

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

Физико-технический институт
Направление подготовки - физика
Кафедра общей физики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Влияние подслоя углерода и титана на свойства структуры AlN/Si и её сорбцию водорода

УДК 561.23:661.86:661.571:661.68

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б30	Инь Шаньшань		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОФ ФТИ	Никитенков Николай Николаевич	д. ф.-м.н., с.н.с		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Екатерина Валентиновна	Кандидат философских наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Волков Юрий Викторович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой общей физики	Лидер Андрей Маркович	к.ф.-м.н.		

Томск – 2017 г.

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

Физико-технический институт
 Направление подготовки (специальность) - физика
 Кафедра общей физики

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой

 (Подпись) _____ (Дата) Лидер А.М.
 (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
150Б30	Инь Шаньшань

Тема работы:

Влияние подслоя углерода и титана на свойства структуры AlN/Si и её сорбцию водорода
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – образцы кремневых пластин КЭФ(100), модифицированные титана и углерода, насыщенные водородом.
<p>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></p>	<ul style="list-style-type: none"> – проведение литературного обзора; – плазменно-иммерсионная ионная имплантация титана на поверхности кремния и насыщение водородом; – проведение имплантацию углерода в кремний ионным мощным ускорителем и насыщение водородом; – исследование состава поверхности после

	<p>имплантации титана и углерода;</p> <ul style="list-style-type: none"> – рассмотрение электрофизические свойства образцы до и после имплантации; – изучение структуры модифицированного титаном и углеродом кремния до и после насыщения водородом; – рассмотрение концентрации водорода в образцах после насыщения и спектров термогазовыделения H₂; – обсуждение результатов; – заключение;
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Волков Юрий Викторович, доцент ЭБЖ ИНК
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Меньшикова Екатерина Валентиновна, доцент МЕН ИСГТ
Иностранный язык	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	06.02.2017
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОФ ФТИ	Никитенков Николай Николаевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б30	Инь Шаньшань		

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

Студенту:

Группа	ФИО
150Б30	Инь Шаньшань

Институт	Физико-технический	Кафедра	Общей физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	03.03.02 Физика

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Определение стоимости ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых информационных и человеческих</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Знакомство и отбор норм и нормативов расходования ресурсов</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Знакомство с системой налогообложения, со ставками налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет.</i>
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Определение ресурсной, финансовой, экономической составляющей</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- 1. Оценка конкурентоспособности технических решений*
- 2. Матрица SWOT*
- 3. Альтернативы проведения НИ*
- 4. График проведения и бюджет НИ*
- 5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	06.03.2017
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Екатерина Валентиновна	Кандидат философских наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б30	Инь Шаньшань		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
150Б30	Инь Шаньшань

Институт	Физико-технический	Кафедра	Общей физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	03.03.02 Физика

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</i> – <i>опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</i> – <i>негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</i> – <i>чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</i> 	<p>1. При работе на установке «Радуга-Спектр» на работников возможно воздействие следующих вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Производственный шум; – Микроклимат – Освещенность. <p>А также опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Электрическое напряжение. – Пожаровзрывоопасность.
<p>2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<p>По данной теме рассматриваются следующие законодательные и нормативные документы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. – Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 28.12.2013). – СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение". Утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78. – СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Минздрав России, Москва. – 1996. – СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Минздрав России, Москва. – 1997. – ГОСТ 12.1.002-84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Издательство стандартов, Москва. – 1984. – ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к

	<p>проведению контроля. Издательство стандартов, Москва. – 1984.</p> <ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.1.045-84. Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. Издательство стандартов, Москва. -1984. – Федеральный закон Российской Федерации от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 12.03.2014) "О пожарной безопасности". – Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства) 	<p>1. Характеристика факторов изучаемой производственной среды, описывающих процесс взаимодействия человека с окружающей производственной средой:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Воздействие электрического напряжения на организм человека; – Воздействие высокой температуры на организм человека; – Воздействие химических веществ на дыхательные пути и организм человека в целом; – Утечка газа из баллона; – Микроклимат.
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения) 	<p>2. Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (непосредственное питание установки от сети постоянного тока 220 В; средства защиты, предусмотренные конструкцией установки, соблюдение правил и инструкций по электробезопасности при работе); – термическая опасность (печь нагрева образцов; защита специальной конструкцией установки, изолирующие слои, соблюдение правил безопасности и эксплуатации установки); – пожаровзрывобезопасность (баллоны с газом; соблюдение правил безопасности и эксплуатации установки).
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>3. Факторы рабочего места, влияющие на окружающую среду:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Выброс в атмосферу рабочего газа; – Выброс в атмосферу химических веществ;
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению 	<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Утечка газа из баллона; – Возникновение возгорания; – Поражение оператора установки

<p><i>ЧС;</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</i> – <i>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</i> 	<p>электрическим током;</p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</i>
<p><i>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – <i>специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</i> – <i>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</i> 	<p>5. Правовые вопросы обеспечения безопасности</p>
<p>Перечень графического материала:</p>	
<p><i>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</i></p>	<p>1.Схема расположения оборудования; 2. План размещения светильников на потолке рабочего помещения.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	06.03.2017
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Волков Юрий Викторович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б30	Инь Шаньшань		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 92 с., 37 рисунка, 19 таблиц, 40 источника.

Ключевые слова: плазменно-иммерсионная ионная имплантация, кремний КЭФ (100), подслой, покрытие нитрида алюминия, насыщение водородом, сорбции водорода.

