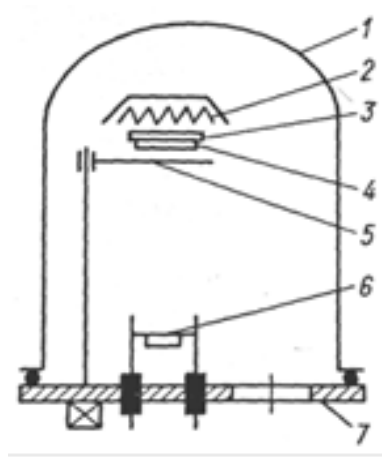


Рисунок 2.1 – Термическое испарение в вакууме [19]: 1 – камера; 2 – нагреватель подложки; 3 – подложкодержатель; 4 – подложка; 5 – заслонка; 6 – испаритель; 7 – опорная плита.

Разогрев вещества может быть непосредственным и косвенным. Непосредственный нагрев подразумевает прохождение тока через испаряемое вещество, обычно применяется для сублимирующих металлов. Для металлов и диэлектриков применяется косвенный нагрев. Косвенный нагрев подразумевает передачу тепла от нагревателя, это позволяет увеличить скорость испарения (по сравнению с непосредственным нагревом), но и качество покрытий может оказаться хуже [19].

Схемы испарителей представлены на рисунке 2.2.

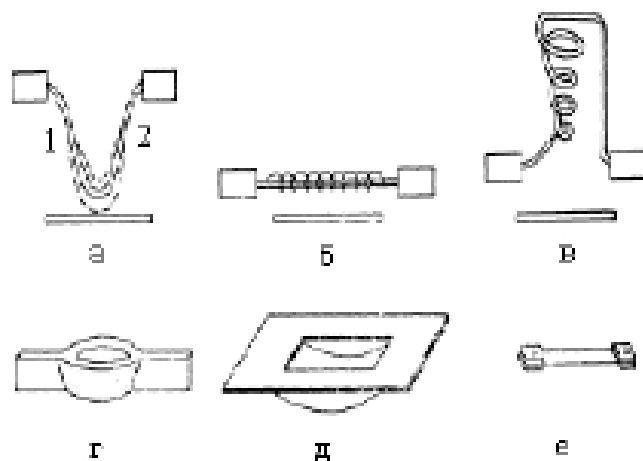


Рисунок 2.2 – Схемы испарителей [20]. Проволочные: а — V-образный испаритель; б — линейный испаритель; в — спиральный конический испаритель. Ленточные: г — лодочка; д — лента с вдавленным желобом; е — отрезок ленты

Проволочные испарители при достаточном нагреве расплавляют испаряемый материал, смачиваются им и дальнейшее испарение идет из нагреваемой проволокой капли, преимущественно из точек 1 и 2 на рисунке 2. Испарители в виде лодочки и с желобом используются для испарения порошковых материалов и больших объемов материала, производятся из тантала, молибдена и вольфрама [20].

Среди недостатков данного метода можно выделить возможное осаждение капель испаряемого материала на подложку, что плохо влияет на покрытие. Кроме того, КПД процесса довольно низкий, около 5% уходит на испарение, остальная энергия тратится на излучение, а низкая энергия испаренных атомов не позволяет получить покрытие с хорошей адгезией и пленка имеет неоднородности по поверхности [19].

2.2 Магнетронное распыление

Магнетронная распылительная система (МРС) является устройством, где осаждение покрытия происходит за счет ионизации рабочего газа, ионы затем ускоряются под действием приложенного к мишени напряжения и распыляет вещество мишени, которое затем стремится к подложке. В этом случае энергия распыленных частиц исчисляется единицами и десятками эВ [21].

МРС можно разделить на группы по нескольким признакам: тип питания (постоянный ток, импульсный одной полярности, импульсный переменный, высокочастотный), по форме мишени (плоская, цилиндр, конус и т.д.), по организации магнитной системы (постоянные или электрические магниты, сбалансированные или несбалансированные) и т.д. [22]. Базовый принцип действия, тем не менее, неизменен для всех МРС. Схема МРС с плоской мишенью представлена на рисунке 2.3.

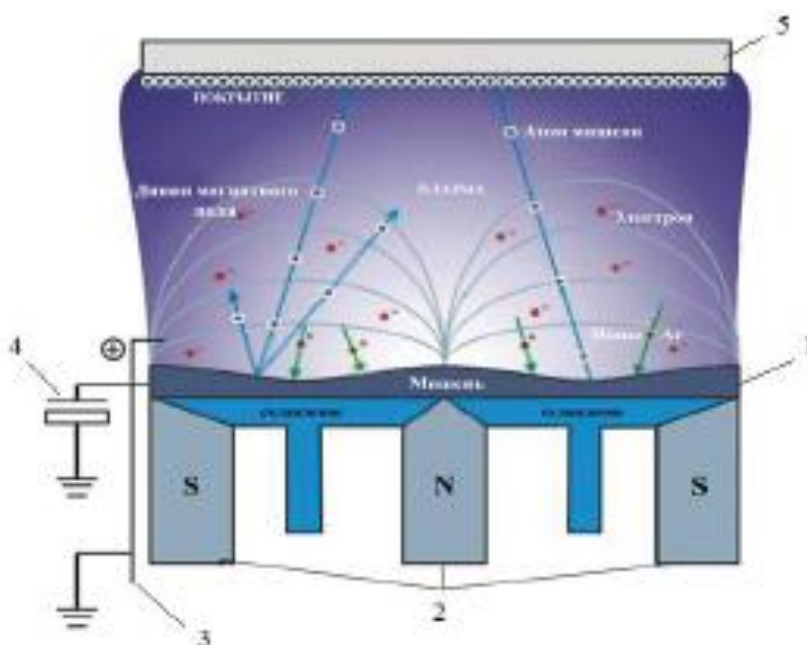


Рисунок 2.3 – Схема МРС с плоской мишенью [23]: 1 – мишень, 2 – магнитная система, 3 – анод, 4 – источник питания, 5 – подложка.

Рассмотрим подробнее принцип работы. Охлаждаемые водой магниты создают магнитное поле. После подачи отрицательного смещения на мишень МРС (она является катодом), в области над катодом образуется скрещенное электрическое и магнитное поле (магнитная ловушка), в котором электроны двигаются по сложным траекториям и многократно ионизируют рабочий газ. Атом рабочего газа распадается на электрон и положительный ион. Электрон продолжает процесс ионизации в магнитной ловушке), а ион устремляется к катоду и, поскольку его масса выше массы электрона и магнитная ловушка на него почти не влияет. За счет своей энергии ион выбивает атомы из мишени и инициирует вторичную электронную эмиссию мишени.

Преимущества МРС: малый разогрев подложки, возможность получать сложные соединения посредством распыления составной мишени или в среде реактивного газа (оксиды, карбиды и нитриды), хорошая однородность покрытий по толщине [24].

Недостатки МРС: использование материала мишени редко бывает выше 50% ввиду профиля магнитного поля и неоднородного распыления [22],

невысокая (относительно термического испарения) скорость роста покрытий, рабочее давление относительно высоко (0,1 Па), возможность образования дуги при высокой мощности [25].

2.3 Магнетронная распылительная система с жидкофазной мишенью

Магнетронная распылительная система с жидкофазной мишенью (ЖМРС) является объединением обычной МРС и метода термического испарения. Мишенью является тугоплавкий тигель, в который помещается осаждаемый материал. Тигель теплоизолирован от охлаждаемой магнитной системы, таким образом энергия от ионной бомбардировки расходуется на распыление и нагрев мишени, но почти не уходит с охлаждающей водой, что приводит к плавлению и испарению материала мишени и значительно увеличивает поток вещества к подложке, соответственно и скорость осаждения. Конструкция такого магнетрона представлена на рисунках 2.4 и 2.5.

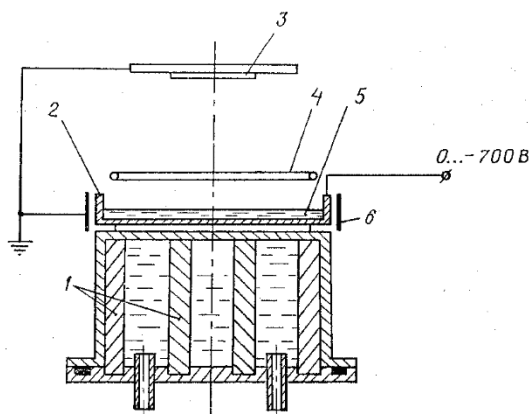


Рисунок 2.4 – Магнетрон с жидкометаллическим катодом [26]:
1 – магнитная система тигель, 2 – тигель, 3 – подложка, 4 – экран, 5 – мишень, 6 – анод.

Работает данная система аналогично МРС с твердой мишенью, кроме того отличия, что из-за теплоизоляции мишени от охлаждения нагревается мишень и тигель. Во время распыления мишень доходит до температуры плавления, плавится и далее к процессу распыления добавляется интенсивное испарение. Ещё одним плюсом является возможность режима

«самораспыления», когда после прекращения подачи рабочего газа разряд продолжает гореть на собственных парах мишени. Это позволяет получать более чистые покрытия при меньшем рабочем давлении.

