

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

Физико-технический институт
Направление подготовки – Техническая физика
Кафедра экспериментальной физики

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Формирование диэлектрических слоёв на основе Si₃N₄ для тонкоплёночных МДМ-структур

УДК 539.216.2:661.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ51	Киселева Дарья Васильевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. ЭФ	Юрьев Ю.Н.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менеджмента	Рыжакина Т.Г.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ	Гоголева Т.С.	К.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭФ	Кривобоков В.П.	д.ф.-м.н., профессор		

Томск – 2017 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>		
P1	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
P2	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
P3	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
P4	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
P5	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
P6	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

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
P7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов 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»**

Физико-технический институт
Направление подготовки – Техническая физика
Кафедра экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ51	Киселевой Дарье Васильевне

Тема работы:

Формирование диэлектрических слоёв на основе Si_3N_4 для тонкоплёночных МДМ-структур
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).	1) Вакуумная установка для нанесения тонкоплёночных покрытий магнетронным осаждением. 2) Униполярные источники питания APEL-M-10PDC и MPS 3-5-9-600-PC 3) Рабочий и реактивный газы – аргон и азот соответственно. 4) Положки Si собственной проводимости. 5) Прибор Эллипс-1891САГ, предназначенный для измерения толщины плёнок. 6) Прибор ИК-Фурье спектрометр «Инфралом ФТ-801», предназначенный для исследования связей атомов в плёнке и их концентраций. 7) Рентгеновский фотоэлектронный спектрометр фирмы SPECS Surface Nano Analysis GmbH, предназначенный для исследования химического состава поверхности плёнки. 8) Требования, предъявляемые к диэлектрическому слою МДМ-конденсаторов: • толщина диэлектрика для требуемой удельной ёмкости $C = 400 \text{ пФ/мм}^2$ должна составлять приблизительно $d=160 \text{ нм}$, что соответствует диэлектрической
---	---

	проницаемости равной 7; - ток утечки 10 мкА должен соответствовать напряжению не менее 80 В; - минимальное напряжение пробоя конденсатора должно составлять 80-100 В; - срок службы МДМ конденсатора должен быть не менее 20 лет при напряжении 20 В.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1) Обзор литературы по разделам: диэлектрические плёнки нитрида кремния, их свойства и применение; способы получения плёнок нитрида кремния (плазмохимическое осаждение и магнетронное осаждение). 2) Описание экспериментального оборудования и методик исследования свойств покрытий: толщины, показателя преломления, связей атомов в плёнках и их концентраций, химического состава, морфологии поверхности и профиля плёнок, электрических характеристик МДМ-структур, предположительного время работы МДМ-конденсатора. 3) Изучение влияния режимов осаждения и параметров источника питания на свойства получаемых покрытий Si_3N_4 с обоснованием выбора параметров, обеспечивающих получения состава плёнок близкого к стехиометрическому. 4) Исследование сформированных на основе выбранных режимов осаждения тонкоплёночных МДМ-структур и измерение их электрических характеристик. 5) Обобщение полученных результатов и формулировка рекомендаций для дальнейших исследований процессов формирования плёнок нитрида кремния с помощью MPC.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	- титульный лист; - актуальность работы; - цель работы и решаемые задачи; - свойства, области применения и способы получения; - магнетронная распылительная система; - схема вакуумной установки; - методика осаждения; - скорость осаждения; - показатели преломления; - связи атомов в плёнке и их концентрации; - морфология поверхности и профиль плёнки; - формирование МДМ-структур и их электрические характеристики; - испытания на надёжность МДМ-структур; - заключение; - публикации.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Литературный обзор	Юрьев Ю.Н., зав. лаб. каф. ВЭПТ ТПУ
Экспериментальная часть	Юрьев Ю.Н., зав. лаб. каф. ВЭПТ ТПУ
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Рыжакина Т.Г., доцент каф. МЕН ИСГТ ТПУ
Социальная ответственность	Гоголева Т.С., ассистент каф. ПФ ФТИ ТПУ
Иностранный язык	Зяблова Н.Н., ст. преп. каф. ИЯ ФТИ ТПУ
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	1) Диэлектрические плёнки нитрида кремния 2) Описание экспериментального оборудования и методик исследования свойств покрытий 3) Осаждение плёнок нитрида кремния и формирование МДМ-структур 4) Description of experimental equipment

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. ЭФ	Юрьев Ю.Н.	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ51	Киселева Дарья Васильевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ51	Киселевой Дарье Васильевне

Институт	ФТИ	Кафедра	ЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Техническая физика

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Использование информации, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах и изданиях, нормативно-правовых документах.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта.
2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски.	Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НТИ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.	Проведение оценки экономической эффективности исследования.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Оценка готовности проекта к коммерциализации
4. Календарный план-график и бюджет НТИ
5. Матрица ответственности и план управления коммуникациями НТИ
6. Реестр рисков
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
8. Сравнительная эффективность разработки

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Рыжакина Татьяна Гавриловна	К.Э.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ51	Киселевой Дарье Васильевне		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ51	Киселевой Дарье Васильевне

Институт	ФТИ	Кафедра	ЭФ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Техническая физика

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	– вредных факторов производственной среды: метеоусловия, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения; – опасных факторов производственной среды: соприкосновение с механическими подвижными частями, вероятность поражения электрическим током, вероятность возникновения пожара и взрыва.
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	-электробезопасность; -пожаровзрывоопасность; -требования безопасности при обращении с газовыми баллонами; -требования охраны труда при работе на ПЭВМ -требования безопасности при работе на вакуумной установке.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные защитные средства)
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ51	Киселева Дарья Васильевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 140 страниц, 39 рисунков, 37 таблиц, 76 источников, 1 приложения на английском языке.

Ключевые слова: планарный магнетрон, показатель преломления, диэлектрические плёнки, нитрид кремния, тонкие плёнки, диэлектрическая проницаемость, МДМ-структура, ИК-Фурье спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

Объектом исследования являются диэлектрические плёнки нитрида кремния, полученные с помощью магнетронной распылительной системы, и их свойства.

Цель работы – исследование процессов формирования плёнок на основе нитрида кремния с высокими диэлектрическими свойствами в зависимости от режимов осаждения и параметров источника питания магнетронной распылительной системы (МРС).

В процессе исследования проводились: определение толщины и скорости осаждения плёнок нитрида кремния, получение покрытий с использованием разных источников питания магнетрона, исследование свойств полученных покрытий (показателя преломления, связей атомов и их концентраций, диэлектрической проницаемости), изучение морфологии поверхности и профиля плёнок, измерение ёмкости, пробивного напряжения и предположительного времени работы МДМ-конденсаторов, описание полученных результатов.

В результате исследования была изучена методика осаждения диэлектрических плёнок нитрида кремния с помощью планарной МРС, получены плёнки нитрида кремния с хорошими диэлектрическими свойствами. Было показано, что свойства получаемых покрытий зависят от параметров осаждения и типа источника питания.

Область применения: диэлектрические слои тонкоплёночных МДМ-конденсаторов интегральных микросхем в микроэлектронной промышленности.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	12
1 ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЁНКИ НИТРИДА КРЕМНИЯ	15
1.1 Применение тонких плёнок нитрида кремния в микроэлектронике	15
1.3 Способы получения плёнок нитрида кремния.....	19
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДИК ИССЛЕДОВАНИЯ.....	30
2.1 Установка ионно-плазменного осаждения покрытий	30
2.2 Измерение толщины покрытий профилометром серии XP 2 Stylus.....	33
2.3 Измерение толщины покрытий эллипсометрическим комплексом ЭЛЛИПС-1891САГ	34
2.4 Исследование химического состава плёнок Si_3N_4 рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией	36
2.5 Исследование присутствующих в плёнках связей атомов и их концентраций методом ИК-Фурье спектроскопии.....	36
2.6 Измерение электрических свойств полупроводниковых приборов с помощью зондовой станции SUSS PM5 и Л2-56.....	40
2.7 Исследование морфологии поверхности и профиля плёнки сканирующей электронной микроскопией.....	41
2.8 Испытания на надёжность методом TDDb (time-dependent dielectric breakdown).....	45
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	48
4.1 Анализ потенциальных потребителей и конкурентных технических решений.....	48
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	48
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	48
4.1.2 SWOT-анализ.....	49
4.1.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	50

4.2 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	52
4.3 Инициация проекта	53
4.4 Планирование управления научно-техническим проектом.....	56
4.4.1 Иерархическая структура работ проекта	56
4.4.2 Контрольные события проекта	57
4.5 Бюджет научного исследования	60
4.5.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты.....	60
4.5.2 Специальное оборудование для научных работ	61
4.6 Основная заработная плата	62
4.7 Дополнительная заработная плата персонала.....	64
4.8 Отчисления на социальные нужды	64
4.9 Накладные расходы.....	65
4.10 Научные и производственные командировки и оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями.....	65
4.11 Организационная структура проекта	67
4.12 Матрица ответственности	67
4.13 План управления коммуникациями проекта.....	69
4.14 Реестр рисков проекта	69
4.15 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	70
4.15.1 Динамические методы экономической оценки инвестиций	70
4.15.2 Чистая текущая стоимость (NPV).....	71
4.15.3 Дисконтированный срок окупаемости.....	72
4.15.4 Внутренняя ставка доходности (IRR)	73
4.15.5 Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (PI)	75
4.15.6 Оценка сравнительной эффективности исследования	75
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	79

ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические плёнки нитрида кремния нашли широкое применение в микроэлектронной промышленности в качестве диэлектрических слоев в МДМ (металл-диэлектрик-металл)- и МДП (металл-диэлектрик-полупроводник)- структурах, масок при окислении и пассивирующих покрытий [1-6]. Они обладают уникальным сочетанием физических, механических и химических свойств, такие как:

- высокая диффузионная стойкость по отношению к ионам щелочных металлов и влаге,
- хорошие изолирующие и диэлектрические свойства,
- повышенная химическая стойкость в агрессивных жидких и газовых средах, в том числе при проведении фотолитографических операций,
- химическая инертность по отношению к полупроводниковым, диэлектрическим и металлическим материалам и др.,
- высокая термическая стабильность [1,2,4,5].

В настоящее время среди способов получения нитрида кремния наибольшее распространение получили методы плазмохимического осаждения, особенностью которых зачастую является нагрев подложек до достаточно высоких температур, что приводит к образованию структурных дефектов в полупроводниках и термической деформации подложек и, как следствие, снижению выхода годных приборов. Поэтому все более актуальной задачей является разработка низкотемпературных методов получения тонких диэлектрических плёнок Si_3N_4 различного функционального назначения.

Для этого может быть успешно использован метод магнетронного распыления, который позволяет получать покрытия с высокими функциональными характеристиками при достаточно высоких скоростях осаждения, а также без использования токсичных реагентов в виде силана и аммиака, применяемых при плазмохимическом осаждении [7,8].

Однако качество получаемых при магнетронном распылении плёнок зависит от целого ряда технологических факторов: давление в рабочей камере, соотношение потоков плазмообразующих газов, состояние поверхности подложки перед осаждением, а также параметров источника питания (ИП) магнетрона.

Таким образом, **целью** магистерской работы является исследование процессов формирования плёнок на основе нитрида кремния с высокими диэлектрическими свойствами в зависимости от режимов осаждения и параметров источника питания магнетронной распылительной системы (МРС).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) исследовать особенности работы магнетронной распылительной системы при осаждении диэлектрических плёнок нитрида кремния;
- 2) определить рабочие режимы, при которых образуются покрытия, близкие по составу к стехиометрическому Si_3N_4 ;
- 3) сформировать МДМ-конденсаторы, используя в качестве диэлектрика покрытия, осажденные при режимах, полученных в п.2;
- 4) измерить электрические характеристики полученных МДМ-структур (емкость, пробивное напряжение) и выбрать оптимальные технологические параметры, обеспечивающие получение плёнок нитрида кремния со следующими свойствами:
 - толщина диэлектрика для требуемой удельной емкости $C = 400 \text{ пФ/мм}^2$ должна составлять приблизительно $d = 160 \text{ нм}$, что соответствует диэлектрической проницаемости равной 7;
 - ток утечки 10 мкА должен соответствовать напряжению не менее 80 В ;

- минимальное напряжение пробоя конденсатора должно составлять 80-100 В;
- срок службы МДМ конденсатора должен быть не менее 20 лет при напряжении 20 В.

Апробация результатов исследования. Основные материалы работы были представлены и обсуждались на научных конференциях:

1. VIII Всероссийская (с международным участием) научно-техническая конференция «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», Казань 2016.
2. XIV Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск 2017.

1 ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЁНКИ НИТРИДА КРЕМНИЯ

Нитрид кремния является бинарным неорганическим химическим соединением, представляющим собой соединение кремния и азота и имеющим две стабильные (α и β) модификации [3,9,10,12]. Пространственное расположение атомов для элементарной ячейки α - Si_3N_4 : $a=0,7765\text{нм}$, $c=0,5623\text{нм}$, пространственная группа $P31c$, тригональная сингония; для β - Si_3N_4 : $a=0,7605\text{нм}$, $c=0,2908\text{нм}$, пространственная группа $P6_3/m$, гексагональная сингония.

При температурах ниже 1150°C устойчивой является α -модификация, при более высоких температурах стабильна β -форма [3,9,10,12]. α -фаза характеризуется высокой твёрдостью, по сравнению с β - Si_3N_4 , при этом α - Si_3N_4 является химически неустойчивой. При достижении жидкой фазы α -модификация переходит в β -форму. Вследствие чего, β - Si_3N_4 модификация является основной формой.

Нитрид кремния обладает высокой диэлектрической проницаемостью по сравнению с оксидом кремния (около 7, в то время как у SiO_2 — 3,9). Показатель преломления Si_3N_4 при длине волны 588 нм равен 2,02. Ширина запрещенной зоны равна 4,0 эВ. Температура плавления выше 1500°C . Окисляется на воздухе свыше 900°C и не взаимодействует с водородом до 1200°C .