Объектом исследования являлись тонкоплёночные системы нитрида алюминия (AlN) на кремнии КЭФ (100), используемые для создания водородных датчиков.

Цель работы - исследование влияния подслоя титана и углерода (имплантированные разными методами) на свойства структуры AlN/Si и её сорбцию водорода.

До магнетронного напыления AlN кремний был имплантирован углеродом и титаном. То есть исследовались системы AlN/Si, AlN/C/Si, AlN/Ti/Si. На всех этапах получения систем исследовались химический состав (методом Рамановской спектроскопии), вольтамперные характеристики поверхности, производилась оптическая микроскопия поверхности. На заключительном этапе полученные системы были насыщены водородом методом Сиверста. До и после насыщения водородом измерены и проанализированы концентрации водорода и спектры термогазовыделения водорода в образцах с разными подслоями. Из полученных результатов сделано заключение: создание подслоя углерода при производстве датчиков водорода на основе пленки AlN приведёт к значительному увеличению времени эксплуатации этих датчиков без ухудшения их характеристик.

Оглавление

Введение.....	13
Глава 1. Исследование свойств покрытия AlN разными методами на кремнии при разных условиях. Постановка вопроса (обзор научно-технической литературы)	15
1.1 Структура AlN/Si как детектор водорода.....	15
1.2 Получение, морфология и оптический анализ пленок-AlN методом распыления на кремнии при различных условиях	16
1.2.1 Оптические свойства пленки AlN/n-Si (100).....	16
1.2.2 Влияние мощности разряда на свойства покрытия.....	17
1.2.3 Влияние времени осаждения на микроструктуру пленок AlN.	20
1.2.4 Влияние легированного кремния в пленке AlN, и температура подложки на свойства системы AlN/Si	24
1.3 Механизм преимущественной ориентации AlN, влияющие факторы на ориентацию покрытия.....	27
1.3.1 Механизм предпочтительной ориентации покрытия AlN	27
1.3.2 Дальнейшее рассмотрение на напряжение в покрытии AlN ...	28
1.4 Физические механизмы датчиков газов	32
1.4.1 Механизм адсорбции-десорбции.....	32
1.4.2 Механизм зондирования газов для легированных датчиков	35
Глава 2. Методы вакуумного ионно-плазменного нанесения тонких пленок и методы анализа поверхности	37
2.1 Факторы, влияющие на формирование пленок при их нанесении вакуумными ионно-плазменными методами.....	37
2.2 Методы вакуумного ионно-плазменного нанесения тонких пленок	37
2.3 Метод магнетронного распыления	39

2.3.1 Магнетронные установки.....	39
2.3.2 Преимущества магнетронного метода напыления	41
2.4 Методы ионно-плазменной дуговой модификации поверхности ..	41
2.4.1 Процесс формирования вакуумно-дуговой плазмы	41
2.4.2 Метод вакуумно-дугового нанесения (формирования) покрытий	43
2.5 Метод ионно-иммерсионной имплантации.....	44
2.6 Мощный ионный ускоритель.....	45
2.7 Процесс насыщения водорода с помощью автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller LP.....	47
2.8 Измерение концентрации с помощью «Анализатора водорода серии RHEN602».....	49
Глава 3. Экспериментальная часть	50
3.1. Приготовление образцов.	50
3.1.1 Ионная имплантация.....	50
3.1.2 Нанесение покрытия AlN.....	51
3.1.3 Насыщение водородом.....	51
3.2. Проведение измерений.	52
3.3. Результаты и обсуждение.....	52
3.3.1 Рассмотрение состава поверхности после имплантации.....	52
3.3.2 Вольт-амперная характеристика образцов до и после имплантации	55
3.3.3 изображение поверхности под микроскопом.....	58
3.3.4 Исследование концентрации водорода в образцах после наводороживания.....	59
3.4 Выводы.....	62
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и	

ресурсоснабжение	63
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения.....	63
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	63
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений	64
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	66
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	66
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	67
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	68
4.3 Бюджет научного исследования	72
4.3.1 Расчет материальных затрат НТИ	72
4.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы.....	73
4.3.3 Отчисления на социальные нужды	74
4.3.4 Накладные расходы.....	75
4.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	75
Глава 5. Социальная ответственность.....	77
5.1 Вредные факторы проектируемой производственной среды	77
5.1.1 Производственный шум	77
5.1.2 Микроклимат	78
5.1.3 Расчет искусственной освещенности.....	79
5.2 Выявление опасных факторов проектируемой производственной среды.....	82
5.2.1 Электро-безопасность.....	82
5.2.2 Пожар взрывобезопасность.....	83

5.3.Охрана окружающей среды.....	85
5.4 Защита в чрезвычайных ситуациях	85
5.5 Правовые вопросы обеспечения безопасности.....	87
Список использованных источников.....	88

Введение

Данная работа посвящена изучению влияния подслоя углерода и титана на свойства структуры AlN/Si полученной методом ионно-плазменного напыления и её сорбцию водорода.

Актуальность проблемы обусловлена следующим. Во многих ситуациях водород является нежелательным загрязнителем, который очень легко воспламеняется в воздухе с нижнего предела воспламеняемости 4,65%. Поэтому обнаружение утечки водорода становится чрезвычайно важным. Одной из наиболее используемых структур для изготовления датчиков водорода является плёнка AlN на кремнии (AlN/Si) [1]. Существенный недостаток такой структуры – быстрая деградация.