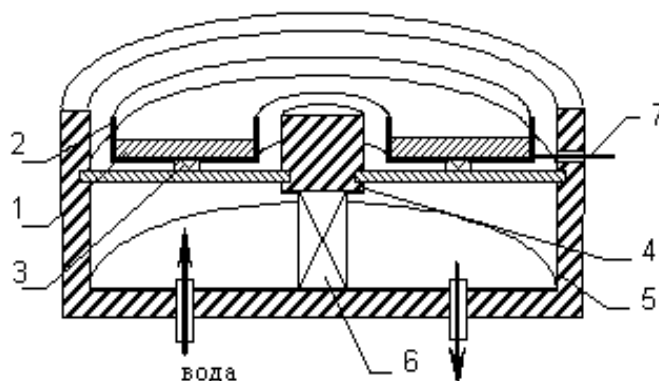


Рисунок 2.5 – Конструкция магнетрона с жидкофазной кольцевой мишенью:

1 – мишень; 2 – тигель; 3 – керамические вставки; 4 – центральный магнитопровод; 5 – корпус магнетрона; 6 – постоянные магниты; 7 – термопара.

Преимуществом второй конструкции является наличие центрального, а не только наружного магнитопровода, что позволяет увеличить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля над мишенью вне зависимости от её толщины, что облегчает зажигание и поддержание разряда. Кроме того, за счет использования мишени в форме кольца, магнитная ловушка расположена преимущественно над распыляемым веществом и процесс плавления и распыления идет со всей доступной площади мишени.

В работе [27] представлены расчетные данные, показывающие наличие интенсивного теплового потока от расплавленной мишени к подложке, что приводит к ее значительному разогреву. Согласно теории [16], при относительно высоком разогреве подложки, пленка в процессе роста обретает крупнозернистую структуру и имеет минимальную пористость. Поэтому в данной работе для получения медных покрытий использовался метод ЖМРС (с кольцевой мишенью).

3. Экспериментальное оборудование и методика измерений

3.1 Схема экспериментальной установки

Исследования проводились на вакуумной ионно-плазменной установке комплект вакуумного оборудования (КВО), предназначенной для осаждения тонкопленочных покрытий на подложки плоской формы. Конструкция установки позволяет проводить осаждение покрытий в среде рабочего газа или смеси газов, для получения металлических и неметаллических покрытий (оксидов, нитридов и т.п.). Ионно-плазменная установка оснащена комплектом магнетронов (стандартная МРС и МРС с жидкофазной мишенью) и ионным источником с замкнутым дрейфом электронов, который обеспечивает очистку поверхности перед осаждением. Внутренне устройство установки представлено на рисунке 3.1. 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.

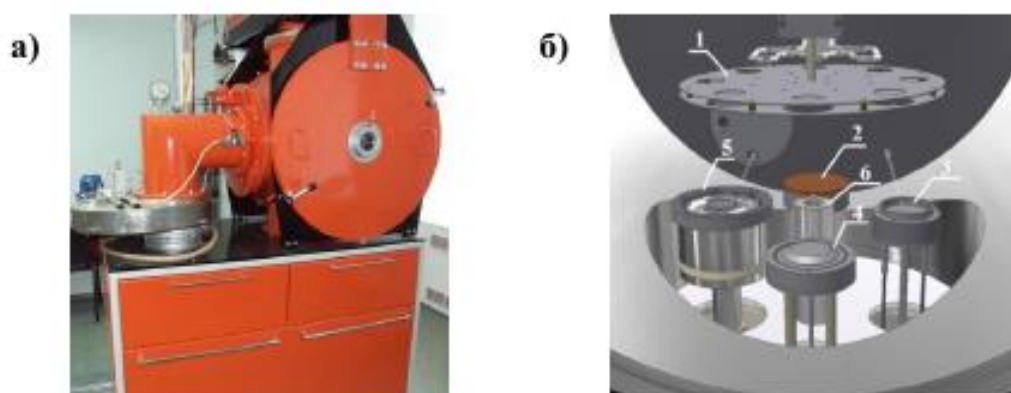


Рисунок 3.1 – Внешний вид ионно-плазменной установки «КВО» (а) и расположение элементов внутри вакуумной камеры (б): 1 – вращающийся стол для подложек; 2 – МРС с твёрдой мишенью; 3 – МРС с жидкофазной мишенью в виде диска; 4 – ионный источник с замкнутым дрейфом электронов; 5 – МРС с жидкофазной кольцевой мишенью; 6 – посадочное место для заслонки.

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

Вакуумная система (рисунок 3.2) служит для создания необходимого разрежения в рабочей камере установки для осуществления процесса напыления. Вакуумная система установки собрана по стандартной схеме получения высокого вакуума на базе диффузионного паромасляного насоса Н-250 [28].

Вакуумная система включает в себя:

- диффузионный паромасляный Н-250;
- пластинчато-роторный 2НВР-90;
- магистраль откачки диффузионного насоса;
- затвор;
- клапан вакуумный электромагнитный;
- клапан вакуумный электромеханический.

Насос 2НВР–90 служит для форвакуумной откачки диффузионного насоса и предварительной откачки рабочей камеры.

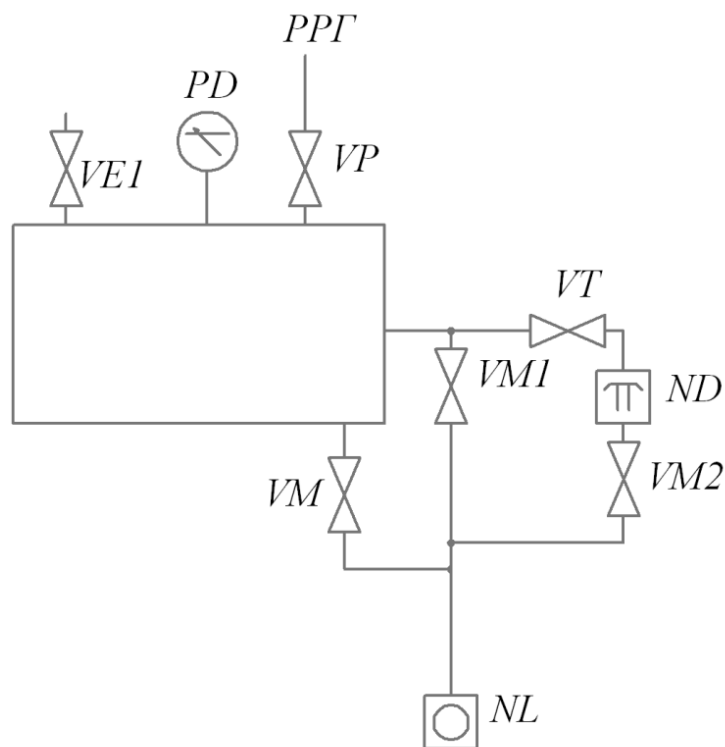


Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки [28]: РРГ – регулятор расхода газа; VE1 – натекатель; VP – натекатель НМБ-1; VT – затвор с электромеханическим приводом; VM – клапан с ручным приводом; VM1 – клапан с электромагнитным приводом; VM2 – клапан с электромагнитным приводом;

Подготовка установки к работе:

- проверить внешнее состояние токоведущих проводов, кабельного канала и убедиться в отсутствии повреждений и надлежащем расположении;
- проверить положение тумблеров панели управления (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 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 Измерение шероховатости и толщины покрытий

Рельеф поверхности имеет важное значение для дальнейшей обработки тонкой пленки. Поэтому в данной работе была исследована шероховатость покрытий. Для этого был использован прибор Micro Measure 3D Station (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Прибор Micro Measure 3D Station [29].

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 твёрдых и мягких образцов, в том числе и оптически прозрачных.

Прибор 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.

Функциональные возможности прибора могут быть применены для таких практических приложений, как анализ морфологии поверхности, определение структурных составляющих сталей, чугунов, цветных металлов, диэлектрических включений в металлах, гранулометрический анализ порошков и пор, анализ толщины нанометровых слоев материалов, металлографический анализ методом сравнения с эталонами и ряд других.

Профилометр работает следующим образом. Световой пучок диаметром 2 мкм освещает поверхность импульсами с частотой 30, 100, 300 или 1000 Гц.

Частота световых импульсов выбирается в зависимости от интенсивности отражённого света и зависит от состояния поверхности (шероховатости, степени блеска или черноты). Пучок света генерируется галогенной лампой. Затем по волоконно-оптическому проводнику пучок переходит в датчик, где он формируется в луч. Высота выступов и впадин определяется из разности интенсивностей падающего и отражённого света. Шероховатость поверхности вычисляется из профиля, зарегистрированного на отрезке определённой длины (рисунок 3.4).