1.1 Применение тонких плёнок нитрида кремния в микроэлектронике

Впервые диэлектрические слои нитрида кремния были использованы в технологии микроэлектронных устройств в 1964-1965 гг. американскими исследователями [9,11,13]. Они обнаружили, что слои Si_3N_4 обладают хорошими маскирующими свойствами по отношению к ионам различных металлов [9,11,13]. Вскоре стали известны уникальные свойства нитридных слоёв — маскировать полупроводник относительно действия кислорода и паров воды при температурах свыше 1000°C . С использованием этого

явления был разработан метод локального окисления кремния, который в настоящее время широко используется в технологии микроэлектронных устройств [9].

Тонкие плёнки нитрида кремния обычно получают по реакциям взаимодействия силана с аммиаком (или азотом) в интервале температур 100-400 °С. При этом установлено, что от условий синтеза сильно зависят важные параметры: диэлектрическая проницаемость, показатель преломления и др [1,9,13,14]. В силу таких результатов следует, что диэлектрические плёнки, получаемые по реакциям взаимодействия силана с аммиаком (или азотом), представляют собой слои с непостоянным составом Si_3N_4 и с высокими содержанием водорода (10-20%), связанного с кремнием или азотом [1,9,13,14]. Проведение последующего отжига при высоких температурах (свыше 1000 °С) приводит к приближению состава к Si_3N_4 и уменьшению содержания водорода в плёнках, но не вовсе исключению из них.

К основным характеристикам плёнок нитрида кремния, обеспечивающим повышенный интерес специалистов в области микроэлектроники, в первую очередь относятся следующие [1,14]:

- высокая диффузионная стойкость по отношению к влаге, ионам щелочных металлов, а также диффундирующим элементам, широко применяемых в электронной технике;
- хорошие электроизолирующие и диэлектрические свойства (удельное пробивное напряжение 10^7 В/см, тангенс угла диэлектрических потерь составляет 1-10" и др.);
- повышенная химическая стойкость в агрессивных газовых и жидких средах (в том числе в условиях высоких температур), не исключающая, однако проведения фотолитографических операций;
- химическая инертность по отношению к материалам (полупроводникам, диэлектрикам, металлам и т.д.), широко применяемым в технологии полупроводниковых приборов;
- высокая термическая стабильность.

Сейчас диэлектрические плёнки Si_3N_4 находят все более широкое применение в производстве интегральных микросхем и полупроводниковых приборов для защиты поверхности кремниевой, арсенид галлиевой подложек при осуществлении процессов локальной диффузии, локального окисления, локального травления, для защиты готовых структур от окружающей среды, а также в качестве диэлектрического слоя в МДМ-структурах [1-6].

Кроме того, благодаря высокому показателю преломления, плёнки нитрида кремния нашли широкое применение в оптике [14-16]. При этом показатель преломления может регулироваться соотношением потоков рабочих газов. Например, варьированием отношения NH_3/SiH_4 при плазмохимическом или Ar/N_2 при магнетронном осаждении [7,14-16].

1.2 Тонкоплёночные МДМ-структуры

В силу наличия уникального сочетания свойств нитрид кремния является неотъемлемой частью тонкоплёночных МДМ-конденсаторов, использующихся в совмещенных интегральных микросхемах. МДМ-структура, схема которой приведена рисунке 1, состоит из двух металлических слоев-обкладок, разделенных диэлектрическим слоем. В качестве обкладок используют Au с адгезионным подслоем Ti .

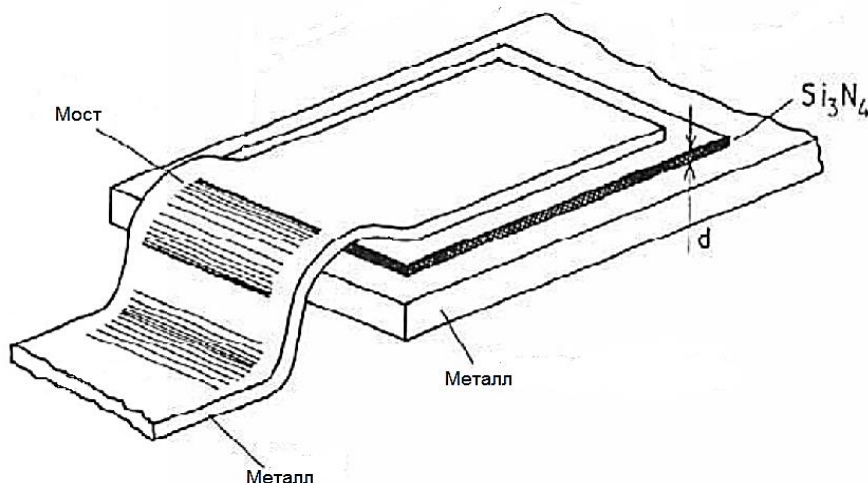


Рисунок 1 – Схема тонкоплёночной МДМ-структуры [17]

К основным электрическим параметрам тонкоплёночного МДМ-конденсатора относятся [17,18]:

- 1) диэлектрическая проницаемость ε . Она является одной из важнейших характеристик диэлектрика и показывает, во сколько раз уменьшается кулоновское взаимодействие между зарядами при переносе их из вакуума в данную среду. Величина ε отражает увеличение емкости конденсатора при замене в нем вакуума диэлектриком.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d},$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см – электрическая постоянная, S – площадь перекрытия пластин конденсатора, d – расстояние между ними. Диэлектрическая проницаемость зависит от материала, температуры, частоты и напряженности поля.

- 2) Электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ диэлектрических плёнок. Величина, характеризующаяся напряженностью электрического поля, при которой происходит локальное разрушение диэлектрика с образованием проводящего канала:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d},$$

где $U_{\text{пр}}$ – пробивное напряжение, d – толщина диэлектрика. Пробой диэлектрических плёнок вызывается, как тепловыми, так и электрическими процессами.

- 3) Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$. Он является количественной мерой потерь в данном диэлектрике. Эти потери обусловлены свойствами материала диэлектрика и определяются суммой миграционных и дипольно-релаксационных потерь. Миграционные потери связаны с электропроводностью в диэлектрике, уменьшаются с увеличением частоты по гиперболическому закону и увеличиваются по экспоненциальному закону с ростом температуры. Дипольно-релаксационные потери обусловлены процессами ориентации диполей в электрическом поле при их хаотических, обусловленных тепловым движением, колебаниях около среднего положения равновесия.

- 4) Равномерность осаждаемой плёнки по всей поверхности полупроводниковой подложки диаметром 100 мм не должна превышать 4 %.
- 5) Срок службы МДМ конденсатора должен быть не менее 20 лет при напряжении 20 В.
- 6) МДМ-конденсаторы должны занимать минимальную площадь.
- 7) Должны обладать хорошей добротностью и высокой температурной и временной стабильностью.
- 8) Диэлектрик должен иметь хорошую адгезию к подложке и материалу обкладок, не разрушаться в процессе формирования плёнок и быть совместимым с технологическими процессами изготовления других элементов микросхем.

МДМ-конденсаторы, как и МДП-конденсаторы работают при любой полярности. Их главным недостатком является необратимый отказ в случае пробоя диэлектрика. Исходя из этого, необходимо сформировать требования, предъявляемые к тонкоплёночным МДМ-конденсаторам.

1.3 Способы получения плёнок нитрида кремния

Плёнки нитрида кремния можно получить различными способами: плазмохимическое осаждение из газовой фазы [1,9,13,14,17] и магнетронное осаждение [2,4,7-9,12,15].

Плазмохимическое осаждение из газовой фазы

Плазмохимическое осаждение из газовой фазы является основным методом, позволяющим получать плёнки нитрида кремния при сравнительно низких температурах (100-400°C).

Данный метод основан на реакции химического взаимодействия исходных газообразных реагентов, приводящих к образованию плёнки на поверхности твердого тела, посредством передачи энергии частицам, необходимых для протекания химических реакций. Процессы происходят в плазме высоко- и сверхвысокочастотных разрядов низкого давления.

Температура электронов образующейся плазмы составляет вплоть до нескольких тысяч Кельвинов (типичное значение для ВЧ разряда $2 \cdot 10^4$ К). Протекание химических реакций позволяет облегчить образование большого количества активных частиц, таких как радикалы, молекулы в возбужденном состоянии, ионы и ион-радикалы за счёт соударений высокоэнергетичных электронов с молекулами исходных реагентов. При этом как облучение поверхности подложки интенсивным излучением видимого и ультрафиолетового диапазонов, так и бомбардировка ее частицами способствует более активному протеканию поверхностных процессов [1,5,6].

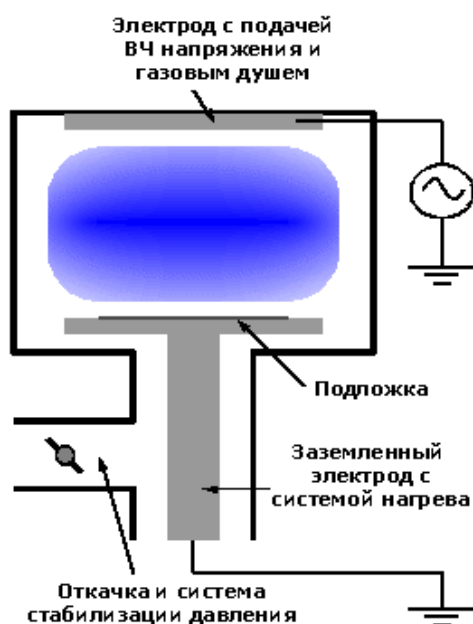
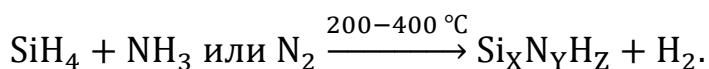


Рисунок 2 – Схема плазмохимического осаждения [1]

При осаждении нитрида кремния в тлеющем ВЧ разряде обычно используются исходные реагенты в виде силана и аммиака или азота и реакция протекает следующим образом [9,13,14]:



Когда в качестве источника азота используют молекулярный азот, то из-за его значительно меньшей скорости диссоциации по сравнению с SiH_4 нужен большой избыток азота ($\text{N}_2/\text{SiH}_4 \gg 10^2 \dots 10^3$) в процессе, чтобы избежать образования обогащенной кремнием плёнки. Аммиак, напротив, может диссоциировать многоступенчато с потреблением малой энергии, что обеспечивает формирование плёнки активным азотом [1,9,14].

Плазмохимическое осаждение из газовой фазы с индукционным возбуждением разряда

Данная технология является методом низкотемпературного осаждения Si_3N_4 плёнок, в котором индукционная катушка создает высоко – плотную, большого диаметра плазму, в маленьком диапазоне давлений.

Технология позволяет проводить процесс при более низком рабочем давлении, сократить количество газа необходимого для осаждения, а также понизить температуру процесса. Типовые значения расхода газов для неё составляют от 10 до 50 $\text{см}^3/\text{мин}$. Более низкая скорость осаждения позволяет производить более точный контроль над параметрами тонких плёнок, а процессы могут протекать при температуре в диапазоне от 50 °С и выше.

При получении кремнийсодержащих соединений требуется исходный газ силан (SiH_4) (рисунок 3).

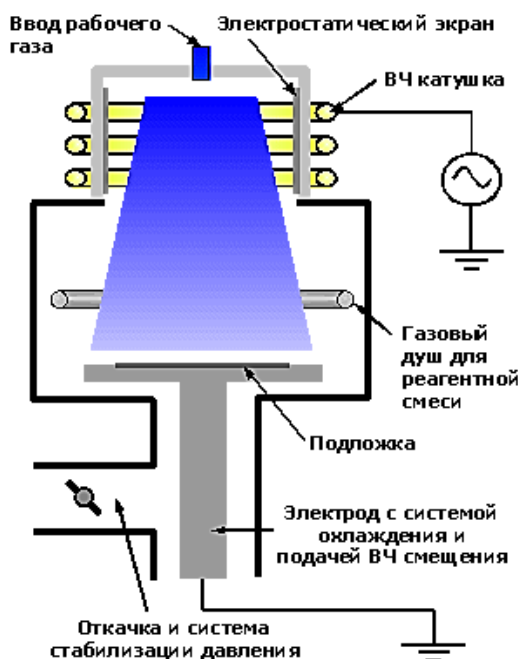


Рисунок 3 – Схема плазмохимического осаждения с индукционным возбуждением плазмы [14]

Силан поступает в реактор через газораспределительное кольцо, окружающее стол. Второй рабочий газ вводится через верхнюю часть камеры, где ВЧ-катушка ионизирует его, создавая различные радикалы и ионы. Электростатическая разность потенциалов между плазмой и столиком

движет ионы к поверхности пластины, где они химически соединяются с силаном, создавая плёнку. Типичный добавочный газ для нитрида кремния – N_2 [14,19].

Отношение потока добавочного газа к потоку силана может быть использовано для изменения показателя преломления осажденного материала. Для плёнки нитрида кремния с показателем преломления 2,0 отношение потоков газов SiH_4 к N_2 - от 1,18 до 1,28.

Значение показателя преломления также зависит от давления в камере во время процесса и подводимой ВЧ-мощности [14,19].

Немаловажным параметром является напряженность (сила с которой плёнка сжимает или разжимает пластину, стресс) плёнки. Его можно регулировать, меняя давление в камере, подводимую мощность. Значение напряжения плёнки может меняться с отрицательного на положительный, и также возможно нулевое значение [19,20].

Побочным продуктом реакции силана и азота является водород, который должен улетучиваться, но некоторая часть все-таки попадает в плёнку. Количество его в плёнке зависит от технологических параметров и отрицательно влияет на качество плёнки [19,20].

Главное преимущество данной технологии по сравнению с классическим плазмохимическим осаждением - это его низкая температура. Это позволяет обеспечить минимальную деградацию устройства при высоких температурах.

Магнетронное распыление

В данной системе формирование тонкой плёнки нитрида кремния происходит в результате распыления мишени в среде смеси газов Ar и N_2 в плазме аномального тлеющего разряда [21].

Процесс характеризуется высокой скоростью распыления, благодаря высокой плотности ионного тока, при котором плазма тлеющего разряда локализована у распыляемой поверхности сильным поперечным магнитным полем.

Принцип действия МРС показан на рисунке 4 [21-23]. Основными элементами такой системы являются магнитная система, анод, мишень-катод, рабочий газ – аргон. Силовые линии магнитного поля запираются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишень, расположенная между местами входа-выхода линий магнитного поля, подвергается интенсивному распылению в виде замкнутого трека, определяемого формой полюсов магнитной системы.