Известно что, подслои между плёнкой и подложкой влияют на свойства таких систем, а также на проникновение водорода в подложку. Имплантированный углерод в кремний сильно влияет фазовый и химический состав поверхности, распределение ионов и химических соединений в подложке, электрические свойства поверхности [2–8]. Поэтому важно исследовать влияние различных подслоев на свойства системы AlN/Si. В настоящей работе использовались подслои созданные имплантацией в кремний титана и углерода.

Цель работы – рассмотреть вопрос влияния подслоя углерода и титана на свойства структуры AlN/Si и её сорбцию водорода.

Для достижения данной цели были решены следующие **задачи**:

1. Имплантировать титан и углерод в кремний и нанести нитрид алюминия на кремний методом магнетронного распыления;
2. Проанализировать состава поверхности методами Рамановской спектроскопии;
3. Измерить ВАХ поверхности образцов на каждом этапе получения AlN/Si.
4. Насытить методом Сиверса образцы (AlN/Si AlN/C/Si AlN/Ti/Si) водородом, исследовать структуру поверхности этих образцов до и после насыщения водородом, измерить концентрацию и спектры ТСГВ на установке LECO и установке для ТСГВ.
5. Сделать выводы о влиянии подслоя углерода и титана на свойства структуры AlN/Si и её сорбцию водорода.

Глава 1. Исследование свойств покрытия AlN разными методами на кремнии при разных условиях. Постановка вопроса (обзор научно-технической литературы)

В данной части представлен обзор литературы, связанной с вопросом изменения свойства структуры AlN/Si в сфере водорода, и рассмотрены разные методы получения покрытия AlN на кремнии, и разные свойства соответствующих полученных пленок, а также влияние разных условий на свойства структуры.

1.1 Структура AlN/Si как детектор водорода

В работе [1] были исследованы влияния времени осаждения на свойства газо-детектирования структуры AlN/Si, из данной работы мы можем узнать один из многих механизмов детектирования водорода. В эксперименте, они использовали покрытия AlN в качестве верхнего электрода, и нижнюю сторону подложки Si в качестве другого электрода. Они на покрытия AlN ещё добавили слой Al или Pd, которые играют роль каталитического слоя. Положив данный детектор в сферу вакуума или водорода, они измерили изменение емкости данного детектора в зависимости от напряжения.

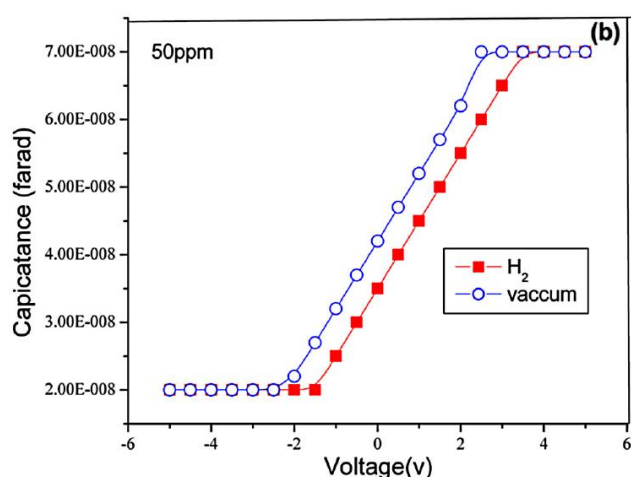


Рис. 1.1. Изменение емкости датчика Pd/AlN/Si в сфере вакуума и водорода (толщина слоя AlN – 114 нм) [1].

В структуре Pd/AlN/Si, молекулы H₂ диссоциируют на поверхности каталитического металла Pd в отдельные атомы водорода H. Эти атомы затем быстро диффундируют через находящийся в разделе металл-диэлектрик металлический слой, где они предпочтительно захватываются в стабилизированных местах адсорбции. Межфазный слой водорода, создаваемый этим процессом, существует в дипольном слое и создает на датчике дополнительное падение напряжения, которое может быть измерено как сдвиг напряжения в кривой CV конденсатора.

Структура Pd/AlN/Si (толщина слоя AlN – 102 нм) показала сдвиг напряжения приблизительно 0,4 В на кривой CV и сдвиг напряжения 0,8 В для случая толщины слоя AlN 114 нм. Кривая данного случая представлена на рисунке 1.1. Поэтому, структура Pd/AlN/Si указывает на перспективность улучшение характеристик зондирования водорода.

В работе [9] тоже были измерены изменения емкости структуры Al/AlN/Si от напряжения (для структур, полученных в разных температурах). При сравнении с результатом в работе [1], они сильно отличаются.

1.2 Получение, морфология и оптический анализ пленок-AlN методом распыления на кремнии при различных условиях

1.2.1 Оптические свойства пленки AlN/n-Si (100)

В работе [10] была исследована морфология поверхности и оптические свойства структуры AlN/n-Si (100), изготовленной методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления.

Согласно источнику, покрытие AlN было получено в смеси газов Ar и N₂ (1:3) на современном оборудовании Катод-1М. Мощность высокочастотного разряда достигнута примерно 1600 Вт. Начальное давление – 8×10^{-4} Па, начальное давление – 2 Па. Толщину пленок контролировали при нанесении покрытия, составлялась 23 нм/мин.