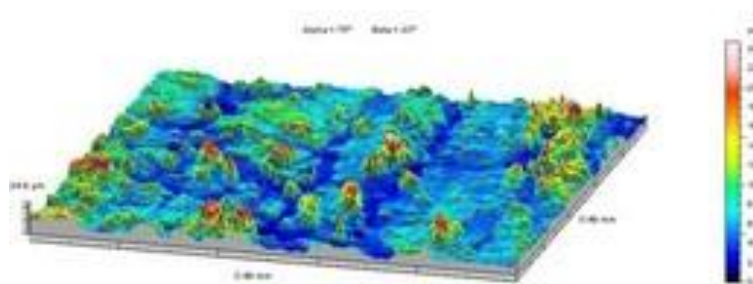


Рисунок 3.4 – 3D модель поверхности подложки [30]

Трёхмерное изображение поверхности формируется в результате многократного, последовательного перемещения поверхности исследуемого образца под датчиком. Далее производится анализ полученных профилей.

Профилометр снабжен цифровой камерой, позволяющей десятикратно увеличивать изображение поверхности тонкой плёнки. С помощью камеры можно визуально выбирать место исследования. Результатом работы является профилограмма, из которой можно извлечь необходимые параметры шероховатости. Прибор идеален для измерений шероховатости, благодаря небольшому размеру светового пятна.

Толщина пленки измерялась посредством травления части медной пленки до кремниевого основания. Затем образец изучался на профилометре и высота спада от поверхности медной пленки до кремниевого основания считалась толщиной пленки.

3.3 Исследование адгезионной прочности покрытий

Адгезия является одной из важнейших характеристик тонких покрытий. Она определяет прочность сцепления пленки с подложкой.

Прибор Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 (рисунок 3.5) предназначен для исследования адгезионных свойств и износостойкости тонких пленок и покрытий.



Рисунок 3.5 – Устройство Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 [31]

Применяется для определения числовых параметров системы пленка/основа, таких как:

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

Наиболее простым и быстрым способом оценки адгезионных характеристик является метод царапания. Царапины на образец было нанесены с помощью алмазного индентора. Во время передвижения индентора, на который подается нагрузка, происходит сцарапывание пленки (рисунок 3.6).

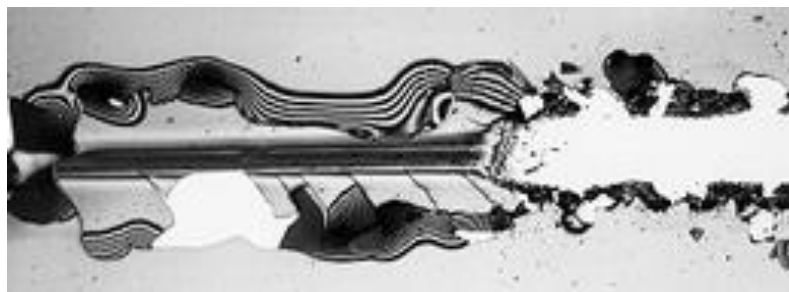


Рисунок 3.6 – Разрушение царапины [31].

При определенной критической нагрузке покрытие начинает разрушаться. Скорость перемещения алмазного индентора составляла несколько мм в минуту. Момент сцарапывания пленки определялся с помощью микроскопа, вся информация отображалась на экране и затем обрабатывалась.

3.4 Измерение электрического сопротивления покрытий

Измерения электрического сопротивления образцов проводились на автоматизированном стенде, схема которого представлена на рисунке 3.7.

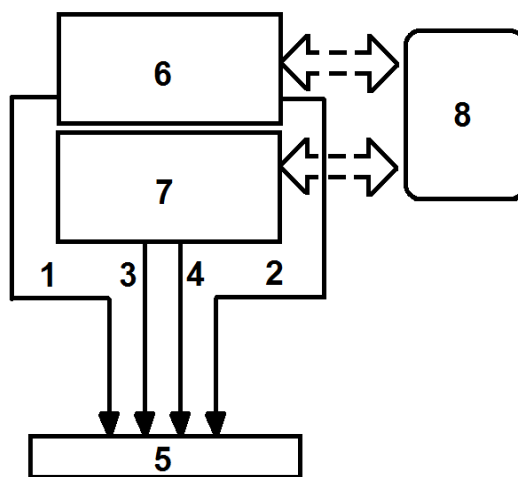


Рисунок 3.7 – Автоматизированный стенд для измерения электросопротивления металлов и сплавов [32]: 1, 2 – контакты для подвода тока к образцу, 3, 4 – контакты для измерения напряжения на участке, 5 – исследуемый образец, 6 – цифровой источник тока, 7 – цифровой нановольтметр, 8 – компьютер.

Измерения сопротивления проводились методом амперметра-вольтметра, основанным на измерении тока, протекающего через измеряемый участок сопротивления и падения напряжения на нем. Диапазон измеряемых сопротивлений в данной работе лежит в области низких сопротивлений. При проведении таких измерений основными источниками погрешности являются сопротивления контактов и возникающие на месте контакта двух разнородных проводников термо-ЭДС. Для исключения влияния сопротивлений контактов в данном комплексе используется т.н. четырехконтактная схема измерения сопротивления образца. Для устранения влияния термо-ЭДС используется специальный режим измерения сопротивления «Delta». Он основан на проведении измерений падения напряжения на исследуемом участке при разных направлениях тока. Дело в том, что термо-ЭДС и ее полярность не зависят от направленности тока, а значение напряжения зависит. В результате его измерений при различных полярностях тока получают разные значения падения напряжения. Влияние же термо-ЭДС на полусумму полученных значений сводится к нулю. При известном значении силы тока, установленного цифровым источником питания, падение напряжения измерялось цифровым нановольтметром. Управление режимом «Delta» осуществляется автоматически при помощи программного обеспечения, разработанного компанией Keithley Instruments. Значения измеренных напряжений регистрировались компьютером, после чего происходил расчет электросопротивления согласно формуле закона Ома с учетом полученных значений и известного значения тока, протекающего через образец. В данной работе измерения проводились при токе равном 105 мкА, меняющем свою полярность. Для каждого образца было проведено 5 измерений при температуре 20⁰ С.

3.5 Изучение структуры поверхности пленок

Для определения структуры покрытия применялся метод сканирующей электронной микроскопии. Он представляет собой разновидность электронной

микроскопии, в которой для зондирования исследуемой поверхности используется сканирование по ней сфокусированного пучка электронов.

В этом приборе пучок электронов фокусируется системой линз в пятно диаметром 1-10 нм на поверхности исследуемого образца и сканируется с помощью системы отклоняющих катушек синхронно с электронным пучком в видеотрубке, которая используется в качестве оптического дисплея. Оба электронных пучка управляются одним и тем же генератором сканирования, поэтому увеличение просто равно отношению размеров дисплея и исследуемой области на поверхности образца.

В сканирующем электронном микроскопе используется детектирование различных сигналов, включая вторичные электроны, обратно рассеянные электроны, рентгеновское излучение и ток, проходящий через образец. Двумерная карта снимаемого сигнала и представляет собой изображение поверхности.

В данной работе использовался сканирующий электронный микроскоп серии Zeiss Supra 55 (Carl Zeiss Group, Германия). Его характеристики представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики микроскопа серии Zeiss Supra 55 [33]

| Параметр | Значение |
|-----------------------|---|
| Увеличение | 12х-900000х в режиме вторичных электронов |
| Разрешение | 1,0 нм при 15 кВ 1,7 нм при 1 кВ 3,5 нм при 0,2 кВ |
| Ускоряющее напряжение | 20 В – 30000 В |
| Источник электронов | Автоэмиссионный (термоэмиссионного типа), стабильность лучше 0,2% в час |

3.6 Рентгено-структурный анализ

Металлы и сплавы состоят из множества мелких монокристаллов данного вещества. Для определения средних размеров кристаллитов, параметров распределения по размерам, величины микродеформаций широко используются рентгенографические методики исследования реальной структуры поликристаллов, основанные на анализе смещения, уширения и формы отдельных дифракционных пиков. Рентгенофазовый анализ позволяет определить фазовый состав твёрдых тел и количественное соотношение этих фаз в веществе.

В данной работе исследование фазового состава и структурных параметров образцов медных покрытий проводилось на дифрактометре XRD-6000 на $\text{CuK}\alpha$ -излучении (Shimadzu, Япония). Анализ фазового состава проведён с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. PDF 4+ является наиболее современной единой базой данных, в которой объединены самые большие в мире источники дифракционных данных для неорганических кристаллов и порошков [34].

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1. Предпроектный анализ

5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

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

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Исследуемая магнетронная распылительная система с жидкой мишенью используется для высокоскоростного осаждения тонкопленочных пленок на разные поверхности.

Потенциальными потребителями являются научно-исследовательские центры, исследовательские институты и корпоративные лаборатории с исследовательскими системами, а в перспективе, промышленные предприятия с промышленными установками и интегрированными системами производства [37].