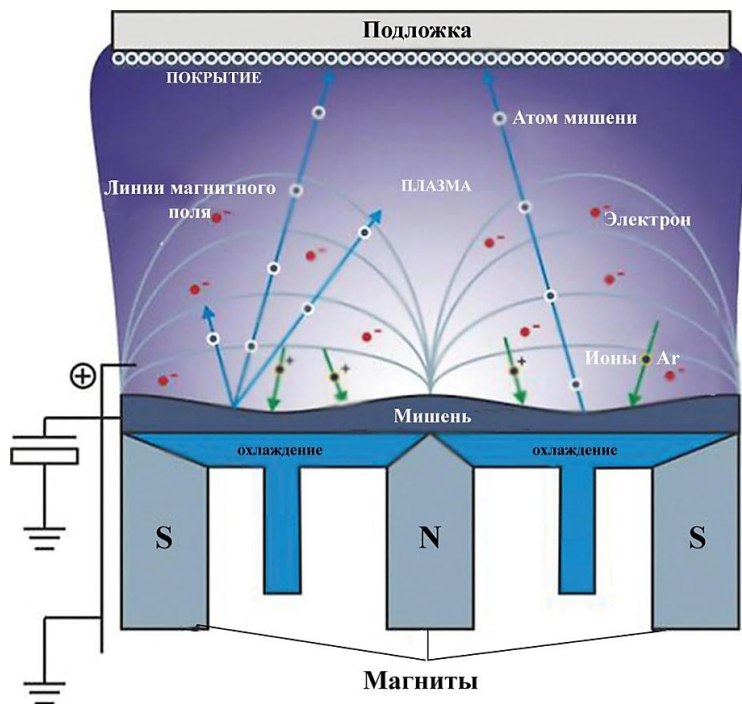


Рисунок 4 – Принцип магнетронного нанесения покрытий [24].

Электроны под действием ионной бомбардировки вырываются с поверхности катода. Они начинают совершать сложное циклоидальное движение у поверхности мишени, захватываясь и удерживаясь магнитным полем. Электроны под действием магнитного поля, возвращаясь на катод, который их отталкивает, находятся в ловушке. Внутри этой ловушки они циклируют пока не произойдет несколько столкновений с атомами газа, и электроны не потеряют энергию, полученную от электрического поля.

Магнетронное распыление обладает рядом преимуществ по сравнению с другими физическими способами нанесения покрытий:

- широкое разнообразие составов осаждаемого материала;
- хорошая адгезия плёнки с подложкой;

- высокая скорость распыления при низких рабочих напряжениях (600-800 В) и при небольших давлениях рабочего газа ($5 \cdot 10^{-1}$ -10 Па) [25];
- отсутствие перегрева подложки;
- малая степень загрязнения плёнок;
- возможность получения равномерных по толщине плёнок на большой площади подложек.

Однако, при осаждении соединений, таких как нитрид кремния, могут возникать нежелательные эффекты:

- проблема «исчезающего анода» [26];
- нестабильность параметров работы;
- электрические пробой.

В результате данных явлений работа магнетрона может быть сильно затруднена или может вовсе прекратиться.

Реактивное магнетронное распыление

Реактивное распыление применяется для нанесения плёнок химических соединений (оксидов, нитридов и т.д.). Требуемое химическое соединение получают, подбирая материал распыляемой мишени и реактивный газ. Реактивным газом чаще всего являются кислород, азот, ацетилен.

Химическая реакция на поверхности мишени с образованием соединения создает основные проблемы реактивного распыления: проблема «исчезающего анода», появление электрических пробоев на поверхности мишени и гистерезис электрических параметров разряда.

При бомбардировке положительными ионами из плазмы разряда выросшего слоя диэлектрика на поверхности последнего скапливается положительный заряд (рисунок 5). Этот заряд притягивает к поверхности раздела диэлектрик – металл электроны из мишени, образуя в диэлектрике сильное электрическое поле. Так образуется конденсатор. Напряжение на этом конденсаторе растёт со временем и в пределе может сравняться с напряжением источника питания [26]. В конечном счёте, это приводит к

пробую. Его результатом может быть загрязнение покрытия выделение газов, влияющих на режим разряда.

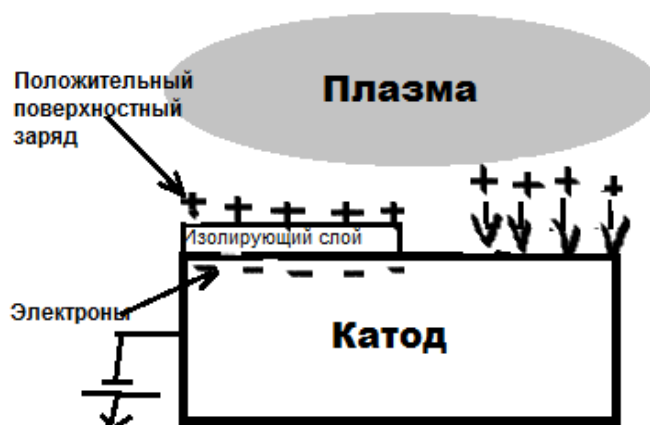


Рисунок 5 – Накопление положительного заряда на поверхности диэлектрического слоя

В процессе реактивного распыления также существует проблема образования гистерезиса электрических параметров разряда, который приводит к идентичному поведению скорости распыления. На рисунке 6 представлены зависимость скорости распыления металлической мишени от величины потока реактивного газа, подаваемого в камеру.

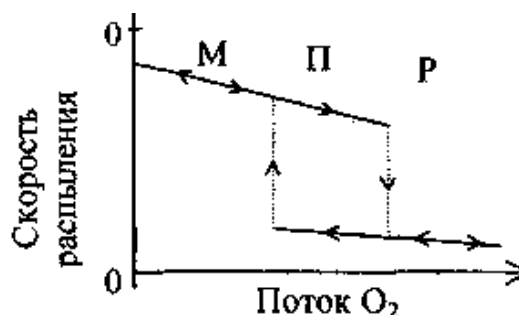


Рисунок 6 – Диаграмма зависимости скорости осаждения покрытия от потока O_2 в процессе реактивного распыления

Для примера в качестве такого газа взят кислород. Зависимость имеет три характерные области или режима: режим распыления металла (М), в котором металлическая мишень практически не «отравлена»; режим (Р) явного реактивного распыления, в котором мишень сильно «отравлена» и распыляется соединение металла с газом; гистерезисная переходная область (П) [22]. В режиме М скорость распыления и геттерирование реактивного газа — максимальные. Наоборот, в режиме Р они — минимальные, поскольку

коэффициент распыления оксидных и нитридных соединений существенно ниже коэффициента распыления чистого металла. Состав осаждаемой плёнки в режиме М - близкий к материалу мишени, но с примесями газового элемента; в режиме Р - близкий к стехиометрическому. Режим П - нестабильный с выраженным гистерезисом. Стрелки на графиках показывают, как ведёт себя распылительная система при увеличении потока напускаемого реактивного газа или его уменьшении. Реальные характеристики зависят от многих факторов (рода газа, материала мишени, плотности тока, параметров откачки, способа стабилизации рабочего режима) [22].

По мере добавления реактивного газа в камеру получаемая в реактивном процессе плёнка растёт медленнее и поглощает уже значительно меньше реактивного газа, его давление в камере возрастает, и это ускоряет образование соединения на поверхности мишени. В результате при некоторой критической постоянной величине потока реактивного газа в камеру имеет место резкий переход от почти чистой поверхности мишени к поверхности, полностью покрытой соединением. Этот переход сопровождается таким же резким изменением остальных параметров процесса.

В ходе формирования диэлектрических покрытий возникает проблема исчезающего анода. Под этой проблемой подразумевается потеря анодом способности притягивать электроны, в результате покрытия поверхности анода диэлектрической плёнкой. Эта диэлектрическое покрытие не позволяет замкнуть электрический ток и в результате происходит гашение разряда.

Рассмотрим основные способы устранения проблем, возникающих при реактивном распылении.

Способы устранения проблем реактивного распыления

Полное удаление слоя химического соединения с поверхности мишени – один из способов устранить пробой. Существует несколько конструкций магнетронов, способных снизить количество пробоев, устранив

возможность образования толстого слоя диэлектрика вне зоны эрозии. Рассмотрим планарный магнетрон с прямоугольной мишенью.

Для борьбы с образованием диэлектрика в случае использования одиночного магнетрона в работе [27] предлагается подключать его вместе с парой анодов к источнику питания переменного тока ($\sim 40\text{--}100$ кГц), согласно схеме на рисунке 7.

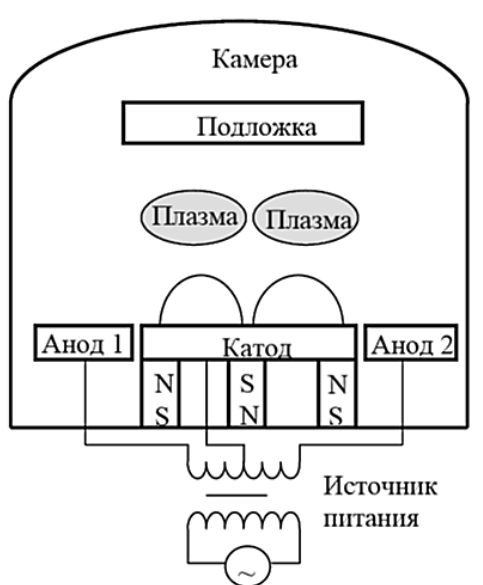


Рисунок 7 – Схема МРС с дублирующим анодом

Система работает следующим образом. Когда анод 1 становится положительным относительно анода 2, то он начинает собирать электроны. Если его размеры достаточны и магнитное поле отсутствует, его потенциал становится близким к потенциалу плазмы. В это время катод и анод 2 находятся под отрицательным потенциалом относительно плазмы и подвергаются распылению. Затем полярность напряжения на анодах меняется, а катод продолжает оставаться под тем же отрицательным напряжением, равным половине полного напряжения на вторичной обмотке. Потенциальной проблемой такой системы является необходимость распыления поверхности анодов для поддержания их чистоты. Это может привести к попаданию материала анода на подложку [28].

Благодаря постоянному присутствию чистого анода на неизменном расстоянии достигается большая стабильность работы магнетрона. В связи с

этим становится возможным контроль и удержание параметров разряда в области вольт-амперной характеристики (ВАХ), где наблюдается переход между режимами осаждения металлической и диэлектрической плёнки. Данная область интересна тем, что там можно реализовать процесс с высокой скоростью осаждения диэлектрического покрытия.

Для устранения гистерезиса в работах [30-32] предлагается использовать метод увеличения скорости откачки, уменьшения скорости нанесения, уменьшение площади мишени.

Увеличение скорости откачки

Устранение гистерезиса можно достичь, добиваясь значительного превышения скорости откачки вакуумными насосами над скоростью поглощения реактивного газа растущей плёнкой. В работе [26] было предложено устранение гистерезиса из характеристик реактивного разряда, увеличивая скорость откачки вакуумной камеры. Действительно, при заданном потоке реактивного газа его парциальное давление в камере определяется суммой скоростей откачки насосом и поглощения растущей плёнкой. Поэтому чем больше скорость откачки насосом, тем меньше степень парциального давления реактивного газа зависит от свойств плёнки и определяется, в основном, потоком в камеру и скоростью откачки камеры вакуумным насосом. Таким способом устраняется обратная связь между парциальным давлением реактивного газа и состоянием поверхности мишени. Поэтому при достаточно высокой скорости откачки гистерезис исчезает. Этот вывод теоретически и экспериментально подтверждён в работе [22].

К сожалению, такому способу присущ существенный недостаток: дороговизна высокоскоростных откачных средств, особенно в случае высокопроизводительных промышленных напылительных установок.

Уменьшение скорости нанесения

Если не увеличивать скорость откачки насосом, а снизить скорость поглощения реактивного газа плёнкой, то реализуется ситуация, аналогичная

ситуация предыдущего способа. Действительно, чем меньше скорость роста плёнки и, соответственно, скорость поглощения ею реактивного газа, тем меньше парциальное давление реактивного газа зависит от скорости роста плёнки и состояния мишени, а определяется, как в предыдущем случае, его потоком в камеру и скоростью откачки камеры вакуумным насосом. Поэтому устраняется обратная связь между парциальным давлением реактивного газа и состоянием поверхности мишени, и гистерезис из характеристик исчезает.

Частным вариантом такого способа является поведение процесса при мишени, полностью покрытой плёнкой химического соединения. В этом случае скорость распыления невелика и не влияет на парциальное давление реактивного газа в разряде. Поэтому все режимы в таком процессе стабильны. Свойства плёнок хорошо воспроизводятся. Однако получаемые при этом плёнки имеют сверхстехиометрический состав, и такой режим проведения процесса далёк от оптимального [32].

Таким образом, очевидным недостатком этого способа является получение плёнки только сверхстехиометрического состава при принципиально низких скоростях нанесения.

Уменьшение площади мишени

Как правило, чем больше поток реактивного газа в камеру, тем больше степени покрытия химическим соединением поверхностей мишени и плёнки. Но ход этих зависимостей не одинаков. Он зависит от соотношения площадей мишени и приёмной поверхности (подложки и арматуры). В работе [26] показано, что чем меньше относительная площадь мишени, тем меньше её степень покрытия поверхности. Соответственно меньше вероятность появления гистерезиса на характеристиках разряда. Более того, при заданной площади приёмной поверхности существует некоторая критическая величина площади мишени, ниже которой гистерезис в характеристиках процесса не наблюдается.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДИК ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Установка ионно-плазменного осаждения покрытий

Работа осуществлялась на установке ионно-плазменного осаждения покрытий, фотография которой представлена на рисунке 8.