Выращенные пленки AlN имели толщину из 2-3 μm . Кремний n-Si (100) с удельным сопротивлением 20-60 Ом/см использовали в качестве подложки.

Согласно эллипсометрическим исследованиям (ЛЭФ-3М-1 Эллипсометр) под различными углами, показатель преломления структуры AlN/n-Si n имеет значение около 1.9, когда длине волны равно 633 нм. Показатели преломления n определяется из спектров в диапазоне длины волн 618 – 655 нм. Показатели преломления не больше значения n в случае кристаллов ($n = 2,17$). Данный показатель преломления можно считать характеристикой плотных аморфных покрытий AlN. Плотная структура пленки становится малой величиной шероховатости пленки, которая примерно равно 1 нм.

По результату оптического исследования, пленки AlN становятся прозрачными и оптически однородными в широком диапазоне длин волн.

Итак, данная работа показывает, что структура AlN/n-Si (100), изготовленная методом высокочастотного реактивного магнетронного распыления, становится плотной прозрачной аморфной пленкой с кристаллическими зернами в матрице нитрида алюминия.

1.2.2 Влияние мощности разряда на свойства покрытия

В работе [11] был изучен рост буферного слоя AlN на кремнии методом магнетронного распыления при различных мощностях разряда.

Как утверждается, у устройства магнетронного распыления РФ камера с целевым диском (диаметром 120 мм), который охлаждается водой. В исследовании используется алюминии чистотой 99,999% как мишень. Перед тем как положить подложку-кремний в камеру для распыления, очистили кремний раствором $\text{H}_2\text{O}/\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$ (6:1:1 по объему) при 70°C и раствором $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OH}$ (5:1:1 по объему) при 70°C, затем погрузили в разбавленный раствор 5% HF, чтобы удалить оксид на поверхности. После

такой чистки подложку ополоснули в деионизированной воде и высушили в атмосфере N_2 . Система осаждения стабилизировалась в вакууме примерно $2,8 \times 10^{-7}$ Торр, и смесь газов N_2 и Ar вводили в камеру после достижения желаемого давления. Мишень предраспылилась в течение 10–20 мин для очистки и уравнивания с поверхностью мишени перед осаждением покрытия. Распыление продолжились 1 час под мощностью разряда от 200 до 500 Вт. Температура подложки была установлена на уровне $350^\circ C$, и расстояние между мишенью и подложкой постоянно поддерживалось приблизительно 8 см. Во времени осаждения давление в камере было около 6 мТорр. Толщина осажденной пленки 200-260 нм.

Кристаллические структуры покрытия AlN были охарактеризованы с помощью рентгеновской дифракции (XRD, Simens D5005). Размеры кристаллитов пленок AlN и толщины пленки определили с помощью автоэлектронного эмиссионного сканирующего электронного микроскопа (FESEM; JEOLJSM-6340F). Преобразование Фурье ИК-спектроскопии (FTIR; Perkin-Elmer C2000) использовались для идентификации химических составов химического и структур пленок. Микроструктура и дефекты покрытия пленок наблюдались с помощью просвечивающего электронного микроскопа.

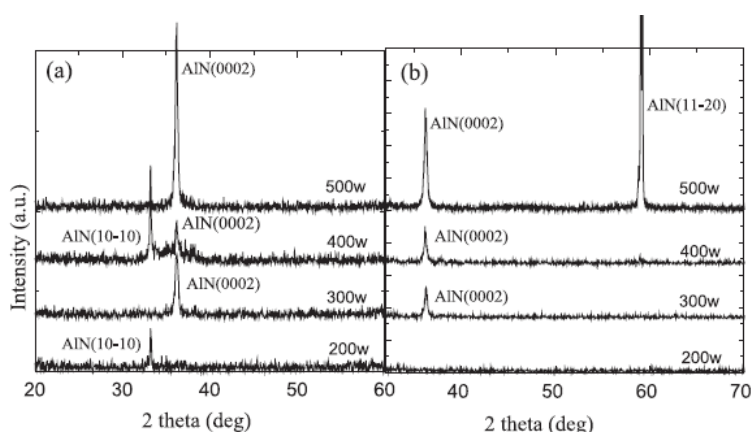


Рис. 1.2. Рентгеновские спектры наблюдаемые покрытия AlN распыленных на подложках $Si(100)$ (а) и $Si(111)$ (б) при мощности разряда 200, 300, 400 и 500 Вт [11].

Кристаллическая структура пленок AlN была исследована XRD с использованием CuK_{α} (1.5406 Å) излучения. Рис. 1.2 показывает рентгеновские дифракционные спектры образцов, приготовленных при мощности разряда 200, 300, 400 и 500 Вт. На подложках Si(100), осажденные пленки AlN проявились особенности в 33° (при (1010)AlN) и 36° (в случае (1010)AlN) (рис. 1.2 (а)). Пленки показывают (1010) предпочтительные ориентации при мощности разряда 200 Вт, по сравнению с ориентациями смешанных (0002) и (1000) при мощности разряда 400 Вт. Однако под мощностью разряда 300 и 500 Вт пленки показывают высокую ориентацию по оси z. Выравнивание пика Si (100) с AlN (0002) указывает, что базисная плоскость (0001) параллельна с плоскостью Si (100). Когда Si (111) использовали, покрытия AlN демонстрировали особенности в 36° и 59° , соответствующие плоскости (0002) и (1120) покрытия AlN (рис. 1.2 (б)). При низкой мощности разряда, т.е. 200 Вт, пленки AlN не представили предпочтительные ориентации. Пленки AlN показывают сильные (0002) ось-преимущественные ориентации, когда мощность достигла до 300 Вт. Тем не менее, ориентация покрытия AlN (1120) постепенно увеличивается, чтобы покрытия AlN показывали ориентации смешанного (0002) и (1120) при мощностях выше 400 Вт.