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурирующих разработок, необходимо проводить систематически, поскольку существующие рынки пребывают в постоянном движении. Данный вид анализа помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим конкурентам. Конкурентами выбраны технологии HiPIMS (K1) и магнетронная распылительная система с холодной мишенью (K2).

Данный анализ был проведен с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

| Критерии оценки | Вес критерия | Баллы | | | Конкурентоспособность | | |
|---|--------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| | | Б _ф | Б _{к1} | Б _{к2} | К _ф | К _{к1} | К _{к2} |
| Технические критерии оценки ресурсоэффективности | | | | | | | |
| 1. Скорость осаждения покрытия | 0,2 | 5 | 4 | 3 | 1 | 0,8 | 0,6 |
| 2. Адгезия покрытия | 0,15 | 4 | 4 | 4 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 3. Легкость эксплуатации | 0,1 | 4 | 4 | 5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 |
| 4. Повторяемость | 0,2 | 3 | 4 | 5 | 0,6 | 0,8 | 1 |
| 5. Возможность автоматизации | 0,1 | 4 | 4 | 5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 |
| Экономические критерии оценки эффективности | | | | | | | |
| 1. Конкурентоспособность продукта | 0,1 | 5 | 5 | 4 | 0,5 | 0,5 | 0,4 |
| 2. Цена | 0,1 | 3 | 2 | 4 | 0,3 | 0,2 | 0,4 |
| 3. Послепродажное обслуживание | 0,05 | 2 | 3 | 2 | 0,1 | 0,15 | 0,1 |
| Итого | 1 | 30 | 30 | 32 | 3,9 | 3,85 | 4,1 |

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

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

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (1)$$

,где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i-го показателя.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

Из полученных результатов можно сделать вывод о среднем уровне конкурентоспособности технологии. Судя по всему, надо улучшать показатели повторяемости, уменьшать цену и облегчать эксплуатацию.

5.1.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

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.

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 5.2.

В рамках третьего этапа составлена итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 5.2- Итоговая матрица SWOT-анализ

| | | |
|--|--|--|
| | Сильные стороны научно-исследовательского | Слабые стороны научно-исследовательского проекта: |
|--|--|--|

| | | |
|---|--|---|
| | <p>проекта:</p> <p>С1. Высокая скорость осаждения.</p> <p>С2. Более полное использование материала мишени.</p> <p>С3 Режим «самораспыления» с низким рабочим давлением.</p> | <p>Сл1. Необходимость дополнительного обучения кадров для работы с технологией</p> <p>Сл2. Большой набор требований к продукту со стороны предприятий</p> <p>Сл3. Повторяемость результатов мало изучена.</p> |
| <p>Возможности:</p> <p>В1. Появление новых сфер применения технологии.</p> <p>В2. Интерес промышленных предприятий.</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> | <p>Новые сферы применения увеличат финансирование разработки. Интерес предприятий поможет понять конечные требования к продукту.</p> | <p>Новые сферы применения технологии помогут найти область с легко выполнимыми требованиями.</p> |
| <p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии у производства.</p> <p>У2. Развитие альтернативных технологий и аналогов оборудования.</p> | <p>Эффективность и скорость осаждения могут стать важным аргументом для обновления технологических линий.</p> | <p>Главной угрозой является отсутствие спроса, данная угроза решается поиском новых сфер применения и демонстрацией достоинств технологии.</p> |

5.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

Для того, чтобы оценить готовность научной разработки к коммерциализации необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта. Таблица оценки готовности проекта к коммерциализации приведена в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации.

| № п/п | Наименование | Степень проработанности научного проекта | Уровень имеющихся знаний у разработчика |
|-------|--|--|---|
| 1. | Определен имеющийся научно-технический задел | 5 | 4 |
| 2. | Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела | 3 | 3 |
| 3. | Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке | 2 | 2 |
| 4. | Имеется команда для коммерциализации научной разработки | 4 | 4 |
| 5. | Проработан механизм реализации научного проекта | 4 | 4 |
| | ИТОГО БАЛЛОВ | 18 | 17 |

Перспективность проекта ниже среднего, следовательно, для реализации проекта необходимо привлечь специалистов в сфере маркетинга, продумать вопросы финансирования со стороны предприятий. Также необходимо привлечь/обучить специалистов, работающих в области радиационных технологий и обладающими навыками работы на вакуумных установках.

В качестве методов для коммерциализации технологии получение пленок при помощи МРС с жидкофазной мишенью можно выбрать следующие методы:

1. торговля патентными лицензиями, т.е. передача третьим лицам прав использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе. В случае полной доработки проекта есть возможность запатентовать технологию, т.к. до сих пор в целях балансировки обработки электронным лучом не использовалась;

2. передача интеллектуальной собственности в уставной капитал предприятия. Так данная работа осуществляется непосредственно на кафедре экспериментальной физики, то интеллектуальная собственность может отойти предприятию. Данная кафедра будет финансировать развитие научно-

технического исследования, следовательно, разработка может дойти до конечного готового результата.

5.2. Инициация проекта

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

Ниже, в таблицах 5.4, 5.5, 5.6 представлены все необходимые данные, которые входят в устав проекта.

Таблица 5.4 – Заинтересованные стороны проекта

| Заинтересованные стороны проекта | Ожидания заинтересованных сторон |
|---|---|
| ТПУ, НОЦ Б.П. Вейнберга | Связать свойства получаемых медных покрытий с параметрами осаждения |

Таблица 5.5 – Цели и результат проекта

| | |
|---|---|
| Цели проекта: | Технологии получения медных пленок при помощи магнетронной распылительной системы с жидкофазной мишенью. |
| Ожидаемые результаты проекта: | -готовая технология получения пленок; -энергоэффективность; - высокое качество полученного материала. |
| Критерии приемки результата проекта: | результаты испытаний при различных режимах на МРС с жидкофазной мишенью. |
| Требования к результату проекта: | Требование: |
| | Технология получения пленок определенных характеристик должна быть описана. |
| | Необходима хорошая адгезия пленок, высокая |

| | |
|--|---------------|
| | проводимость. |
|--|---------------|

На этапе организационной структуры работы проекта решались следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Эту информацию представить в табличной форме (таблица 5.6)

Таблица 5.6 – Рабочая группа проекта

| № п/п | ФИО, основное место работы, должность | Роль в проекте | Функции | Трудо-затраты, час. |
|---------------|---|----------------|-------------------------------------|---------------------|
| 1 | Юрьева Алена Викторовна НОЦ Б.П. Вейнберга, старший преподаватель | Руководитель | Координация деятельности проекта | 120 |
| | Шабунин Артем Сергеевич, инженер | Инженер | Работа на вакуумной установке | 204 |
| 2 | Николаев Михаил Вячеславович, ТПУ, НОЦ Б. П. Вейнберга, магистрант | Исполнитель | Выполнение исследовательской работы | 498 |
| ИТОГО: | | | | |

В данном разделе были выделены заинтересованные в проекте предприятия, установлены цели и ожидаемые результаты. Была определена рабочая группа проекта, что в дальнейшем необходимо для расчета бюджета.

Таблица 5.7 – Ограничения проекта

| Фактор | Ограничения/ допущения |
|--------------------------------|------------------------|
| 3.1. Бюджет проекта | 220161,06 руб. |
| 3.1.1. Источник финансирования | ТПУ |
| 3.2. Сроки проекта: | 05.02.18-05.06.18 |

| | |
|---|----------|
| 3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом | 05.02.18 |
| 3.2.2. Дата завершения проекта | 05.06.18 |

5.3. План проекта

В рамках планирования выпускной квалификационной работы построен календарный график работы (таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Календарный план проекта в рабочих днях.

| Код работы (из ИСР) | Название | Длительность, дни | Дата начала работ | Дата окончания работ | Состав участников (ФИО ответственных исполнителей) |
|---------------------|--|-------------------|-------------------|----------------------|--|
| 1 | Определение темы исследовательской работы | 4 | 05.02 | 08.02 | руководитель, исполнитель, (магистрант) |
| 2 | Ознакомление с теоретическими данными | 16 | 09.02 | 04.03 | исполнитель (магистрант), руководитель |
| 3 | Обучение работе на вакуумно - плазменной установке | 5 | 05.03 | 12.03 | исполнитель (магистрант), инженер |
| 4 | Получение образцов при разных параметрах | 29 | 13.03 | 22.04 | исполнитель, инженер |
| 5 | Исследование образцов | 15 | 23.04 | 11.05 | исполнитель (магистрант) |
| 6 | Оформление пояснительной записки | 14 | 14.05 | 01.06 | исполнитель (магистрант) |
| Итого: | | 83 | 05.02 | 01.06 | |

5.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

***Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты
(за вычетом отходов)***

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

| Наименование | Марка, размер | Кол-во | Цена за единицу, руб. | Сумма, руб. |
|--|---------------|--------|-----------------------|-------------|
| Медная мишень (технически чистая 99%) | | 4 | 3500 | 14000 |
| Молибденовый тигель | | 2 | 12500 | 25000 |
| Графитовый тигель | | 2 | 5700 | 11400 |
| Стеклянные подложки | | 50 | 50 | 2500 |
| Всего за материалы | | | | 52900 |
| Транспортно-заготовительные расходы (3-5%) | | | | 2645 |
| Итого по статье C_M | | | | 55545 |

Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной

теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется Положением об оплате труда).