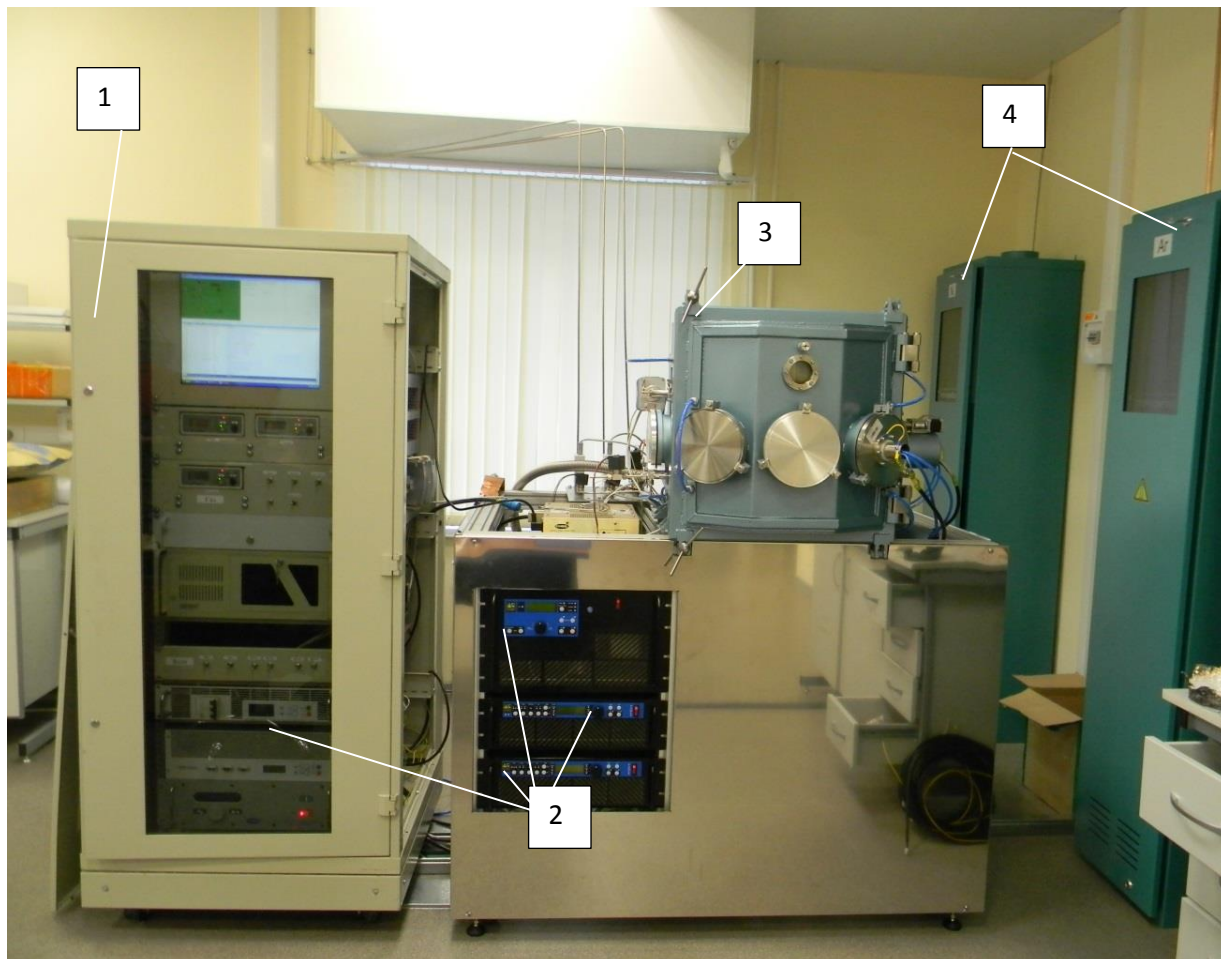


Рисунок 8 – Фотография установки ионно-плазменного осаждения покрытий:

1 – шкаф управления установкой, 2 – источники питания магнетрона, 3 – вакуумная камера, 4 – система газоснабжения

Установка включает в себя турбомолекулярный и спиральный насосы, подсоединенные к вакуумной камере 3. Вакуумная камера 3 представляет собой герметизированный объем с внутренними размерами 800×700×700 (рисунок 9). К вакуумной камере помимо насосов присоединены вакуумметр «Micro-Ion», расходомеры рабочих газов и клапан вакуумный для напуска атмосферы. Слева от установки расположен шкаф управления 1. Установка

оборудована тремя источниками питания 2 магнетрона. Система газоснабжения 4 состоит из баллонов с рабочим и реактивными газами.

На рисунке 9 представлена фотография вакуумной камеры 3 установки ионно-плазменного осаждения покрытий.



Рисунок 9 – Фотография внутреннего устройства вакуумной камеры установки ионно-плазменного осаждения покрытий: 1 – крепёж для образцов, 2 – ионный источник, 3 – планарный магнетрон с кремниевой мишенью, 4 – вращающийся столик

В боковой стенке расположен источник ионов 2 с холловским дрейфом электронов. Вращающийся столик 4 закреплён посередине камеры у основания установки. Магнетронная распылительная система 3 с дисковой мишенью расположена на двери вакуумной камеры.

На рисунке 10 приведена схема планарного магнетрона. Планарный магнетрон (рисунок 10), используемый в работе, состоял из кремниевой мишени 5, расположенной в медном корпусе 4 и магнитной системы 7, состоящей из самарий-кобальтового магнита и магнитопровода.

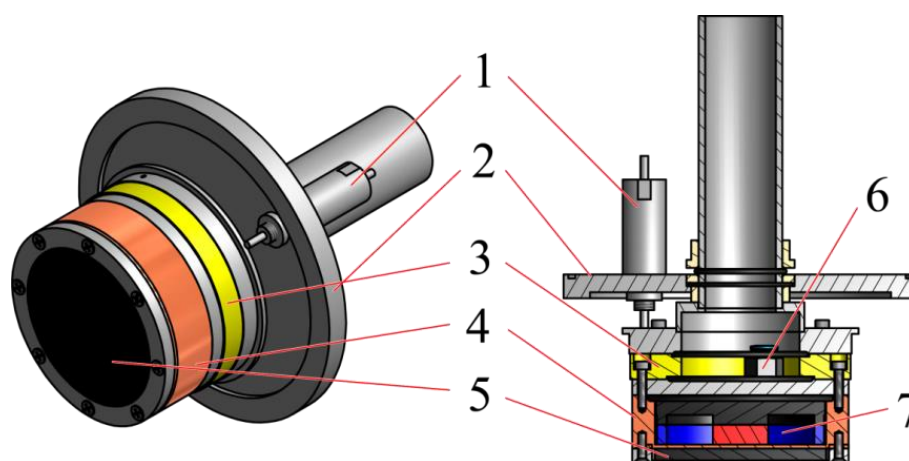


Рисунок 10 – Планарный магнетрон: 1 – напуск рабочего газа; 2 – фланец; 3 – диэлектрическая прокладка; 4 – медный корпус; 5 – кремниевая мишень; 6 – водяное охлаждение; 7 – магнитная система

Магнитная система и мишень крепятся на диэлектрическую прокладку 3 к фланцу 2. Габаритные размеры мишени составляли 90х8 мм.

При нанесении покрытий были использованы два блока питания магнетрона, работающих в режиме стабилизации мощности на уровне 0,5 кВт:

- униполярный источник напряжения APEL-M-10PDC, предназначенный для электропитания регулируемым напряжением постоянного и импульсного тока МРС мощностью до 10 кВт [33],
- униполярный источник тока MPS 3-5-9-600-PC для электропитания с регулируемым ограничением тока, напряжения и мощности до 5 кВт [34].

Параметры источников питания МРС приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры источников питания магнетрона

Источник питания магнетрона	Униполярный источник питания APEL-M-10PDC	Униполярный источник питания MPS 3-5-9-600-PC
		
Максимальная выходная мощность	10кВт	5 кВт

Выходное напряжение	65÷650 В	600 В
Выходной средний ток	0,1-15,0 А	9 А
Выходная средняя мощности	0,1-10 кВт	5 кВт
Тип выходного напряжения	отрицательное, постоянное, импульсное униполярное	однополярное импульсное отрицательной полярности
Частота следования импульса	1-100 кГц с шагом 1 кГц	132 кГц
Коэффициент заполнения импульсов	10-80% или пауза 3 - 50 мкс	-
Режимы стабилизации	напряжение, ток, мощность	напряжение, ток, мощность

На рисунке 11 представлены осциллограммы напряжения источников питания.

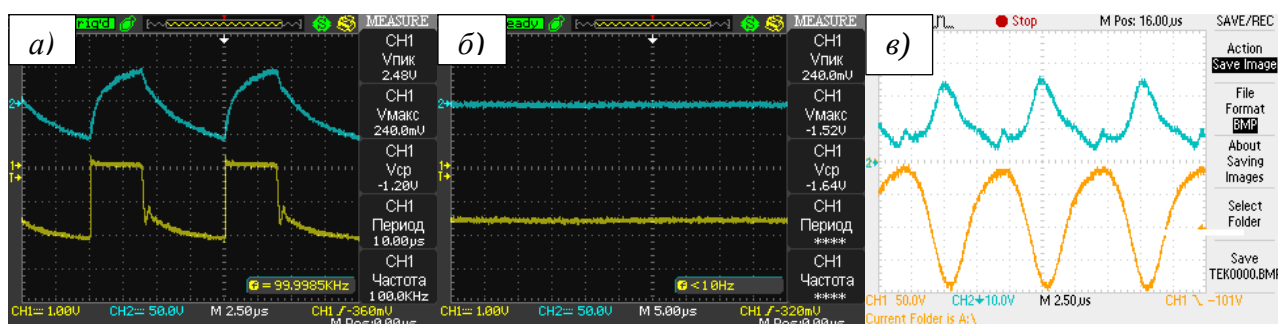


Рисунок 11 – Осциллограммы напряжения источников питания магнетрона:

(а), (г) – серия 100 кГц; (б), (д) – серия DC; (в), (е) – серия 132 кГц.

2.2 Измерение толщины покрытий профилометром серии XP 2 Stylus

Измерение толщины тонких плёнок производилось с помощью профилометра серии XP 2 Stylus производства AmbiosTechnologyInc (рисунок 12).

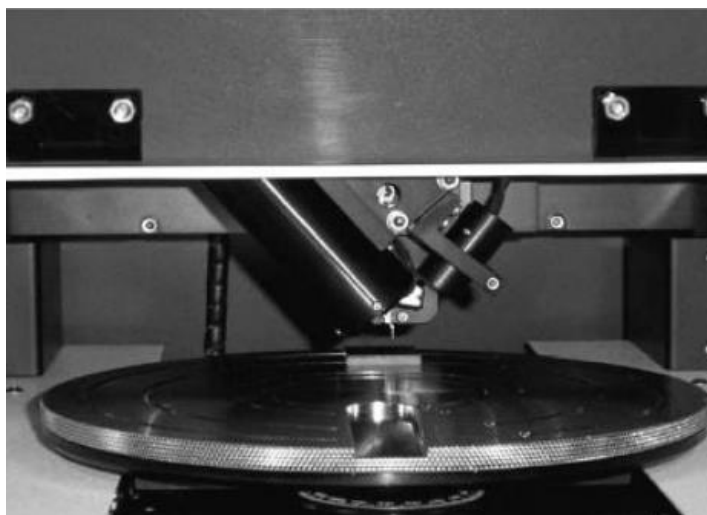


Рисунок 12 – Измерительный блок профилометра XP 2 Stylus

Прибор представляет собой разработанный на базе компьютера высокочувствительный поверхностный профилометр, измеряющий шероховатость, волнистость и шаг высот для различных областей применения. Он характеризуется возможностью измерения прецизионного шага высот от величин менее 10 ангстрем до величин более 100 микрон (400 мкм с расширенной функцией сенсора). Диаметр конца стилуса составляет 2 мкм.

Профилометр оборудован новым механизмом измерения высот с оптическим преломлением и системой управления с магнитостатической силой, которая дает малое усилие менее 0,05 мг и низкую инерцию модуля стилуса. Может измерять профили поверхности тонких плёнок и подложек без разрушения поверхности.

Профилометр AmbiosXP 2 позволяет измерять напряженность плёнки (стресс). Для этого снимается изгиб профиля пластины до и после нанесения покрытия, далее программа сама производит пересчёт в единицы напряженности.

2.3 Измерение толщины покрытий эллипсометрическим комплексом ЭЛЛИПС-1891САГ

Спектральный эллипсометрический комплекс «ЭЛЛИПС-1891САГ» (рисунок 13) предназначен для проведения высокоточных измерений

толщины одно- и многослойных тонкоплёночных структур, а также исследования спектральных оптических постоянных (показателя преломления и коэффициента поглощения), структурных свойств материалов (пористость; наличие, концентрация и распределение примесей в плёнке).

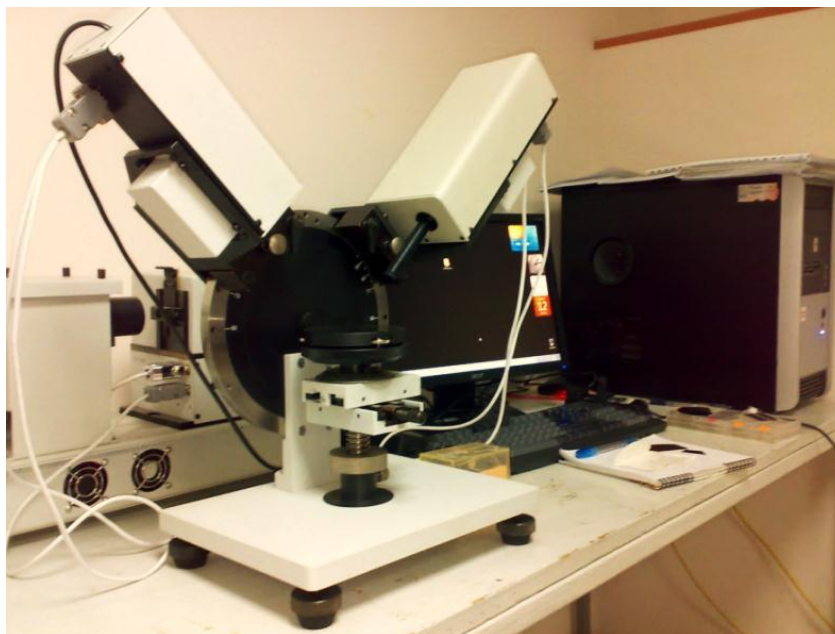


Рисунок 13 – Эллипсометрический комплекс «ЭЛЛИПС – 1891САГ» [35]

Комплекс создан на основе быстродействующей статической схемы эллипсометрических измерений. Алгоритмы считывания сигналов и расчёта рабочих параметров обеспечивают очень высокую чувствительность, необходимую для проведения измерений с высоким спектральным разрешением. Использование современной измерительной схемы обеспечивает быстрое сканирование всего спектра или отдельных участков спектра с повышенным спектральным разрешением.