Размеры кристаллов были определены с помощью FESEM фотографии. На рис. 1.3 показаны типичные FESEM фотографии, которые

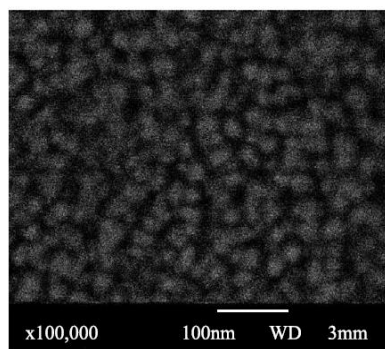


Рис. 1.3. Типичные FESEM фотографии покрытия AlN на подложке Si (100) при мощности 500 Вт [11].

получены через распыление при 500 Вт. Размеры кристаллитов AlN на поверхности Si (100) являются 26, 25, 35 и 40 нм при выпускных мощностях 200, 300, 400 и 500 Вт соответственно. Что касается подложки Si (111), размеры кристаллита являются 28, 30, 34 и 42 нм соответственно. В общем случае подвижность активных видов увеличивается с увеличением мощности ионного распыления. Соответственно, зарождение и вероятность роста увеличиваются.

Итак, размер кристаллов возрастает с увеличением мощности. Однако размеры кристаллов увеличиваются медленно при низкой мощности распыления. Поэтому размер кристаллов явно не изменяется при 200 и 300 Вт на Si (100).

1.2.3 Влияние времени осаждения на микроструктуре пленок AlN

В работе [1] получали покрытия AlN на кремний методом магнетронного распыления, но в этом процессе мощность разряда сохранилась постоянной, а время осаждения на кремний оказалось разным, что, как оказалось, влияет на свойства системы AlN/Si.

Пленки AlN нанесены с мишенью Al (99,9% чистота) с помощью системы магнетронного распыления, работающей при 60 Вт катодной мощности. Процесс распыления осуществлялся со смесью чистого газа Ar и N₂, которые вводились в камеру через контроллеры массового расхода. Осаждение пленок AlN может происходить в широком диапазоне температур от комнатной температуры до 400°C. Как утверждают авторы исследования, осаждение при высокой температуре имеет недостаток производства деградации подложки, включение примесей и тепловое разрушение с ростом пленки. Поэтому пленки AlN растут на подложке Si (100) при комнатной температуре. Исходный оксид на кремнии удаляют через стадию травления в разбавленном HF растворе. После этого начального процесса очистки газ Ar

высокой чистоты был введен в камеру и камера откачана до уровня ниже 1×10^{-3} Па. Перед каждым запуском мишень была предварительно распылена аргоном в течение 5 мин. Во времени предварительного распыления питания мощности и давление газа Ar оставалось постоянным при 60 Вт и 1×10^{-3} Па соответственно. Азот затем был введен в камеру, и реактивное ионное распыление было инициировано. Пленки AlN начали расти на n-типа подложке Si в течение разного времени при 50% концентрации азота, в процессе осаждения, остальные параметры сохранялись постоянными. Параметры осаждения и диапазоны, используемых при подготовке тонких пленок AlN приведены в таблице 1.1.

Толщины пленок, измерены с помощью профилометра были

Таб. 1.1. Параметры осаждения.

Параметры	Значения
Процесс осаждения	DC магнетронного распыления
Магнетрон	Диск
Площадь катода (мишень), дюймов	2
Материал мишени	Алюминий
Напряжение разряда, В	510
Ток разряда, мА	117
Подложка	Кремний (1 0 0).
Температура основания в градусах Кельвина	300
Рабочие газы	Ar + N ₂
Начальное давление в камере, мбар	1.3×10^{-4}
Частное давление активного N ₂ , мбар	5×10^{-5}
Суммарное давление в камере, мбар	1×10^{-3}
Расстояние между катодом и анодом, см	4
Время осаждения, минут	2,4,6,8

обнаружены 49, 81, 102 и 114 нм соответственно в течение времени осаждения 2, 4, 6 и 8 мин. Тип кристаллической структуры, ориентации и размеры зерна были рассмотрены дифракции рентгеновских излучений (XRD). Колебательные фононные моды покрытия AlN изучены с помощью инфракрасной Фурье (FTIR) спектрометр; и микроструктура и морфология

поверхности слоев были проверены с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM). Пленки AlN осаждены на подложке Si (100) в течение разных времен осаждения, одновременно, сохраняли давление распыления, мощность мишени, расстояние и концентрация азота константами. Анализ дифракции рентгеновского излучения проводил с использованием RIGAKU рентгеновского дифрактометра, который использует $\text{Cu } K_{\alpha}$ (1,5406Å) излучения; θ - 2θ скан был выполнен с размером шага 0,05 и скоростью