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (13)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

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

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (14)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 5.10);

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (15)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 20).

Оклад руководителя 23 100 рублей.

Оклад инженера 10 633 рублей.

Оклад магистранта 9 893 рублей.

Таблица 5.10 – Баланс рабочего времени

| Показатели рабочего времени | Руководитель | Инженер | Магистрант |
|--|--------------|---------|------------|
| Календарное число дней | 365 | 365 | 365 |
| Количество нерабочих дней | | | |
| - выходные дни | 52 | 104 | 52 |
| - праздничные дни | 14 | 14 | 14 |
| Потери рабочего времени | | | |
| - отпуск | 48 | 24 | 48 |
| - невыходы по болезни | 0 | 0 | 0 |
| Действительный годовой фонд рабочего времени | 251 | 223 | 251 |

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_6 \cdot (k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (16)$$

где Z_6 – базовый оклад, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

k_d – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Основная заработная плата **руководителя** (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад Z_6 определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия. Размер окладов ППС и НС ТПУ представлен на корпоративном портале ТПУ: <http://portal.tpu.ru/departments/otdel/peo/documents>.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Расчёт основной заработной платы

| Исполнители | З _б , руб. | k _{пр} | k _д | k _р | З _м , руб | З _{дн} , руб. | T _р , раб. дн. | З _{осн} , руб. | Итого, руб |
|--------------|--------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------|
| Руководитель | 23100 | 1 | 0 | 1,3 | 30030 | 1244,27 | 20 | 24885,4 | 92719,43 |
| Инженер | 10633 | 1 | 0 | 1,3 | 13822,9 | 694,24 | 34 | 23604,16 | |
| Магистрант | 9893 | 1 | 0 | 1,3 | 12860,9 | 532,89 | 83 | 44229,87 | |

$$Z_{дн} (\text{магистрант}) = 12860,9 * 10,4 / 251 = 532,89$$

$$Z_{дн} (\text{инженер}) = 13822,9 * 11,2 / 223 = 694,24$$

$$Z_{дн} (\text{руководитель}) = 30030 * 10,4 / 251 = 1244,27$$

$$Z_{осн} (\text{магистрант}) = 532,89 * 83 = 44,229,87$$

$$Z_{осн} (\text{инженер}) = 694,24 * 34 = 23,604,16$$

$$Z_{осн} (\text{руководитель}) = 1244,27 * 20 = 24885,4$$

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды. (30,2%)

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (18)$$

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

$$C_{внеб} = 0,302 * (92719,43) = 28001,27$$

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.

Накладные расходы состоят из затрат на электроэнергию и водоснабжение во время работы установки.

$$C_{\text{накл}} (\text{электроэнергия}) = 5,8 * 6 * 8 * 34 = 9465,6$$

, где 5,8 – цена в рублях за кВт*ч энергии, 6 – мощность установки в кВт, 8 – рабочее время в день, 34 – количество дней работы установки.

$$C_{\text{накл}} (\text{водоснабжение}) = 63,29 * 2 * 8 * 34 = 34429,76$$

, где 63,29 – цена в рублях за м³ воды с учетом водоотведения, 2 – потребление воды м³ в час, 8 – рабочее время в день, 34 – количество дней работы установки.

$$C_{\text{накл}} = 34429,76 + 9465,6 = 43895,36.$$

Итоговый бюджет исследования состоит из затрат на сырье, заработную плату и накладных расходов.

$$C_{\text{проекта}} = C_{\text{м}} + Z_{\text{осн}} + C_{\text{внеб}} + C_{\text{накл}} = 55545 + 92719,43 + 28001,27 + 43895,36 = 220161,06.$$

6. Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Опасным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности [38].

При выполнении настоящей магистерской работы были использованы: напылительная установка «КВО», персональная электронно-вычислительная машина, газовые баллоны со сжатым аргоном. Приведем анализ вредных и опасных производственных факторов, также комплекс защитных мероприятий.

6.1. Анализ вредных производственных факторов.

Основные вредные и опасные факторы представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

| Наименование видов работ и параметров производственного процесса | ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ | | Нормативные документы |
|--|---|---------------------------------------|---|
| | Вредные | Опасные | |
| Работа на установке КВО. ТПУ, 11-145. | шум, электромагнитное излучение, работа с газовыми баллонами. | механическая и термическая опасности. | НПАОП 28.51-.1.38-91 правила безопасности труда при работе вакуумном ионно-плазменном напылении покрытий |
| | | пожаровзрывоопасность. | Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность |
| | | Электрический ток | ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. |
| Расчёт данных на ПЭВМ | -физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения; -психофизиологические: умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки. | | СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» |

Как видно из данной таблицы, основными вредными факторами при работе являются: шум, высокое напряжение, электромагнитное излучение, статическое электричество и опасность взрыва.

6.2. Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на установке КВО и ПВМ.

6.2.1. Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

6.2.2. Требования к ПЭВМ и организация работы.

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 6.1.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

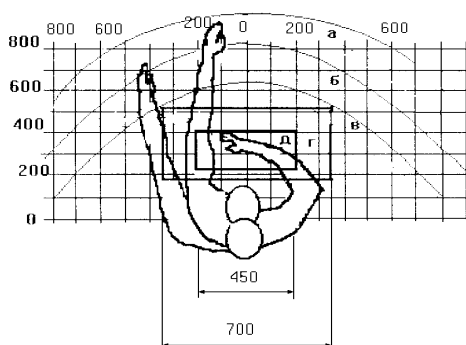


Рисунок 6.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а - зона максимальной досягаемости рук; б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в - зона легкой досягаемости ладони; г - оптимальное пространство для грубой ручной работы; д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

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

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

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того должна быть

возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

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

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

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [39] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц – 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц – 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

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

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение при экранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

По нормам [39] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05м от экрана не более 100 мкР/час.

6.2.3. Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии со [39] и приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 - Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

| Период года | Температура, °С | Относительная влажность, | Скорость движения |
|--------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|
| Холодный и переходный | 23-25 | 40-60 | 0,1 |
| Тёплый | 23-25 | 40 | 0,1 |

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

На установке КВО установлена принудительная вытяжка из вакуумного насоса.

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

микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ и установке КВО уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Источник шумового загрязнения – вращающиеся части механических насосов. При работе механического насоса максимальность шумового загрязнения составляет 52 дБ на расстоянии 1 м. Длительность возникновения максимальных шумов составляет не более 5 минут. Рабочее место расположено в 2-2,5 метров от установки. Предельно допустимый уровень шумов и средства защиты должны удовлетворять [40]. Работающих в этих зонах, администрация снабжает средствами индивидуальной защиты, которыми являются специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противозумные каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения звука.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

Согласно [41] естественное освещение составляет 3% ($KE0 \epsilon_n$), совместное 1,8 %, искусственное 200 лк (освещенность при комбинированном освещении от общего). Освещение комбинированное.

6.3. Электробезопасность

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

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Действие электрического тока на живую ткань носит разносторонний и своеобразный характер. Проходя через организм человека, электроток производит термическое, электролитическое, механическое, биологическое, световое воздействие.

Термическое воздействие тока характеризуется нагревом кожи и тканей до высокой температуры вплоть до ожогов.

Электролитическое воздействие заключается в разложении органической жидкости, в том числе крови, и нарушении ее физико-химического состава.

Механическое действие тока приводит к расслоению, разрыву тканей организма в результате электродинамического эффекта, а также мгновенного

взрывоподобного образования пара из тканевой жидкости и крови. Механическое действие связано с сильным сокращением мышц вплоть до их разрыва.

Биологическое действие проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей и сопровождается судорожными сокращениями мышц.

Световое действие приводит к поражению слизистых оболочек глаз.

Мероприятия по защите: отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы; вывешивание плакатов, указывающих место работы; заземление корпусов всех установок через нулевой провод; покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией; недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

Опасность поражения электрическим током при прикосновении к корпусу и другим металлическим частям оборудования, оказавшимися под напряжением вследствие замыкания на корпусе и по другим причинам, может быть устранена быстрым отключением повреждённой установки от питающей сети и вместе с тем снижением напряжения корпуса относительно земли [42, 43].

6.4. Пожарная безопасность

Согласно [44], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;

- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения — предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководителю;
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры в соответствии с инструкцией.