Источник света: галогенная лампа ГКМ 100ВТ; спектральный диапазон: 350 – 1000 нм; диаметр светового пятна на образце: 3 мм; время единичного измерения: 1 мс/точка; измерение углов падения фиксировано: 45° – 70°, через 5°; диапазон измеряемых толщин: до 10 мкм; точность измерения толщин: до 5 Å; точность измерения показателя преломления: 0,001.

2.4 Исследование химического состава плёнок Si_3N_4 рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией

Исследование химического состава поверхности образца было проведено на фотоэлектронном спектрометре фирмы SPECS Surface Nano Analysis GmbH (Германия). Спектрометр оснащен полусферическим анализатором PNOIBOS-150-MCD-9, источником рентгеновского характеристического излучения XR-50M с двойным Al/Ag анодом и источником ионов высокой энергии IQE-11. Для записи спектров использовали излучение Al $K\alpha$ ($h\nu = 1486,6$ эВ). Для учета эффекта зарядки исходных образцов использовали спектр C1s углерода, входящего в состав поверхностных примесей ($E_{\text{св}} = 284,80$ эВ). Относительные концентрации элементов в зоне анализа определялись на основании интегральных интенсивностей РФЭС линий с учетом сечения фотоионизации соответствующих термов [36]. Для детального анализа использовали разложение спектров на индивидуальные составляющие. Соответственно, после вычитания фона по методу Ширли [37], экспериментальная кривая раскладывалась на ряд линий, соответствующих фотоэмиссии электронов из атомов в различном химическом окружении. Обработка данных производилась с помощью пакета программ CasaXPS [38]. Форма пиков аппроксимировалась симметричной функцией, полученной умножением функций Гаусса и Лоренца.

2.5 Исследование присутствующих в плёнках связей атомов и их концентраций методом ИК-Фурье спектроскопии

ИК-Фурье спектроскопия – технология анализа для идентификации неизвестных химических веществ. Метод основан на микроскопическом взаимодействии инфракрасного света с химическим веществом посредством процесса поглощения. ИК-Фурье спектроскопию используют для идентификации химического состава веществ. С её помощью можно обнаруживать водородные связи атомов.

В разных работах по-разному идентифицируют характеристические пики связей, в таблице 2 приведены данные из работ исследователей.

Таблица 2 – Характеристические пики связей из разных источников

№ ист.	Тип связи и волновое число пика			
[39]	Si-N ~840 см^{-1}	Si-O 1100 см^{-1}	O-H 1500 см^{-1}	Si-H 2180 см^{-1}
[40]	Si-N ~850 см^{-1}	N-H 1150-1200 см^{-1}	Si-H 2000-2150 см^{-1}	-
[41]	Si-N 850-860 см^{-1}	Si-N 850-860 см^{-1}	Si-O 1080 см^{-1}	N-H ~1160 см^{-1}
[42]	Si-N 830 см^{-1}	Si-O 1100 см^{-1}	N-H 1160 см^{-1}	Si-H 2200 см^{-1}
[43]	Si-N 890 см^{-1}	Si-H 2180 см^{-1}	N-H 3340 см^{-1}	-
[44]	Si-N 860 см^{-1}	Si-O-Si 1100 см^{-1}	Si-H 2160 см^{-1}	-
[45]	Si-N 830-860 см^{-1}	SiN-H 1150-1200 см^{-1}	Si-H 2150 см^{-1}	-
[46]	Si-N ~850 см^{-1}	N-H 1175 см^{-1}	Si-H 2000-2150 см^{-1}	-
[47]	Si-N 840 см^{-1}	Si-O 1100 см^{-1}	Si-H 2160 см^{-1}	-
[48]	Si-N 835 см^{-1}	N-H 1171 см^{-1}	Si-H 2188 см^{-1}	-

Размер и положение пика типа связи несет достаточно информации. Для одного и того же типа связи увеличение пика в высоту говорит о большем количестве элементов данного типа связи в плёнке. Чем уже пик в ширину, тем более кристаллическая структура у вещества. Смещение волнового числа максимума пика, говорит об изменении количества химических элементов в плёнке. Например, смещение пика связи Si-N говорит о том, что изменилось воздействие окружающих атомов, связано это с увеличением или уменьшением содержания азота в плёнке [40, 43].

Для анализа сложных пиков прибегают к разложению их на составляющие [49] в специальных программах. Для количественного анализа концентраций связей необходимо коэффициент пропускания перевести в

коэффициент поглощения, используя закон Бугера, который выражает зависимость между поглощательной способностью и толщиной слоя вещества. Поток параллельных лучей монохроматического света при прохождении через гомогенную поглощающую среду ослабляется по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot d), \quad (2.1)$$

где I_0 – интенсивность падающего монохроматического излучения; I – интенсивность прошедшего монохроматического излучения; d – толщина поглощающего слоя; α – коэффициент поглощения, индивидуальная характеристика вещества для каждой длины волны.

Зависимость коэффициента поглощения от волнового числа можно использовать для оценки концентрации связей различных веществ, т.к. площадь полосы поглощения пропорциональна концентрации связей. Имея эталонный спектр, можно получить количественное значение концентрации связей исследуемого образца.

Количественная оценка концентрации может быть сделана при условии знания значений коэффициентов экстинкции осциллирующих групп, которые существенно зависят от химической природы вещества. Коэффициенты экстинкции определяют экспериментально, данные приводятся в литературе [9].

Концентрация связи определяется по формуле:

$$C = \frac{S}{\varepsilon}, \quad (2.2)$$

где S – интегральная интенсивность полосы поглощения (площадь пика); ε – коэффициент экстинкции.

Коэффициент экстинкции связан с молекулярным коэффициентом экстинкции через полуширину полосы поглощения:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cdot H, \quad (2.3)$$

где ε_m – молекулярный коэффициент экстинкции; H – полуширина полосы поглощения.

Эксперименты по исследованию спектров проводились на Фурье ИК-спектрометре «Инфралюм ФТ-801» (рисунок 14).



Рисунок 14 – Фурье-спектрометр «Инфралюм ФТ – 801»

По принципу действия спектрометр «Инфралюм ФТ-801» относится к классу модуляционных спектральных приборов. В таких приборах разделение исследуемого излучения на спектральные составляющие производится не оптическими диспергирующими элементами (призмой, дифракционной решёткой и т.д.), а специальной модуляцией потока излучения оптическим подвижным элементом и дальнейшей электронно-математической обработкой сигнала оптического приемника, регистрирующего это промодулированное излучение - интерферограмму.

В спектрометре «Инфралюм ФТ-801» в качестве модулятора используется двухлучевой сканирующий интерферометр «Двойной кошачий глаз» (ДКГ).

Спектрометр осуществляет регистрацию спектра пропускания, а также спектра поглощения. Спектрометр обеспечивает возможность выбора спектрального разрешения из ряда значений: 1 см^{-1} , 2 см^{-1} , 4 см^{-1} и 8 см^{-1} . Рабочий спектральный диапазон спектрометра от 550 см^{-1} до 5500 см^{-1} .

2.6 Измерение электрических свойств полупроводниковых приборов с помощью зондовой станции SUSS PM5 и Л2-56

Пробой конденсатора – это неисправность, связанная с изменением сопротивления диэлектрика между обкладками конденсатора вследствие превышения допустимого рабочего напряжения на обкладках конденсатора.

При значительном превышении рабочего напряжения на конденсаторе, между его обкладками происходит электрический пробой. На корпусе пробитых конденсаторов можно обнаружить потемнения, вздутия, тёмные пятна и другие внешние признаки неисправности элемента.

Поскольку конденсатор не пропускает постоянный ток, то сопротивление между его выводами (обкладками) должно быть очень большим и ограничиваться лишь так называемым сопротивлением утечки. В реальных конденсаторах диэлектрик, несмотря на то, что он является, по сути, изолятором, пропускает незначительный ток. Этот ток для исправного конденсатора очень мал и не учитывается. Он называется током утечки.

Измеритель характеристик полупроводниковых приборов малой и большой мощности предназначен для визуального наблюдения статических вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов, измерения напряжения на их электродах и токов в их цепях, определения их низкочастотных параметров представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 – Измеритель характеристик полупроводниковых приборов Л2-56

На рисунке 16 представлена SUSS PM5 – зондовая станция, разработанная для анализа пластин и подложек до 150 мм (6 дюймов).

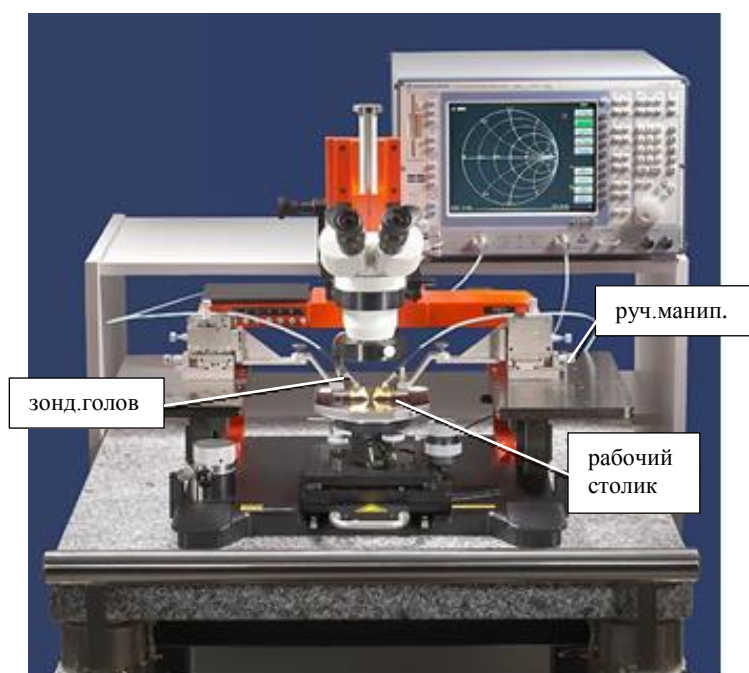


Рисунок 16 – Зондовая станция SUSSPM5

Гибкость конфигурации позволяет системе проводить измерения в широком спектре постоянного тока и высоких частот. Модульность PM5 позволяет оснащать систему и сокращать затраты на стадии внедрения. Все возможные дополнительные модули можно применить в PM5, что дает возможность усовершенствования системы в любой момент, позволяя сократить расходы на стадии внедрения.

Измерения емкости проводились с помощью зондовой станции SUSS PM5. Исследуемый образец располагался на поверхности держателя. Далее производилась регулировка высоты стола. С помощью манипуляторов для перемещения зондов по осям (X,Y,Z), производили совмещение зондов с контактными площадками конденсатора и проводили измерения емкости. С помощью прибора Л2-5, подсоединенного к зондовой станции SUSS PM5, были проведены измерения напряжения пробоя.

2.7 Исследование морфологии поверхности и профиля плёнки сканирующей электронной микроскопией

Морфология поверхности и профиль плёнки нитрида кремния были исследованы с помощью сканирующего (растрового) электронного микроскопа (СЭМ) серии Zeiss Supra 55 (тип детектора In-Lens, энергия

электронов – 10 кэВ) с блоком для электронно-лучевого экспонирования Raith150 Two (рисунок 17) [50-52].



Рисунок 17 – СЭМ серии Zeiss Supra 55 с блоком для электронно-лучевого экспонирования Raith150 Two [50,53]

Общая функциональная схема установки представлена на рисунке 18. К основным блокам установки относятся колонна микроскопа, рабочая камера со шлюзом загрузки и моторизированным столиком-держателем подложек. Вакуумная система производит дифференциальную откачку атмосферы из рабочей камеры и колонны микроскопа, так как для нормального функционирования электронной пушки требуется более высокий вакуум.

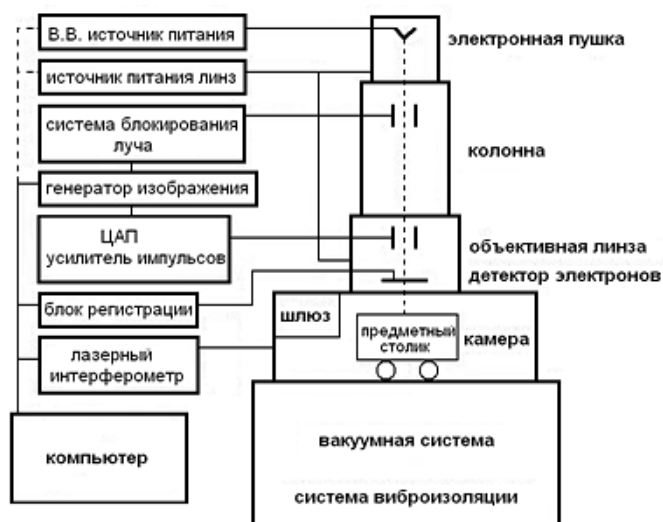


Рисунок 18 – Общая функциональная схема электронного литографа Raith 150 Two

С целью уменьшения вибраций и как следствие повышения разрешающей способности выполняется виброизоляция камеры. К блокам электроники относятся источники питания электронной пушки и фокусирующих линз. Система блокирования луча предназначена для того, чтобы луч не попадал на поверхность образца во время перехода от одного элемента экспонирования к другому. Генератор изображения совместно с цифро-аналоговым преобразователем и усилителем импульсов служат для подачи управляющих импульсов на отклоняющие пластины. При работе установки в режиме литографа импульсы формируются согласно заложенной топологии. В режиме микроскопа луч развертывается в прямоугольный растр. Снимаемый с детекторов сигнал поступает на блок регистрации. Лазерный интерферометр используется для контроля положения образца в рабочей камере. Система управляется с помощью компьютера.