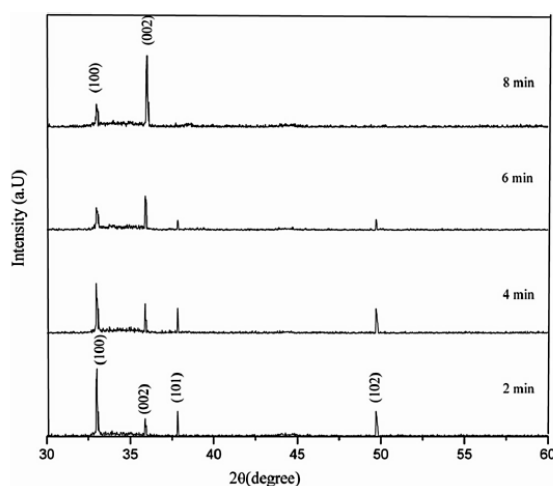


Рис. 1.4. Рентгеновская дифрактограмма тонких пленок AlN, нанесенных на подложке Si (100) в течение времени осаждения: (a) 2 (б) 4 (с) 6 и (d) 8 мин [1].

сканирования 3 с на шаг в диапазоне 10-80. Дифракционные плоскости в θ - 2θ методом параллельны поверхности образца, поэтому, этот метод может быть полезным при изучении предпочтительной ориентаций тонких пленок. Влияние времени осаждения на кристаллической ориентации покрытия AlN было исследовано. Все осажденные пленки были обнаружены, что они имеют гексагональную структуру вюрцита. Рис. 1.4 показывает рентгенограммы пленок AlN на подложке Si в течение разных времени осаждения.

Микроструктурные свойства и расстройтва решетки были изучены на основе анализа XRD пиков, и перечислены в таблице 1.2. Средний размер кристаллитов был найден ~ 60 нм. Очевидно, что напряжение и плотность

дислокаций возрастали с увеличением времени осаждения, которые показали увеличение столкновения частиц из-за увеличения напряжения в решетке.

Таб. 1.2. Структурные параметры, рассчитанные по данным XRD.

Время осаждения (мин)	Толщина (нм)	D расстояние (Γ_{HBY}) Å	Размер кристаллитов (D), (нм)	Штамм (ε) $\times 10^{-4}$	Плотность дислокаций (δ)
2	49	2,7137	61.40	4.48	2,8492
4	81	2,7105	61.40	4.82	2,9491
6	102	2,7121	57.47	5.47	3,3807
8	114	2,7121	57.47	5.78	3,8147

Морфология поверхности пленки были анализированы с помощью сканирующего электронного микроскопа. Рис. 1.5 показывает морфологию пленки AlN, полученных в течение четырех различных времен осаждения.

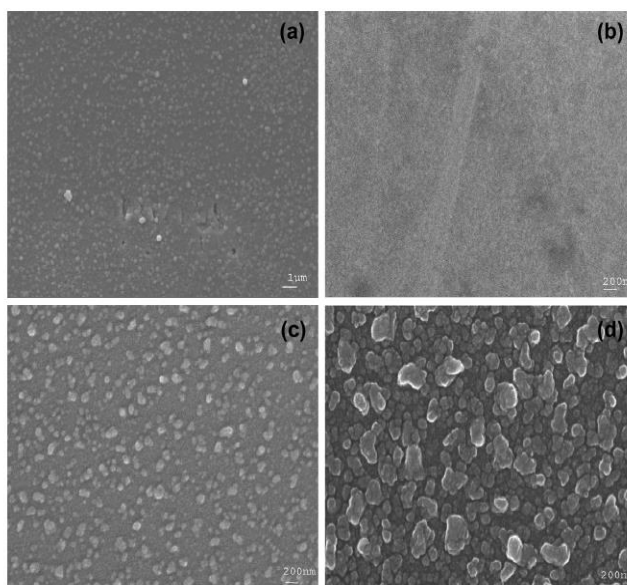


Рис. 1.5. Морфология поверхности пленок AlN, полученных на поверхности подложки Si (100) в разное время осаждения: (а) 2 (б) 4 (с) 6 и (d) 8 мин [1].

Была наблюдаена гранулированная морфология с однородными регулярными гладкими круглыми зернами. Формирование различных структур в виде мозаики в пленке считается результатом разного времени осаждения, соответственно, относятся к разным механизмам роста тонких пленок. В ранних стадиях роста, остров со случайной кристаллографической ориентацией были сформированы на подложке. Атомы, падавшие на остров,

которое предлагает высокий мобильность, могут доходить до края островов. Это процесс будет способствовать латеральный рост, приводящий к оси с ориентированной, как показано на рис. 1.5 (d). Из фотографии SEM видно, что увеличивающийся рост кристаллов со временем осаждения, и, следовательно, расширенное осаждение в течение 8 мин привело к улучшению кристаллической структуры.

1.2.4 Влияние легированного кремния в пленке AlN, и температура подложки на свойства системы AlN/Si

Легированный кремний и нелегированный тонкие пленки нитриды алюминий были получены с помощью техники распыления с постоянным током. Al порошок (99,99%), смешанный с различными количественными порошками Si (99,99%), в различных атомных процентах (0%, 3%, 5%, 7% и 9%) прессовали в держатели алюминия под давлением 100 кг/см² были использованы в качестве мишеней для распыления при постоянном токе. Мишень была использована в качестве верхнего электрода, и отрицательный конец источника питания был подключен к нему. Подложки были размещены на нижнем электроде, который был соединен с источником питания. Давление в камере при осаждении составляет 0,3 мбар и соотношение скорости потока аргона и азота поддерживался 1:0,7. Расстояние между анодом и катодом является 5 см, напряжение постоянного тока 2 кВ, и время осаждения 2 ч. Толщина пленки, нанесенной на подложки Si измерялись с помощью поперечного сечения SEM изображение и была найдена примерно 700 нм. Для электрического измерения электрод Al был осажден на покрытии AlN (осажденный на подложки алюминиевой фольги) с использованием магнетронного распыления с мишенью Al. В этой работе были исследованы свойства полевого эмиссия у покрытия AlN с различными

концентрациями легирования Si, где пленка AlN синтезирована при температурах подложки 70 °C, 150 °C и 200 °C).