6.5 Правила безопасной работы на установке КВО

Выполнение магистерской работы происходило с использованием установки магнетронного распыления, газовых баллонов со сжатым аргоном и кислородом. Установка построена на базе диффузионного насоса, принцип его работы основан на разогреве паров масла. Касание нагреваемой части насоса может привести к сильному поражению кожных покровов – ожогу. Для защиты от движущихся механизмов и повышенной температуры поверхностей оборудования, применяются защитные ограждения в соответствии с [45]. Предпочтительно применение сплошных ограждений. Ограждения, изготовленные из сетки (25x25 мм), должны иметь конструкцию, обеспечивающую постоянство формы и установленную жесткость. Сплошные ограждения - кожухи в электрических установках до 1000 В. Сетчатые ограждения применяются в установках напряжения до 1000 В и выше 1000 В.

Обращение с газовыми баллонами описано в [46]. К работе с газовыми баллонами должны быть допущены лица, прошедшие обучение и имеющие

соответствующее удостоверение. Не допускается работа с неисправными баллонами, а также с баллонами, имеющими истёкший срок хранения, за исключением слива баллонов при не герметичности газового арматурного блока или других фитингов.

Заправка и установка баллонов не допускается вблизи открытого огня, работающих электроприборов и автомобилей, а также запрещается курение. Баллоны при заправке и сливе должны быть установлены на заземлённую поверхность. Обязательно наличие исправного огнетушителя.

Обслуживающий персонал должен иметь одежду из не оплавляемой ткани, иметь на руках перчатки или рукавицы.

Категорически запрещается заправка баллонов более 85% общего объёма. Контроль осуществляется по началу выхода жидкой фазы из ниппеля.

В остальном, что не оговорено в настоящем разделе в части заправки и проверки баллонов, необходимо руководствоваться местными правилами.

Заправка газовых баллонов должна производиться вне помещений на специально оборудованных станциях.

Слив (перелив) газа следует производить на открытой, хорошо продуваемой площадке.

Заправленные или частично заправленные баллоны должны храниться вертикально под навесом, огороженным сеткой или иным способом, при этом площадь, через которую может свободно проходить воздух, не должна быть меньше 25% от площади всего ограждения и располагаться равномерно или в нижней части ограждения. На месте хранения должны находиться исправные огнетушители.

В одном месте должно храниться не более 200 баллонов. Расстояние от места хранения баллонов до других мест хранения газа не менее 5 м, до зданий и сооружений не менее 15 м.

Навес должен обеспечивать защиту от прямой солнечной радиации и прямого воздействия осадков.

Совместное хранение исправных и неисправных баллонов, а также баллонов с истекшим сроком технического освидетельствования не допускается. При хранении на баллонах должны быть закрыты все вентили и установлены заглушки.

Заключение

Использование ЖМРС позволяет существенно увеличить скорость осаждения медных покрытий. Так, при использовании молибденового тигля можно достигнуть скоростей осаждения около 220 нм/с. Это в 10-20 раз больше, чем у МРС с твердофазной мишенью. Полученные покрытия имеют параметры решетки, соответствующие объемной меди. Обладают плотной структурой, с минимальной пористостью.

Показано, что совокупность большого потока вещества и интенсивного теплового излучения от разогретой мишени позволяют получать плотные медные покрытия с хорошей адгезией и удельным сопротивлением ниже, чем при осаждении методом МРС с твердофазной мишенью.

Предварительный нагрев подложки или электрическое смещение не оказали положительного эффекта на структурные и функциональные свойства, однако электрическое смещение (как и осаждение в среде аргона) способствовали снижению шероховатости. Негативный эффект от электрического смещения – снижение адгезии, но его можно устранить, разогревая подложку перед напылением.

Список литературы

1. Технология тонких плёнок: Справочник. Т.1. / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. М.: Сов. радио, 1977. – 664 с.;
2. Chapin J.S. Sputtering process and apparatus: United State Patent №4.166.018; заявл. 3.01.1974; опубл. 28.08.1979;
3. Krutenat R.C. Vapor deposition by liquid-phase sputtering/ Krutenat R.C., Jesick W.R. // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1970. – V.7. – №1. – P.40-44;
4. Yuryeva A. V. et al. Effect of material of the crucible on operation of magnetron sputtering system with liquid-phase target //Vacuum. – 2017. – Т. 141. – С. 135-138.
5. Vapour Deposition / Eds.: C.F. Powell, J.H. Oxley, J.M. Blocher, Jr. – NY: John Wiley, 1966. – 725 p.
6. Crowell C. R., Sze S. M. Current transport in metal-semiconductor barriers //Solid-state electronics. – 1966. – Т. 9. – №. 11-12. – С. 1035-1048.
7. Geppert D. V., Cowley A. M., Dore B. V. Correlation of Metal-Semiconductor Barrier Height and Metal Work Function; Effects of Surface States //Journal of Applied Physics. – 1966. – Т. 37. – №. 6. – С. 2458-2467.
8. Петухов, В.Ю. Ионно-лучевые методы получения тонких пленок / В.Ю. Петухов, Г.Г. Гумаров. – Казань : КГУ, 2010.
9. Палатник Л.С., Фукс М.Я., Косевич В.М. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. М.: Наука, 1972. – 320 с.
10. Э.И. Точицкий Кристаллизация и термообработка тонких пленок. Минск: Наука и техника. 1976. – 362 с.
11. Venables J.A., Spiller G.D.T., Hanbucken M. Nucleation and growth of thin films // Rep. Prog. Phys. – 1984. – V. 47. – P. 399–459.
12. Bauer E. Chemisorbed Phases // Phase Transitions in Surface Films / Eds.: J.G. Dash and J. Ruvalds. – N.Y: Plenum Press, 1980. – P. 267–315.

13. Григорьев Д.А., Кукушкин С.А. Механизмы и кинетика начальных стадий роста пленок, выращиваемых методом химического газофазного осаждения // Журнал технической физики. – 1998. – Т. 68. – № 7. – С. 111–117.
14. Barna P.B., Adamik M. Fundamental Structure Forming Phenomena of Polycrystalline Films and The Structure Zone Models // Thin Solid Films. – 1998. – V. 317. – P. 27–33.
15. Petrov I., Barna P.B., Hultman L., Greene J. E. Microstructural evolution during film growth // J. Vac. Sci. Technol. – 2003. – V. A 21. – № 5. – P. S117–S128.
16. Thompson C.V. Grain Growth in Thin Films // Annu. Rev. Mater. Sci. – 1990. – V. 20. – P. 245–268.
17. Heiroth S., Frison R., Rupp J.L.M., Lippert T., Meier E.J.B., Gubler E.M., Dobeli M., Conder K., Wokaun A., Gauckler L.J. Crystallization and grain growth characteristics of yttria-stabilized zirconia thin films grown by pulsed laser deposition // Solid State Ionics. – 2011. – V. 19. – P. 12–23.
18. Smith D. Thin-Film Deposition: Principles and Practice. – Boston: McGraw Hill, 1995. – 616 p.;
19. Введение в методы получения пленочных электролитов для твердооксидных топливных элементов: монография / Л.А. Дунюшкина. – Екатеринбург: УРО РАН, 2015. – 126 с.
20. Гимпельсон В.Д., Радионов Ю.А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники. — М.: Машиностроение, 1976. — 328 с
21. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. – М.: Радио и связь, 1982. – 70 с.
22. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Книга 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления. – К.: Аверс, 2008. – 244 с.
23. Bergmann E., Rosello D. Corrosion protection with «perfect» atomic layers [Электронный ресурс] // Polymedia meichtry sa. – 2013. – Режим доступа: <http://www.polymedia.ch/OpArticles/view/57>

24. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы: устройство, принцип работы, применение. – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 54 с.;
25. Соловьев А.А. Устройства со скрещенными электрическими и магнитными полями для нанесения тонкопленочных покрытий на подложки большой площади: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2007.– 218 с.;
26. Осаждение металлических пленок путем распыления из жидкой фазы / Б.С. Данилин, М.В. Какурин, В.Е. Минайчев, В.В. Одинокоев, В.К. Сырчин. - Микроэлектроника, 1977.- с.84-87
27. Bleykher G. A., Borduleva A. O., Yuryeva A. V. The energy flux onto substrate during coating deposition using magnetron with liquid metal target //Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2016): International Congress, October 2–7, 2016, Tomsk, Russia.—Tomsk, 2016. – 2016. – С. 234.
28. Юрьева, Алена Викторовна. Расчет вакуумных систем: учебное пособие / А. В. Юрьева; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2012. — 111 с.
29. Трехмерный бесконтактный профилометр (Micro Measure 3D Station) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://portal.main.tpu.ru/departments/centre/cism/prib/measure-3d;>
30. Трехмерный бесконтактный профилометр (Micro Measure 3D Station) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://portal.main.tpu.ru/departments/centre/cism/prib/measure-3d;>
31. Vickers indentation using CSM's Micro Scratch Tester // Company «Anton Paar»: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.csm-instruments.com/Vickers-indentation-using-CSMs-Micro-Scratch-Tester;>
32. Keithley Instruments official site [Электр. ресурс] – Режим доступа: <http://www.keithley.com/> свободный. Дата обращения: 15.04.17
33. Аналитический электронный микроскоп Zeiss Supra 55/55VP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rusnanonet.ru/equipment/zeiss_supra55/;](http://www.rusnanonet.ru/equipment/zeiss_supra55/)