На рисунке 19 представлена схема формирования изображения в сканирующем электронном микроскопе. Объективная линза колонны фокусирует электронный луч на поверхности образца. При взаимодействии электронного луча с атомами образца образуются различные сигналы. Регистрируя величину этих сигналов соответствующими детекторами, можно получать информацию о свойствах образца, таких как топография, состав и др. Однако эта информация приходит только из одной точки образца, в пределах пятна луча. Для получения изображения некоторой области образца используются отклоняющие катушки, которыми управляет генератор сканирования. Эти катушки развертывают сфокусированный электронный луч в растр. Луч движется по образцу слева направо и сверху вниз. Размером области растра можно управлять, изменяя уровень импульсов развертки на генераторе сканирования. Каждое отдельное положение луча, в пределах растра, называется пикселем. Существует однозначная связь между отдельным пикселем растра на образце и отдельным пикселем изображения на экране монитора.

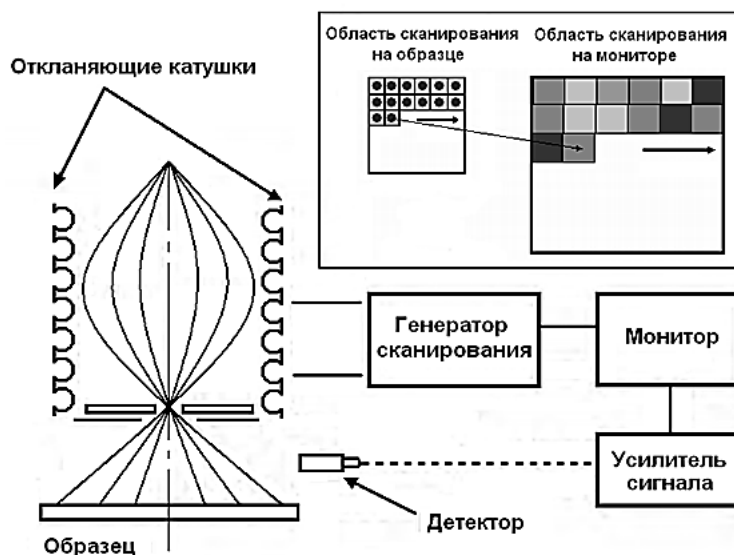


Рисунок 19 – Типичная схема формирования изображения в сканирующем электронном микроскопе

Точка, в пределах одного пикселя на образце (рисунок 19, вверху справа), представляет собой область взаимодействия электронного луча с образцом, в которой образуется сигнал. Сигнал собирается детектором и впоследствии обрабатывается для получения изображения. В процессе этой обработки интенсивность сигнала, снимаемого с пикселя раstra, преобразуется в уровень серого в пикселе на экране монитора. Готовое изображение на мониторе представляет собой двумерное изображение сканируемой области образца в уровнях серого.

Установка Raith 150 Two содержит два детектора вторичных электронов (рисунок 20).

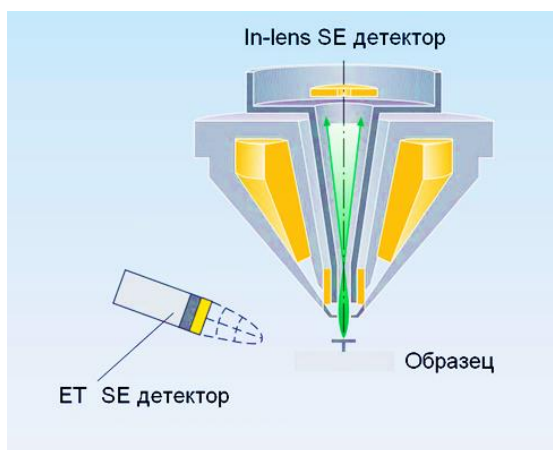


Рисунок 20 – Расположение детекторов вторичных электронов относительно образца

Один детектор расположен внутри рабочей камеры под углом к образцу. Другой входит непосредственно в состав колонны (In-lens). Слабое магнитное поле на поверхности образца захватывает низкоэнергетичные вторичные электроны в точке падения луча. Затем эти электроны ускоряются напряжением U_b и фокусируются на In-lens детекторе.

In-lens детектор, расположенный в линзе, обычно собирает 70-80% доступных SE электронов с образца. Поэтому сигнал с In-lens детектора выше по контрасту и информативности.

Основными управляющими параметрами, которые может использовать оператор, являются: ускоряющее напряжение, размер апертуры и рабочее расстояние.

2.8 Испытания на надежность методом TDDb (time-dependent dielectric breakdown)

Важным показателем качества тонкоплёночных МДМ конденсаторов является надежность. Надежность это предположительное время работы любого элемента монолитной интегральной микросхемы СВЧ. Показателем качества МДМ конденсаторов является долгий срок службы и безотказность в течение всей работы данных элементов. Тонкоплёночные МДМ конденсаторы имеют высокую интенсивность отказов, причиной которых является короткое замыкание между обкладками из-за несовершенства структуры осаждаемых плёнок и электрический пробой между элементами конструкции МДМ-конденсатора.

Проверка прибора на срок службы требует больших затрат времени до его момента выхода из строя. Существуют различные методы проверки элементов на надежность, которые сокращают срок службы или ускоряют деградацию характеристик. Ускорение испытаний достигается за счёт увеличения влажности, температуры, вибрации или напряжения. Затем с помощью математической статистики производится пересчёт времени жизни, которое элемент проработал бы при нормальных условиях.

Проверку тонкоплёночных МДМ конденсаторов на надежность осуществляют с помощью метода ступенчатой подачи напряжения до полного отказа конденсатора. Суть метода заключается в следующем: берется партия конденсаторов и подается такое напряжение, при котором данные приборы находятся в рабочем состоянии доли секунды. Далее берется партия конденсаторов, на которое подается ниже напряжение, так эксперимент проходит до тех пор, пока время жизни конденсатора можно просчитать экспериментально. Данный метод удобен тем, что требуется провести несколько опытов, и с помощью математической статистики подсчитать, долговечность данных партий конденсаторов на самых низких напряжениях. Минусы этого метода в том, что идентичных конденсаторов у нас нет. Для точности эксперимента нужно провести опыты с десятками конденсаторов одинаковых структур и подвергать все конденсаторы одним по величине напряжением. Затем на идентичные по структуре конденсаторы подавать ниже по величине напряжение. По окончании всего эксперимента строится зависимость времени жизни от подаваемого напряжения и проводят прогноз работы данных конденсаторов до полного отказа при малых напряжениях.

Одним оптимальным из таких методов – является метод TDDDB (time-dependent dielectric breakdown). TDDDB – это пробой диэлектрика, происходящий при подаче напряжения в течение длительного времени. Механизм представляет собой сбой в конденсаторах, в результате длительного применения относительно низких электрических полей. Измерения проводились с помощью зондовой станции SUSSPM5 (рисунок 16). Исследуемый образец располагался на поверхности держателя. Далее производилась регулировка высоты стола. С помощью манипуляторов для перемещения зондов по осям (X,Y,Z), производили совмещение зондов с контактными площадками конденсатора и проводили измерения емкости. С помощью анализатор цепей Hewlett Packard 4156A подсоединенное к PM5 подавалось ступенчатое напряжение. Данный прибор служит для

определения тока утечки и пробоя диэлектрика. С помощью прибора «Л2-56» (рисунок 15) подсоединенного к зондовой станции SUSSPM5 были проведены измерения напряжения пробоя и токов утечки.

Затем по полученным данным о надежности конденсаторов были приведены сравнения с зарубежными компаниями. Согласно описанному методу, компания WIN SemiconductorsCorp, провела испытания на надежность конденсаторов с толщиной нитрида кремния толщиной 600 Å и 1500 Å.

На рисунке 21 представлен график времени жизни при температуре 125⁰C.

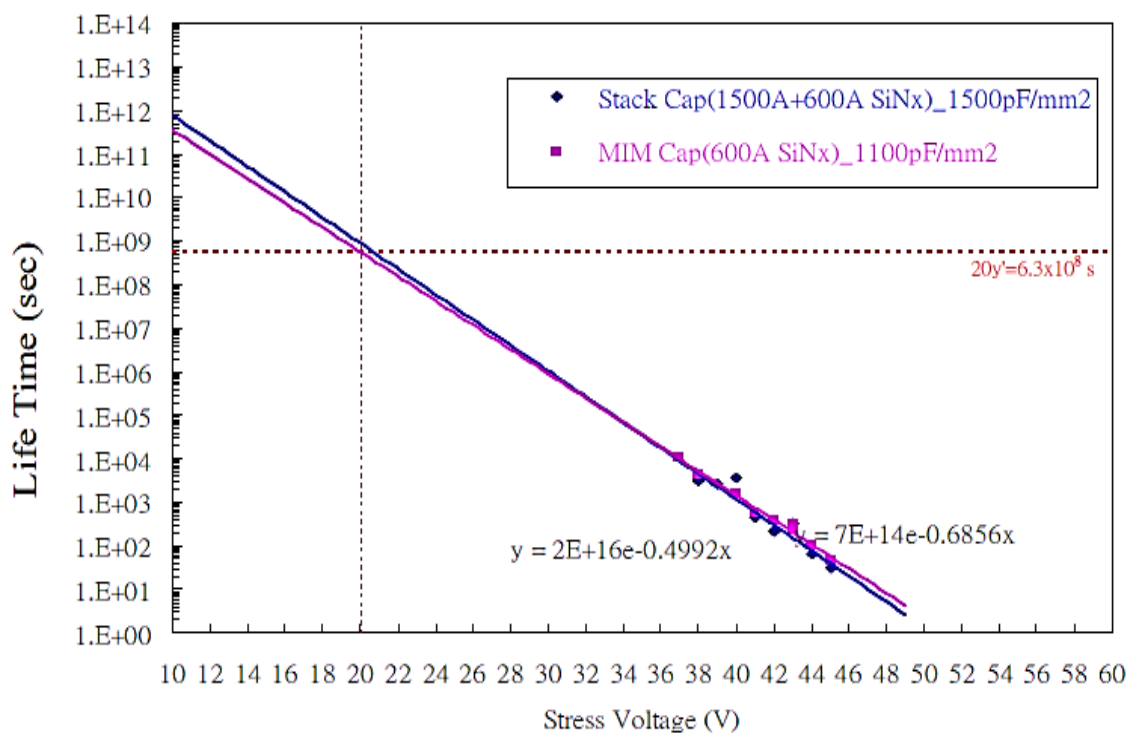


Рисунок 21 – График времени жизни, полученный при температуре 125⁰C.

Исходя из результатов, приведенных на рисунке 20 видно, что конденсатор может проработать в течение 20 лет, если на него будет подаваться напряжение в 20В, что с точки зрения надежности МДМ-конденсаторов на основе нитрида кремния, является одним из лучших результатов, полученных в мире [54-56].

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

4.1 Анализ потенциальных потребителей и конкурентных технических решений

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Продукт: диэлектрические плёнки нитрида кремния, полученные магнетронным осаждением, для тонкопленочных МДМ-структур.

Целевой рынок: микроэлектроника.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных решений целесообразно проводить при помощи оценочной карты, для этого были определены 2 конкурента на рынке: технология катодного распыления оксида кремния (B_1), технология химического осаждения из газовой фазы (B_2).

Расчет показателя конкурентоспособности производился по следующей формуле:

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i, \quad (4.1)$$

где B_i – бал i -го показателя, V_i – вес показателя (в долях единицы).

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	$B_{\kappa 1}$	$B_{\kappa 2}$	K_{ϕ}	$K_{\kappa 1}$	$K_{\kappa 2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Экономичность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Экологичность	0,18	5	3	3	0,9	0,54	0,54
3. Надежность	0,07	5	4	3	0,35	0,28	0,21
4. Безопасность	0,13	5	3	3	0,65	0,39	0,39
5. Простота эксплуатации	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,07	5	4	3	0,35	0,28	0,21

2. Уровень проникновения на рынок	0,07	4	5	5	0,28	0,35	0,35
3. Цена	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	5	0,4	0,4	0,4
5. Послепродажное обслуживание	0,06	5	3	2	0,3	0,18	0,12
6. Финансирование научной разработки	0,03	4	5	4	0,12	0,15	0,12
7. Срок выхода на рынок	0,04	5	4	4	0,2	0,16	0,16
8. Наличие сертификации разработки	0,06	4	5	4	0,24	0,3	0,24
Итого	1	62	52	46	5,14	4,01	3,62

Согласно вышеприведенному расчету видно, что предлагаемая нами технология осаждения диэлектрических пленок нитрида кремния имеет более высокий показатель конкурентоспособности (5,14). Это обусловлено следующим рядом факторов: технология компактна и безопасна, проста в эксплуатации и надежна. Что связано с принципом построения технологической линии, используемыми физическими принципами и наличием большого опыта по разработке технологий осаждения тонкопленочных структур. Суммарно это позволяет существенно снизить количество недостатков технологии и повысить число ее конкурентных преимуществ

4.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Результаты исследования приведены в SWOT-анализ (таблица 11).

Таблица 4 – SWOT-анализ.

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность технологии; С2. Экологичность технологии и продукта;	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие достаточного финансирования; Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров; Сл3. Использование
--	--	---

	С3. Более простая методика получения; С4. Квалифицированный персонал	устаревшего оборудования для исследования; Сл4. Большой срок поставок комплектующих рабочей установки
Возможности: В1. Использование инновационной структуры ТПУ; В2. Повышение стоимости конкурентных разработок	1.Получение результатов НТИ 2.Продвижение НТИ на рынок	1.Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др. 2. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей 3. Приобретения необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ 4. Сокращение поставок или смена поставщика
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на НТИ; У2. Уменьшение финансирования исследования; У3. Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции	1.Продвижение НТИ с целью создания спроса 2.Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др. 3.Сертификация и стандартизация продукта	1.Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др. 2. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей 3. Приобретение необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ 4. Сокращение поставок или смена поставщика 5. Продвижение НТИ с целью создания спроса

4.1.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Таблица 5 - Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-	4	4

	технический задел		
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	5
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	5
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	3
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	1
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	2	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	2
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	3
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	2	3
	Итого баллов	32	41

4.2 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

При коммерциализации научно-технических разработок продавец (а это, как правило, владелец соответствующих объектов интеллектуальной собственности), преследует вполне определенную цель, которая во многом зависит от того, куда в последующем он намерен направить (использовать, вложить) полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств для продолжения своих научных исследований и разработок (получение финансирования, оборудования, уникальных материалов, других научно-технических разработок и т.д.), одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или для накопления, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания.