На рис. 1.6 показана картина дифракции рентгеновских излучений

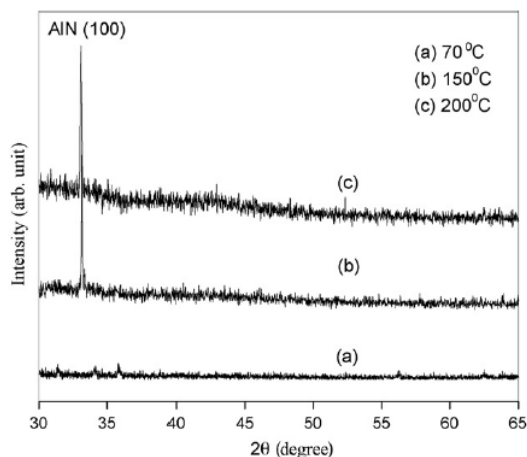


Рис. 1.6. Рентгенограмма пленок AlN, приготовленных при разных температурах подложки [12].

образцов, содержащих чистый AlN, которые приготовлены при различных температурах подложки. Видно, что пленки имеют единственный (100) дифракционный пик при $2\theta = 33,15^\circ$, которые указывают на рост высоко (100) ориентированных пленок AlN. Он также показывает, что степень кристалличности возрастает с повышением температуры подложки.

На рисунке 1.7 показана картина дифракции рентгеновских излучений для пленок AlN, легированных различными количественными Si, покрытия AlN были получены при температуре подложке 200 °C. Рисунок показывает, что кристалличность уменьшается с увеличением процентов легирования кремний в покрытиях AlN. Но кристалличность пленок AlN с более высоким содержанием Si (7 ат.% и 9 ат.%) была мала. Рентгеновская дифракционная картина пленок AlN, легированных Si также подтвердила существование фазы чистого гексагонального нитрида алюминия с единственным пиком, соответствующим плоскости (100) для AlN с константой решетки, $a = 0.3114$ нм и $c = 0.4986$ нм.

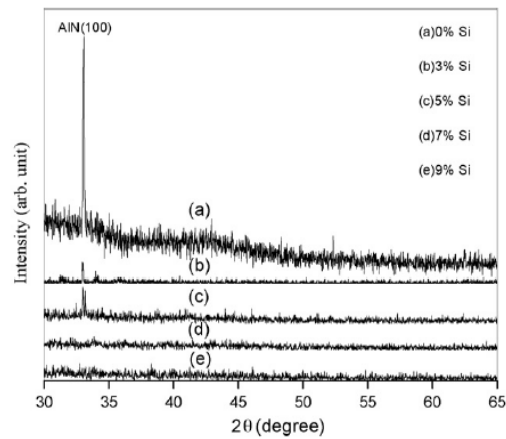


Рис. 1.7. Рентгенограмма легированных Si пленок AlN, полученных при 200°C [12].

Рис. 1.8 (а) показывает АСМ изображение (в контактном режиме) нелегированной пленки AlN, осажденной при 200° С температуре подложки. От графика зависимости размеров зерна от отсчета (показано на рис. 1.8 (б)) было установлено, что средний размер зерна был примерно 9,5 нм. И размер крупинки пленок AlN возрастает с увеличением температуры подложки.

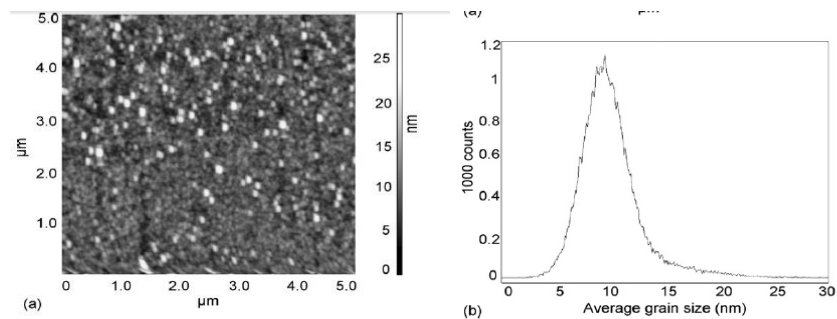


Рис. 1.8. (а) АСМ изображение чистой пленки AlN, осажденной при 200°C на подложке Si. (б) зависимость размеров зерен от отсчетов [12].

1.3 Механизм преимущественной ориентации AlN, влияющие факторы на ориентацию покрытия

1.3.1 Механизм предпочтительной ориентации покрытия AlN

Кристаллографические ориентации зерен в пленке определяется предпочтительным ростом определенной плоскости кристалла над другими. Механизм преимущественной ориентации пленок AlN можно объяснить структурой кристаллической решетки AlN. Как показано на рис. 1.9,

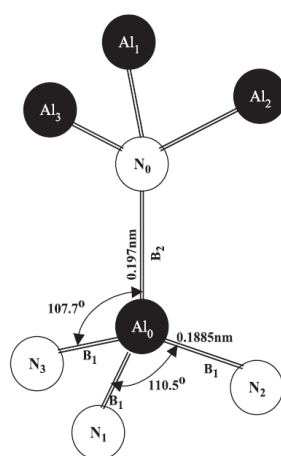


Рис. 1.9. Структура пленок AlN/Si [11].