34. The International Centre for Diffraction Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.icdd.com/translation/rus/pdf4.htm>;
35. Юрьева А.В. Осаждение металлических покрытий с помощью магнетрона с жидкофазной мишенью: дис. канд. тех. наук. Томский политехнический университет, Томск, 2017.
36. Solovyev, A.A., Oskirko, V.O., Semenov, V.A. et al. Journal of Elec Materi (2016) 45: 4052. <https://doi.org/10.1007/s11664-016-4582-6>
37. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.
38. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
39. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
40. ГОСТ 12.1.003-8. Шум. Общие требования безопасности. - ГОСТ 12.1.029-80. Средства и методы защиты от шума.
41. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
42. ГОСТ 12.2.085-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
43. ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
44. ГОСТ 12.1.004-78. «Пожарная безопасность. Общие требования»
45. ГОСТ 12.2.062-81. Оборудование производственное. Ограждения защитные.
46. ПБ10-115-96. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

Приложение А

Раздел 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------------|---------|------|
| ОДМ61 | Николаев Михаил Вячеславович | | |

Консультант ИЯТШ НОЦ Б.П. Вейнберга:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Инженер | Сиделев Дмитрий Владимирович | | | |

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------|------|
| Старший преподаватель | Кабрышева Оксана Павловна | | | |

Chapter 2 Experimental equipment

2.1 Scheme of the experimental setup

Studies were carried out on a vacuum ion-plasma installation «vacuum equipment kit», intended for the deposition of thin film coatings on a substrate of a flat shape. The design of the system allows the deposition of coatings in the environment of the working gas or mixture of gases to produce metallic and non-metallic coatings (oxides, nitrides, etc.). Ion-plasma installation equipped with a set of magnetrons (standard MPC and MPC with liquid-phase target) and ion source with closed drift of electrons, which provides cleaning of the surface before deposition. Control of installation is performed in a manual mode. Internal structure of the installation is shown in Figure 1.

The working chamber (RC) is a sealed volume of circular cross-section. The main purpose of the working chamber is the implementation of the process of applying plasma coatings to the samples placed in it for which it contains the necessary equipment and provides required vacuum and gas environment.

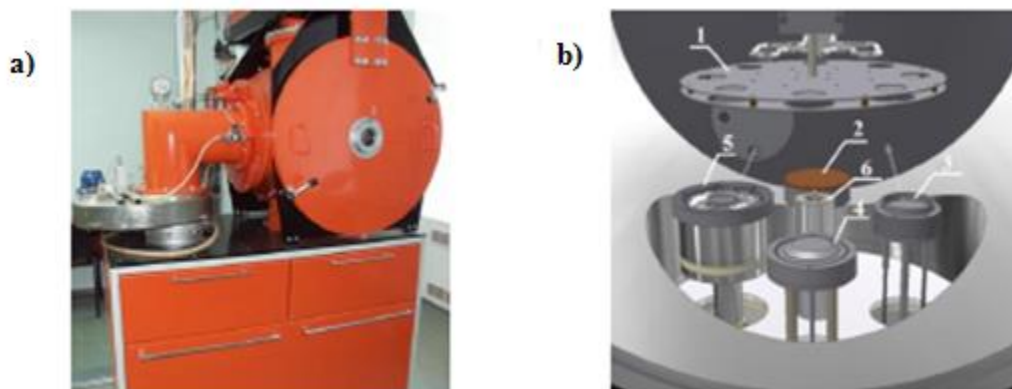


Figure 1 – The appearance of the ion-plasma installation (a) and the location of the elements inside the vacuum chamber (b): 1 – rotating table for substrates; 2 – magnetron sputtering system with a solid target; 3 – magnetron sputtering system with a liquid phase target in the form of a disk; 4 – ion source with a closed electron drift; 5 – magnetron sputtering system with a liquid-phase ring target; 6-place for the shutter.

The vacuum shutter is designed to "trim" the high-vacuum part of the pumping system from the working chamber when load and unload operations are performed

inside it. Vacuum system (Figure 2) is used to create the necessary vacuum in the working chamber of the apparatus for carrying out the deposition process. Vacuum system installation is assembled according to the standard scheme of obtaining a high vacuum on the basis of diffusion N-250 pump.

The vacuum system includes:

- Diffusion pump N-250 ;
- Rotary vane 2HBP-90;
- Mainline pumping of the diffusion pump ;
- Shutter;
- Valve vacuum solenoid;
- Valve vacuum Electromechanical

Pump 2HBP–90 is used for foreline pumping of the diffusion pump and a preliminary evacuation of the working chamber.

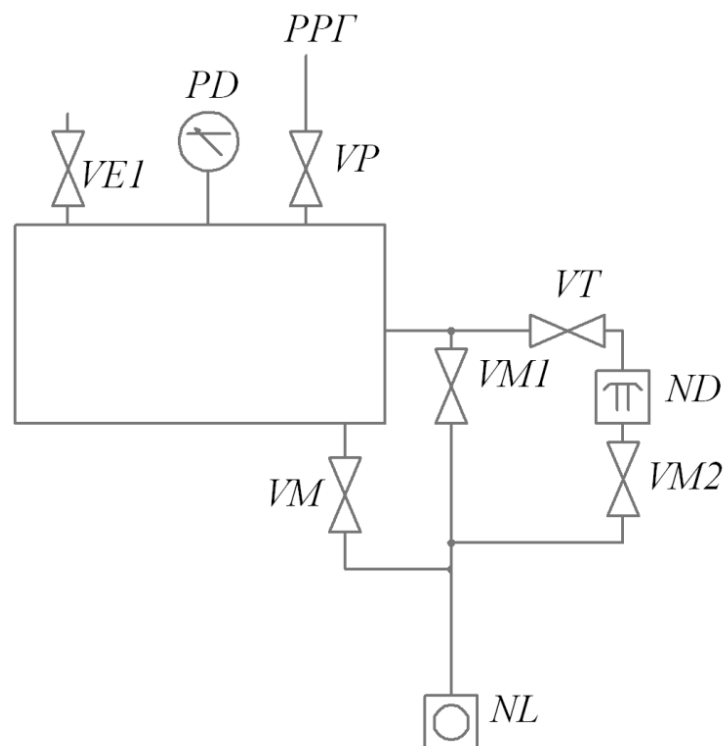


Figure 2 – Diagram of the experimental setup:

RRG – gas flow controller; VE1 – leak valve; VP – leak valve NMB-1; VT – valve with Electromechanical. drive; VM – valve with manual transmission; VM1 – valve with an electromechanical drive; VM2 – valve with an electromechanical drive;

Preparing the system for work:

- check the external condition of the live wires, cable channel and to ensure no damage and proper location;

- check position of the switches of the control panel (must be in middle or lower position);

- check the position of the manual vacuum valve (must be in closed position);

- check the position of the vacuum shutter VT (VT switch must be in position "is Closed");

the valves VE1, VE2, VP, VM1, VM2 should be in the "Closed" position).

To obtain the vacuum it is necessary to do the following:

- apply voltage to the installation by turning on the toggle switch "380 V 50 Hz" on the control panel;

- switch the vacuum gauge to warm;

- turn on the roughing pump NL button "START NL";

- turn on the diffusion pump ND click "START ND" in control panel. The output of the diffusion pump operating mode is $\sim 40\div 45$ min.;

- open the valve VM2;

When the diffusion pump reaches the work mode, the red indication light on the control panel turns off.

- close the valve VM2

- open the valve VM1;

After reaching the vacuum chamber of ~ 10 PA close VM1, and VM2 to access VT.

Unloading (loading) of the working chamber occurs in the following way:

- close the shutter VT;

- open the valve VE1.

After these operations the overlap of the atmosphere in the working chamber will occur. Download of the working chamber is carried out in the following order:

- close the door of the working chamber and lock them with latches;

- close the valve VE1.

Turning off the installation reversly.

2.2 Measurement of surface roughness and thickness of coatings

The surface topography is important for further processing of a thin film. Therefore, in this work we have investigated the roughness of the coatings. To study the roughness of the coating instrument Micro Measure 3D Station (Figure 3) was used.



Figure 3 – Device Micro Measure 3D Station

Purpose and scope:

- non-contact measurement of various depths using a set of compact optical sensors;
- choice of one, two or three axes of motion for precise positioning and scanning the surface of the object;
- analysis of hard and soft samples, including optically transparent.

The instrument is fully automated and equipped with powerful software that manages the process of scanning the sample, recording the data, their mathematical and graphical treatment. The software includes 260 different functions for processing measurement results.

The functionality of the device can be applied to such practical applications as the analysis of surface morphology, determination of structural components of steel, cast iron, non-ferrous metals, dielectric inclusions in metals, particle size analysis of

powders and then, the analysis of the thickness of nanometer layers of materials, metallographic analysis by comparison with the standards, and several others.