При этом время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Задача данного раздела магистерской диссертации – это выбор метода коммерциализации объекта исследования и обоснование его целесообразности. Для того чтобы это сделать необходимо ориентироваться в возможных вариантах.

Выделяют следующие методы коммерциализации научных разработок.

1. *Торговля патентными лицензиями*, т.е. передача третьим лицам права использования объектов интеллектуальной собственности на лицензионной основе. При этом в патентном законодательстве выделяющие виды лицензий: исключительные (простые), исключительные, полные лицензии, сублицензии, опционы.

2. *Передача ноу-хау*, т.е. предоставление владельцем ноу-хау возможности его использовать другим лицом, осуществляемое путем раскрытия ноу-хау.

3. *Инжиниринг* как самостоятельный вид коммерческих операций предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг,

связанных с проектированием, строительством и вводом объекта в эксплуатацию, с разработкой новых технологических процессов на предприятии заказчика, усовершенствованием имеющихся производственных процессов вплоть до внедрения изделия в производство и даже сбыта продукции.

4. *Франчайзинг*, т.е. передача или переуступка (на коммерческих условиях) разрешения продавать чьи-либо товары или оказывать услуги в некоторых областях.

5. *Организация собственного предприятия*.

6. *Передача интеллектуальной собственности* в уставной капитал предприятия.

7. *Организация совместного предприятия*, т.е. объединение двух и более лиц для организации предприятия.

8. *Организация совместных предприятий*, работающих по схеме «российское производство – зарубежное распространение».

Перспективность данного научного исследования выше среднего, поэтому не все аспекты рассмотрены и изучены. Таким образом, для организации предприятия этого не достаточно (пункт 4 – 8 не подходят). Но так как основной научно-технический задел определен, этого достаточно для коммерциализации для следующих методов (пункты 1 - 3): Торговля патентной лицензией; передача ноу-хау и инжиниринг. Степени проработанности научного проекта и уровень знаний разработчика достаточно для реализации пунктов, которые были выбраны.

4.3 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определены изначальные цели и содержание проекта. Определены внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые взаимодействуют и влияют на общий результат научного проекта.

1) Цели и результат проекта.

Таблица 6 – Заинтересованные стороны проекта.

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Кривобоков В.П. д.ф.-м. (зав. каф.ЭФ)	Публикации; защита магистерской диссертации; продвижение проекта к коммерциализации.
Юрьев Ю.Н. к.т.н, науч. рук. (зав. лаб. ЭФ)	Получение конкретных удовлетворяющих результатов исследований для дальнейшей коммерциализации; публикации; защита магистерской диссертации.
Киселева Д.В.. исполнитель проекта (студент)	Получение достоверных результатов; достижение повторяемости результатов в зависимости от цели использования продукта; защита магистерской диссертации.

Таблица 7 – Цель и результат проекта.

Цель:	разработка методики осаждения диэлектрических пленок нитрида кремния кремния для тонкопленочных МДМ-структур при помощи магнетронных распылительных систем.
Ожидаемые результаты:	получение зависимостей свойств покрытий от режимов работы магнетрона и источников питания; формирование тонкопленочных МДМ-структур с использованием диэлектрического слоя на основе нитрида кремния; диэлектрические проницаемости, соответствующие нитриду кремния и высокие пробивные напряжения и емкости МДМ-структур
Критерии приемки результата:	показатели преломления, соответствующие нитриду кремния; наличие в плёнках связи Si-N; МДМ-структуры, имеющие

	высокое пробивное напряжение, емкость и диэлектрические свойства, соответствующие нитриду кремния; повторяемость результата.
Требования к результату:	1. показатель преломления, соответствующий нитриду кремния; 2. наличие в плёнках связи Si-N; 3. концентрации связей Si-N и Si-O, больше или равные для плазмохимического осаждения; 4. диэлектрическая проницаемость должна соответствовать нитриду кремния; 5. высокие пробивные напряжения и емкость МДМ-структур; 6. аморфная структура; 7. повторяемость результата в каждом режиме получения покрытий.

2) Организационная структура проекта.

Таблица 8 – Рабочая группа проекта.

№	ФИО, место работы, должность.	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, час/день
1	Юрьев Ю.Н. к.т.н., лаб. каф. ЭФ ТПУ	Руководитель	Координация деятельности исполнителя проекта.	8
2	Киселева Д.В. студент магистрант ТПУ	Исполнитель	Подготовка образцов, выявление оптимальных режимов, получение образцов, исследование образцов и описание результатов.	4-8

3) Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же

«границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 9 - Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	250 тыс. рублей
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	1.10.2016-31.05.2017
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	1.10.2016
3.2.2. Дата завершения проекта	31.05.2017

4.4 Планирование управления научно-техническим проектом

4.4.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. На рисунке 36 представлена иерархическая структура.



Рисунок 22 – Иерархическая структура по ВКР

Проектная структура больше всего подходит для данного научного исследования. Данная структура представлена на схеме (рисунок 37)

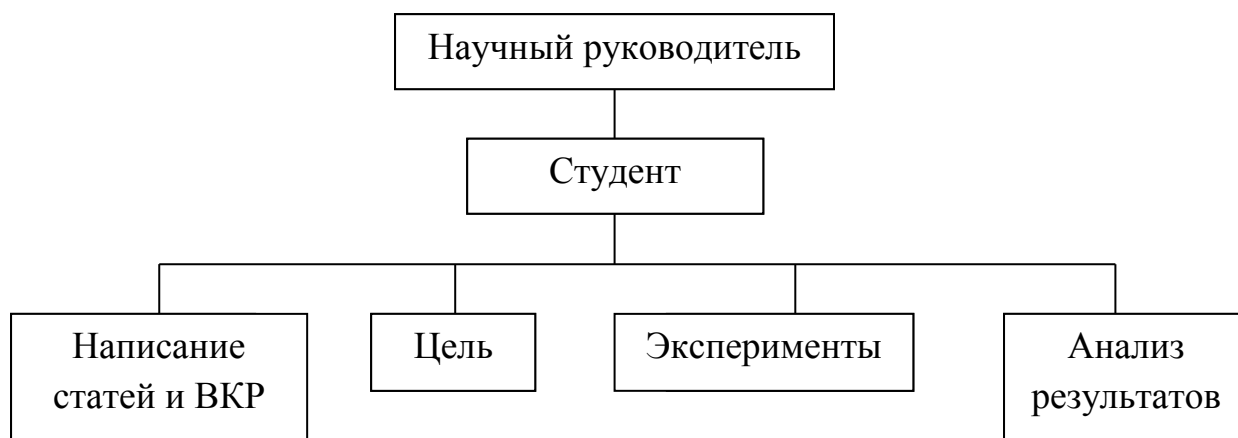


Рисунок 23 – Проектная структура НТИ

Будем использовать проектную структуру проекта, так как она подходит больше, потому что технология является новая и не исследуемой ранее, сложность проекта высока.

4.4.2 Контрольные события проекта

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей. В таблицах 17 и 18 приведены контрольные события и план-график проекта соответственно.

Таблица 10 – Контрольные события проекта.

№	Контрольное событие	Дата	Подтверждающий документ
1	Получение пленок нитрида кремния с помощью МРС и в разных режимах работы.	октябрь 2016	Дневник эксперимента
2	Исследование экспериментальных образцов и описание результатов.	ноябрь 2016	Отчет по выполненной работе в виде доклада и краткой пояснительной записки

3	Обсуждение результатов исследования на VIII Всероссийской (с международным участием) научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий»	ноябрь 2016	Диплом участника конференции
4	Написание статьи «Study on the influence of the magnetron power supply on the properties of the Silicon Nitride films»	январь 2017	Публикация в журнале «Journal of Physics: Conference Series»
5	Проведение измерений электрических свойств	февраль 2017	Данные измерения электрических свойств
6	Проведение надежных испытаний и исследование профиля плёнок и морфологии поверхности	март – апрель 2017	Данные надежных испытаний и морфологии поверхности и профиля пленок
7	Написание статьи «Влияние параметров источника питания магнетрона на свойства плёнок нитрида кремния»	май 2017	Публикация в сборнике научных XIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», 2017 г., с. 125-127
8	Отчет о проделанной работе	апрель 2017	Отчет

Таблица 11 – Календарный план-график проекта по теме

№	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																	
				сен		окт		ноя б		дек		янв		фев р		мар т		апр		май	
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Составление технического задания	Руководитель	7																		
2	Изучение литературы	Магистр	80																		
3	Подготовка установки к работе	Руководитель	30																		
4	Подбор режимов нанесения покрытий	Руководитель, магистр	7																		
																					
5	Получение покрытий	Руководитель, магистр	14																		
																					
6	Измерение оптических постоянных и толщин	Магистр	14																		
7	Исследование связей и их концентраций	Магистр	14																		
8	Участие в конференции г.Казань	Магистр	7																		
9	Формирование МДМ-структур	Инженер, руководитель, магистр	45																		
10	Написание статьи	Магистр	30																		
11	Проведение измерения электрических свойств	Инженер	7																		
12	Проведение надежностных испытаний и исследование профиля плёнок и морфологии поверхности	Инженер	30																		
13	Подготовка отчета о проделанной работе	Магистр	7																		
14	Написание тезисов статьи	Магистр	30																		
15	Написание ВКР	Магистр	150																		



- научный руководитель,



инженер,



студент

4.5 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования учитывается полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

1. материальные затраты НТИ;
2. затраты на специальное оборудование для научных работ
3. основная заработная плата исполнителей темы;
4. дополнительная заработная плата исполнителей темы;
5. отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
6. затраты научные и производственные командировки;
7. накладные расходы.

4.5.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты.

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.

Эксперименты проводились 30 дней по 2 часа (60 часов), мощность установки 100 кВт/час и расход охлаждающей воды (не менее) 1,8 м³/час

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = Ц_{эл} \cdot P \cdot F_{об} , \quad (4.2)$$

где $Ц_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (2,5 руб за 1 кВт-ч); P – мощность оборудования, кВт; $F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

$$C_{эл} = 2,5 \cdot 100 \cdot 60 = 15000 \text{ руб.}$$

Затраты на водоснабжение рассчитываются по формуле:

$$C_{вд} = Ц_{вд} \cdot Q \cdot F_{об} , \quad (4.3)$$

где $C_{вод}$ – тариф на промышленное водоснабжение (8 руб за 1 м³); Q – расход воды, м³; $F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

$$C_{вд} = 8 \cdot 1,8 \cdot 60 = 864 \text{ руб.}$$

Материальные затраты находятся по формуле:

$$C_m = C_{эл} + C_{вд}, \quad (4.4)$$

$$C_m = 15000 + 864 = 15864 \text{ руб.}$$

Таблица 12 - Материальные затраты исполнителя

Наименование	Сумма, руб.
Затраты на электроэнергию	15000
Затраты на водоснабжение	864
Итого по статье	15864

Также в стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены).

Таблица 13 – Сырье, материалы и комплектующие изделия.

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Кремниевый катод		1	16000	16000
Баллон Аргон	Ar, 99,9%	1	6000	6000
Баллон Азот	N ₂ , 99,9%	1	6000	6000
Всего за материалы				28000
Транспортно-заготовительные расходы (3–5%)				1500
Итого по статье				29500

Таблица 14 – Статья на все материальные затраты

Наименование	Сумма, руб.
Материальные затраты исполнителя	15864
Затраты на сырье, материалы и комплектующие изделия	29500
Итого по статье	45364

4.5.2 Специальное оборудование для научных работ

В ходе выполнения НТИ никакое дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное

оборудование являлось собственностью кафедры. Таким образом затраты на оборудование не учитываем.

4.6 Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме и дополнительная заработная плата научно-производственного персонала. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы. Баланс рабочего времени и расчет основной заработной платы представлены в таблице 22 и 23, соответственно.

Таблица 15 – Баланс рабочего времени.

Показатели рабочего времени	Руководитель	Дипломник
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	52	82
-праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
-отпуск	45	52
-невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	254	217

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы

п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс.руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
		Руководитель	1	23264	23264
		Магистрант	1	2650	2650
Итого:				25914	25914

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

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

Основная заработная плата $Z_{\text{осн}}$ руководителя рассчитывается по следующей формуле:

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

где $T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн. (таблица 14); $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Значит, для руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = 23264 \cdot 1,3 = 30243,2 \text{ рублей}$$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = (Z_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}}$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб (в качестве месячного оклада магистранта выступает стипендия, которая составляет 2650руб); M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 45раб. дней $M=10,4$ месяца, 6 - дневная неделя; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях) (табл.14).

Тогда, для руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{30243,2 \cdot 10,4}{254} = 1238,3 \text{ рублей}$$

Для магистранта:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{2650 \cdot 10,4}{217} = 127 \text{ рублей}$$

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot k_{\text{р}}$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб; $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3.

Заработная плата для руководителя: $Z_{\text{м}} = 23264 \cdot 1,3 = 30243,2$ руб.

Результаты расчета основной заработной платы представлены в таблице 24.

Таблица 17 – Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{б}}$,руб.	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$,руб	$Z_{\text{дн}}$,руб.	$T_{\text{раб}}$,раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$,руб.
Руководитель	23264	1,3	30243,2	1238,3	48	59438,4

Магистрант	2038	1,3	2650	127	76	9271
Итого $З_{\text{осн}}$						68709,4

4.7 Дополнительная заработная плата персонала

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10 – 15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы (таблица 25). Таким образом, сумма основной заработной платы участников проекта и дополнительной будет составлять статью затрат расходов на зарплату:

$$C_{\text{зп}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}, \quad (5.5)$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб., $З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (5.6)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплат.

Таблица 18 – Дополнительная заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Магистрант
Основная зарплата	59438,4	9271
Дополнительная зарплата	8915,8	–
Зарплата исполнителя	68354,2	9271
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	77625,2	

4.8 Отчисления на социальные нужды

Величина отчисленной во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (5.18)$$

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

Отчисления на социальные нужды (30% от статьи заработной платы) составили 23287,6 руб.

4.9 Накладные расходы

Накладные расходы – это затраты на управление и хозяйственное обслуживание и расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. Что порядка 85% от заработной платы. Суммарно накладные расходы составляют 65981,4 рублей.

4.10 Научные и производственные командировки и оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями

Работа со сторонними организациями, научные и производственные командировки не производились.

Таблица 19 – Группировка затрат по статьям

Статьи										
Вид работ	Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных работ	Осн. зар. плата	Доп. зар. плата	Отчисления на соц. нужды	Научные и производственные командировки	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями	Прочие прямые расходы	Накладные расходы	Итоговая себестоимость
Нанесение диэлектрических слоев на основе нитрида кремния на установке ионно-плазменного осаждения покрытий	45364,0	-	68709,4	8915,8	23287,6	-	-	-	65981,4	212258,2
Аналог	59000,0	19300,0	90000,0	13500,0	31050,0	-	-	-	87975,0	300825,0

Установлено, что бюджет затрат НТИ составил 212258,2 руб., в то время как бюджет затрат аналоговой технологии составляет 300825,0 руб. Отсюда следует, экономичность разработанного нами НТИ будет выше, чем у конкурентов.

4.11 Организационная структура проекта

В практике используется несколько базовых вариантов организационных структур: функциональная, проектная, матричная.

Для выбора наиболее подходящей организационной структуры можно использовать таблице 27.

Таблица 20 – Выбор организационной структуры научного проекта

Критерии выбора	Функциональная	Матричная	Проектная
Степень неопределенности условий реализации проекта	Низкая	Высокая	Высокая
Технология проекта	Стандартная	Сложная	Новая
Сложность проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимозависимость между отдельными частями проекта	Низкая	Средняя	Высокая
Критичность фактора времени (обязательства по срокам завершения работ)	Низкая	Средняя	Высокая
Взаимосвязь и взаимозависимость проекта от организаций более высокого уровня	Высокая	Средняя	Низкая

Вывод: на основе проведенного анализа выбора организационной структуры научного проекта, было выявлено, что наиболее выгодной является проектная структура.

4.12 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 28.

Таблица 21 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соц.ответс твенность»	Консультант по языковому разделу	Студент
Составление и утверждение	О				

технического задания					
Изучение литературы	О				И
Подготовка установки к работе	С				И
Подбор режимов нанесения покрытий	О				И
Получение покрытий	О				И
Измерение оптических постоянных и толщин					И
Исследование связей и их концентраций					И
Формирование МДМ-структур	С				И
Проведение измерения электрических свойств	С				И
Подготовка отчета о проделанной работе					И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С				И
Подготовка к защите	О				И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

- ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;
- исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);

– согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

4.13 План управления коммуникациями проекта

План управления коммуникациями отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта. В таблице 29 представлен план, отражающий требования данные требования.

Таблица 22 – План управления коммуникациями проекта

Какая информация передается	Кто информацию передает	Кому передается информация	В какие сроки передается информация
Статус проекта	Магистр	Руководитель	Каждые 2 недели
Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Магистр	Руководитель	Каждые 2 недели
Документы и информация по проекту	Магистр	Руководитель	Каждые 2 недели
О выполнении контрольной точки	Магистр	Руководитель	Ежеквартально
О написании работ	Магистр	Руководитель	Каждые полгода
О выполнении проекта	Магистр	Руководитель	Каждые полгода
Отчетность по проекту и защите магистра	Руководитель	Зав.кафедрой	Каждые полгода

4.14 Реестр рисков проекта

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

Таблица 23 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
---	------	---------------------------	-------------------------	---------------------	----------------	-------------------------	---------------------

			(1-5)				
1	Выход из строя магнетрона	Задержки в выполнении плана	2	3	Средний	Регулярный осмотр и проверка всех систем, чистка камеры и подложек	Ошибки работы установки, загрязнение трубопроводов охлаждения, человеческий фактор
2	Соблюдение всех шагов подготовки и образцов	Не корректные результаты	3	5	Высокий	Проверить каждый шаг	Человеческий фактор

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

Эффективность научного ресурсосберегающего проекта включает в себя социальную эффективность, экономическую и бюджетную эффективность. Показатели общественной эффективности учитывают социально-экономические последствия осуществления инвестиционного проекта как для общества в целом, в том числе непосредственные результаты и затраты проекта, так и затраты, и результаты в смежных секторах экономики, экологические, социальные и иные внеэкономические эффекты.

Показатели экономической эффективности проекта учитывают финансовые последствия его осуществления для предприятия, реализующего данный проект. В этом случае показатели эффективности проекта в целом характеризуют с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения.

Бюджетная эффективность характеризуется участием государства в проекте с точки зрения расходов и доходов бюджетов всех уровней.

4.15.1 Динамические методы экономической оценки инвестиций

Динамические методы оценки инвестиций базируются на применении показателей:

- чистая текущая стоимость (**NPV**);

- срок окупаемости (**PP**);
- внутренняя ставка доходности (**IRR**);
- индекс доходности (**PI**).

Все перечисленные показатели основываются на сопоставлении чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности, и их приведении к определенному моменту времени. Теоретически чистые денежные поступления можно приводить к любому моменту времени (к будущему либо текущему периоду). Но для практических целей оценку инвестиции удобнее осуществлять на момент принятия решений об инвестировании средств.

4.15.2 Чистая текущая стоимость (**NPV**)

Данный метод основан на сопоставлении дисконтированных чистых денежных поступлений от операционной и инвестиционной деятельности.

Если инвестиции носят разовый характер, то **NPV** определяется по формуле

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

где **ЧДП_{опt}** – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I₀ – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета (**t=0, 1, 2... n**);

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Чистая текущая стоимость является абсолютным показателем. Условием экономичности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение следующего неравенства: **NPV > 0**.

Чем больше **NPV**, тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.

Таким образом, инвестиционный проект считается выгодным, если **NPV** является положительной.

Таблица 24 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Выручка от реализации, тыс.руб	0	254,6	254,6	254,6	254,6
2.	Итого приток	0	254,6	254,6	254,6	254,6
3.	Инвестиционные издержки, тыс.руб.	-212,2	0	0	0	0
4.	Операционные затраты, тыс. руб С+Ам+ФОТ	0	36,6	36,6	36,6	36,6
4.1	Налогооб прибыль=1-4	0	218,0	218,0	218,0	218,0
5.	Налоги Выр-опер=донал.приб*20%	0	43,6	43,6	43,6	43,6
6.	Итого отток Опер.затр+налоги	-212,2	80,2	80,2	80,2	80,2
7.	Чистый денежный поток ЧДП=Пчист+Ам Пчист=Пдонал.-налог	-212,2	174,4	174,4	174,4	174,4
8.	Коэффициент дисконтирования (приведения при $i = 0,20$)	1	0,833	0,694	0,578	0,482
9.	Дисконтированный чистый денежный поток ($c7*c8$)	-212,2	145,3	121,0	100,8	84,0
10.	То же нарастающим итогом (NPV = 239,0)	-212,2	-66,8	54,1	154,9	239,0

Таким образом, чистая текущая стоимость по проекту в целом составляет 239055 д. ед., что позволяет судить о его эффективности.

4.15.3 Дисконтированный срок окупаемости

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

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости.

Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

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

Таблица 25 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1.	Дисконтированный чистый денежный поток ($i=0,10$)	-212,2	145,3	121,0	100,8	84,0
2.	То же нарастающим итогом	-212,2	-66,8	54,1	154,9	239,0
3.	Дисконтированный срок окупаемости	$PP_{диск} = 1 + 66,8/121,0 = 1,55$ месяца				

4.15.4 Внутренняя ставка доходности (IRR)

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому, чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности инвестиций на практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR).

Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость. Эта зависимость следует из таблицы 33 и графика, представленного на рисунке 38.

Таблица 26 - Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№ п/п	Наименование показателя	0	1	2	3	4	NPV
1	Чистые денежные потоки	-212,2	145,3	121,0	100,8	84,0	

2	коэффициент дисконтирован ия						
	$i=0,1$	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	$i=0,2$	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	$i=0,4$	1	0,714	0,51	0,364	0,26	
	$i=0,5$	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	$i=0,6$	1	0,625	0,390	0,244	0,095	
	$i=0,7$	1	0,588	0,335	0,203	0,070	
3	Дисконтирован ный денежный поток						
	$i=0,1$		132,1	100,0	75,7	57,4	153,0
	$i=0,2$		121,0	84,0	58,3	40,5	91,6
	$i=0,4$		103,7	61,7	36,7	21,9	11,8
	$i=0,5$		96,9	53,7	29,7	16,6	-15,1
	$i=0,6$		90,8	47,2	24,6	8,0	-41,6
	$i=0,7$		85,4	40,6	20,5	5,9	-59,9

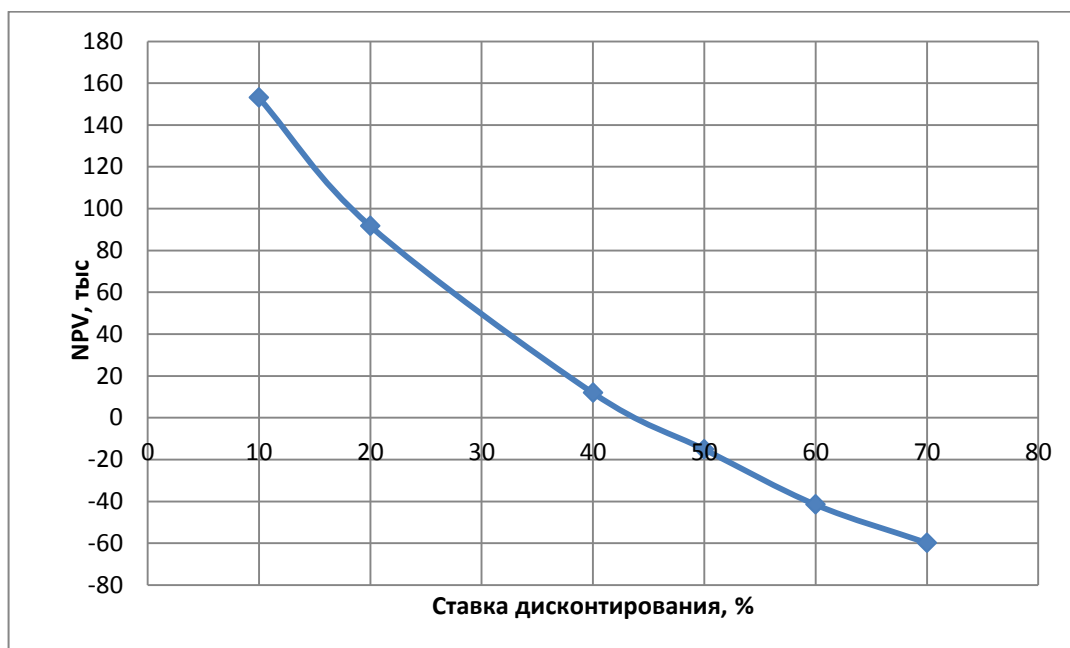


Рисунок 24 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой **NPV** обращается в нуль, носит

название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,50.

4.15.5 Индекс доходности (рентабельности) инвестиций (PI)

Индекс доходности показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций.

Расчет этого показателя осуществляется по формуле

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

где I_0 – первоначальные инвестиции.

$$PI = \frac{145301,8 + 121055,8 + 100821,6 + 84076,22}{212258,0} = 2,12$$

$PI=2,12>1$, следовательно, проект эффективен при $i=0,1$; $NPV=261014,0$

4.15.6 Оценка сравнительной эффективности исследования

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

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{212258,0}{212258,0} = 1$$

$$I_{\Phi}^{a1} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{300825}{212258,0} = 1,41$$

$$I_{\Phi}^{a2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{250825}{212258,0} = 1,18$$

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

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разы.

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

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

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов; a_i – весовой коэффициент i-го параметра; b_i^a , b_i^p – бальная оценка i-го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 27 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Экономичность	0,1	5	4	3
2. Экологичность	0,15	5	3	3
3. Надежность	0,2	5	4	3
4. Безопасность	0,3	5	3	3
5. Простота эксплуатации	0,25	5	3	3
ИТОГО	1	25	17	15

$$I_m^p = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,25 = 5$$

$$I_1^A = 4 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,25 = 3,3$$

$$I_2^A = 3 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,25 = 3$$

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

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{\phi}^p} = \frac{5}{1} = 5$$

$$I_{финр}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\phi}^{a1}} = \frac{3,3}{1,41} = 2,34$$

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^{a2}}{I_{\phi}^{a2}} = \frac{3}{1,18} = 2,54$$

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

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финаi}^{ai}}$$

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

Таблица 28 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,41	1,18	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,3	3	5
3	Интегральный показатель эффективности	2,34	2,54	5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	2,13	1,96	1

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет судить о приемлемости существующего варианта решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

В ходе проведения анализа показателей эффективности инвестиций была получена чистая текущая стоимость (NPV) – 239,0 тыс. руб. Таким образом, данный инвестиционный проект можно считать выгодным, NPV является положительной величиной. Дисконтированный срок окупаемости проекта ($PP_{дск}$) составляет 1,55 месяца. Внутренняя ставка доходности (IRR) – 0,50, что позволяет признать инвестиционный проект экономически оправданным, так как выполняется условие неравенства $IRR > i$. Индекс доходности (PI) – 2,12, и, основываясь на том, что данная величина превышает единицу, можно утверждать, что данная инвестиция приемлема.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

По теме магистерской диссертации опубликовано 2 статьи:

1. D.V. Kiseleva, Y.N. Yurjev, Y.V. Petrakov, D.V. Sidelev, D.V. Korzhenko and E.V. Erofeev «Study on the influence of the magnetron power supply on the properties of the Silicon Nitride films». Journal of Physics: Conference Series. – v. 789. – 2017. – № 012028 – p. 1-6.
2. Киселева Д.В., Юрьев Ю.Н., Петраков Ю.В., Ерофеев Е.В. «Влияние источника питания магнетрона на свойства плёнок нитрида кремния», Сборник научных трудов XIII Международной конференция студентов и молодых ученых, 2017 г., в печати.
3. Петраков Ю.В., Киселева Д.В. «Влияние параметров источника питания магнетрона на свойства плёнок нитрида кремния», Сборник научных трудов XIV Международной конференция студентов и молодых ученых, 2017 г., в печати.