The Profiler operates as follows. Light beam diameter 2 μm illumination pulses with a frequency of 30 Hz, 100 Hz, 300 Hz or 1000 Hz. The frequency of light pulses is selected depending on the intensity of the reflected light depends on the surface condition (roughness, the degree of gloss or black). A beam of light is generated by a halogen lamp. Then through a fiber optic conductor, light enters the sensor, where it is formed into the beam. The height of the projections and depressions is determined from the difference of the intensities of incident and reflected light. Surface roughness is calculated from the profile, recorded on a segment of a certain length (Figure 4).

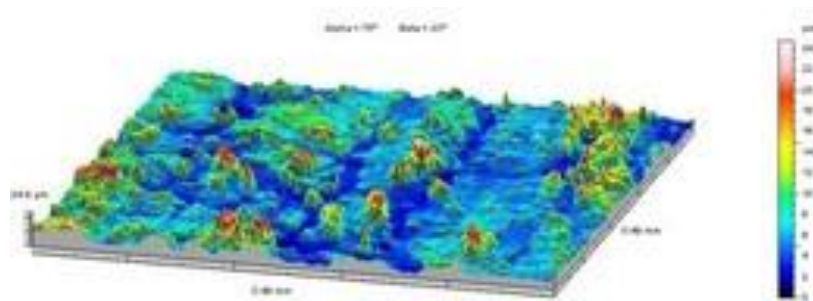


Figure 4 – 3D model of substrate surface

Three-dimensional image of the surface is formed as a result of multiple, consecutive displacement of the sample surface under the sensor. Then the analysis of the obtained profiles is carried out.

The profiler is equipped with a digital camera, allowing a tenfold increase image of the surface thin film. Using the camera it is possible to visually choose the place for surface research. The result is profilogram from which the required roughness parameters may be extracted.

The device is ideal for measuring roughness due to the small size of the light spot.

The thickness of the coating was measured in this way. Part of silicon substrate with a copper coating was immersed into solution of acetic acid, phosphoric acid,

nitric acid and water. After some time copper has been etched from the substrate in etching zone. Thickness of the film in this case is the lift height in area between pure silicon substrate and silicon substrate with copper film.

2.3 Study of adhesion strength of coatings

Adhesion is one of the most important characteristics of thin coatings. Adhesion determines the strength of adhesion of a thin film to the substrate.

The device is a Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 which is designed to study the adhesion properties and wear resistance of thin films and coatings. It is used to determine the numerical parameters of the system film/basis, such as:

- the friction force;
- the strength of adhesion;
- image of acoustic emission;
- the depth of indentation.

The most simple and fast way to assess the adhesion characteristics is the technique of scratching. Scratches on the sample were applied using a diamond indenter. During the movement of the loaded indenter, the film is scratched (Figure 5).

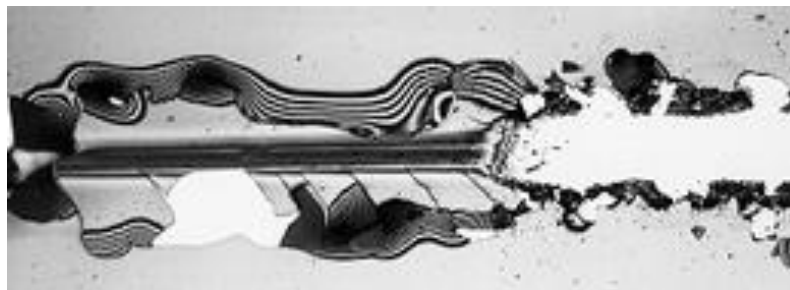


Figure 5 – The destruction of the scratch.

At a certain critical load the coating starts to break down. The travel speed of the diamond indenter was a few mm per minute. The time of the scraping of the film was determined with a microscope, all the information was displayed on the screen

and then processed. The device is a Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000 Figure 6. The interface of the work program is shown in Figure 7.



Figure 6 – The device is a Micro-Scratch Tester MST-S-AX-0000.

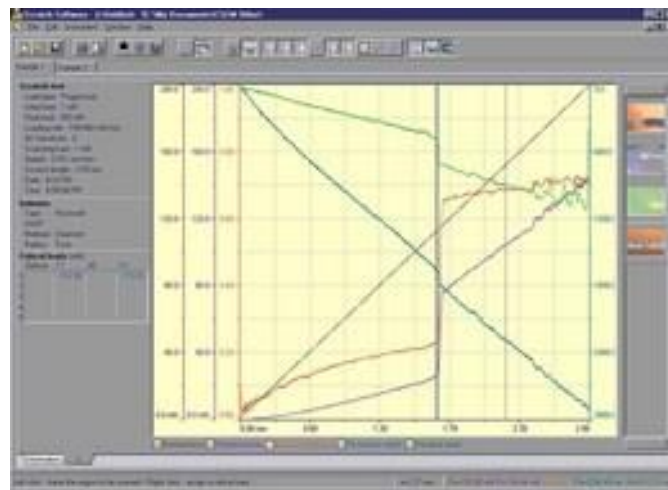


Figure 7 – Interface working program .

2.4 Measurement of electrical resistance of coatings

Measurement of the electrical resistance of the samples was performed on an automated bench diagram is presented in figure 8.

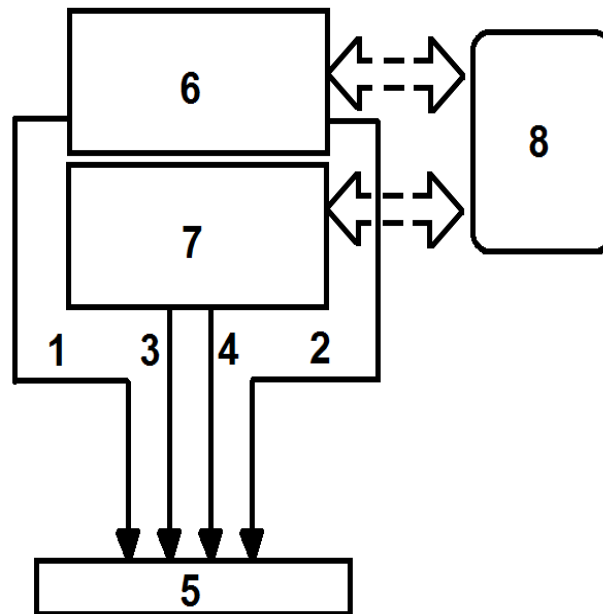


Figure 8 – Automated stand for measuring of resistivity of metals and alloys: 1, 2 – contacts for current supply to the sample, 3, 4 – contacts to measure the voltage on the section, 5 – test sample, 6 – digital current source, the 7 – digit nanovoltmeter, 8 – computer.

Resistance measurements were performed by the method of the ammeter-voltmeter, by measuring the current flowing through the measured phase resistance and the voltage drop on it. The range of the measured resistance in this work is in the area of low resistance. When conducting such measurements the main sources of error are the contact resistance and appearing at the place of contact of two dissimilar conductors, the thermal EMF. To eliminate the influence of the resistance of contacts in this complex is the so-called four-contact scheme of measuring the resistance of the sample. To eliminate the influence of thermo-EMF a special measurement mode of resistance "Delta" is used. It is based on the measurement of the voltage drop in the investigation area under different directions of current. While the thermo-EMF and its polarity does not depend on the direction of current, the voltage value does. As a result of the voltage measurement at different current directions different values of the voltage drop are obtained. The influence of thermo-EMF to the sum of the obtained values is reduced to zero. At a known value of the current, set by a digital power supply, the voltage drop was measured with a digital nanovoltmeter. Control mode "Delta" is carried out automatically using software developed by Keithley Instruments, the Values of the measured voltages were recorded by a computer, and

then occurred the calculation of the resistivity according to the formula of Ohm's law taking into account the obtained values and the known values of the current flowing through the sample. In this work the measurements were made when the current is 105 μa , changing its polarity. For each sample out 5 measurements at a temperature of 200 C were made.

2.5 Study of surface structure of thin films

Scanning electron microscopy (SEM) was used to determine the coating structure. It is a type of electron microscopy, which uses a focused electron beam to scan the surface of the sample.

The electrons interact with atoms in the sample, producing various signals that contain information about the sample's surface topography and composition.

The electron beam is scanned in a raster scan pattern, and the beam's position is combined with the detected signal to produce an image. SEM can achieve resolution better than 1 nanometer.

The most common SEM mode is detection of secondary electrons emitted by atoms excited by the electron beam. By scanning the sample and collecting the secondary electrons that are emitted using a special detector, an 2D map displaying the topography of the surface is created.

In this paper Zeiss Supra 55 (Carl Zeiss Group, Germany) microscope was used. Its characteristics are presented in table 1.

Table 2 – Technical characteristics of Zeiss Supra 55 microscope

| Parameter | Value |
|----------------------|---|
| Amplification | 12x-900000x in secondary electron mode |
| Resolution | 1,0 nm at 15 kV 1,7 nm at 1 kV 3,5 nm at 0,2 kV |
| Accelerating voltage | 20 V – 30000 V |
| Electron source | Auto emission (thermal emission type) |