шестиугольная структура покрытия AlN имеет два вида Al-N связи, которые называют B_1 и B_2 , где энергия связи B_1 относительно больше связи B_2 . В структуре AlN, плоскость (10-10) состоит из связи B_2 , одновременно, плоскость AlN (0002) и (11-20) состоят из связи B_1 и B_2 вместе. Поэтому, энергия, необходимая для распыления частицы в плоскости (0002) и (11-20) относительно большей. Под низкой мощностью разряда, пленки показывает а-оси-ориентацию ((10-10) формирование плоскости) или неpreferential ориентации. С увеличением мощности разряда, рост пленок AlN демонстрирует ориентацию по оси с ((0002) формирование плоскости) или смешанной ориентацию ((0002) и (11-20) формирование плоскости). Результаты XRD также показывают, что предпочтительные

ориентация пленок AlN на поверхности подложке Si(111) легче контролировать, чем на Si(100).

В работе [13] тоже были исследованы характеристики микроструктуры методом просвечивающего электронного микроскопа при процессе роста пленки нитрида алюминия на подложке кремния. Из их работы знаем, что AlN растет в 2 этапа, сначала были образованы удлиненные AlN-островки вдоль направления $[1120]$ AlN // $[110]$ Si на подложке Si (110), а затем они быстро сливались в тонкую пленку.

1.3.2 Дальнейшее рассмотрение на напряжение в покрытии AlN

Спектры дифракции рентгеновских лучей также представит, что полная ширина на половине максимума (FWHM) пика (0002) изменяется вслед за изменением мощности выпуска и ориентации подложек. Когда кремний (100) использовался в качестве подложки, полуширина достигла 0.434° при мощности разряда 300 Вт. При 400 Вт снизилась полуширина до 0.3428° и 0.3278° при 500 Вт. Сравнительно, на Si(111), полуширина (0002) пика не изменила явно, когда изменились мощности разряда, все обладают малой значением около 0.3° . Хотя покрытие AlN показывает только (0002) предпочтительную ориентацию оба на подложках Si (100) и Si (111) в тех же условиях осаждения (300W), полуширина пика (0002) для пленок на поверхности Si (111) значительно меньше, чем на Si (100). Разница в FWHM пиков РСА могут быть исследованы размерами зерна и распределением напряжений. Как известно, размер кристаллитов и неоднородное поле деформации с локальным параметром решетки изменяться из-за границы, и дислокация влияет на уширенную ширину пика дифракции, это влияние можно выражено следующим уравнением

$$\beta = k\lambda / (d \cos \theta) + \varepsilon \tan \theta, \quad (1.1)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения, θ – угол дифракции, ε является напряжением, d – размер кристаллитов, k является константой (0.94 для профилей Лоренцев линий и малых кристаллов с одинаковыми размерами), и β является исправленной полной шириной на половине максимума пика. Размеры кристаллов были определены с помощью FESEM. Размеры кристаллитов AlN на поверхности Si (100) являются 26, 25, 35 и 40 нм при выпускных мощностях 200, 300, 400 и 500 Вт соответственно. Что касается подложки Si (111), размеры кристаллита являются 28, 30, 34 и 42 нм соответственно. В общем случае, подвижность активных видов увеличивается с увеличением мощности ионного распыления. Соответственно зарождение и вероятность роста увеличиваются. В результате, размер кристаллов возрастает с увеличением мощности. Однако, размеры кристаллов увеличиваются медленно при низкой мощности распыления. Поэтому, размер кристаллов не изменялся много при 200 и 300 Вт на Si (100). Подставляем измеренные размеры кристаллов в уравнение (1.1), и напряжение в пленках можно определить по формуле

$$\varepsilon = \beta / \tan \theta - k\lambda / (d \sin \theta). \quad (1.2)$$

В рис. 1.10 показаны зависимости напряжения подложки AlN от

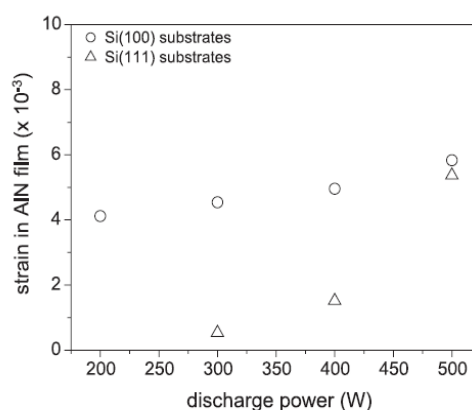


Рис. 1.10. Зависимости напряжения в осажденных подложках AlN от мощности разряда при распылении для Si (100) и Si (111) [11].

мощности разряда для Si (100) и Si (111). Видно, что напряжение в осажденных пленках увеличивается с высокими мощностями разряда независимо от ориентации подложек Si. Увеличение напряжения кровно связано с увеличением столкновения между частицами, когда увеличивают мощности. Ещё можно отметить, что напряжение между осажденными пленками AlN и подложками Si (111) уменьшается по сравнению с Si (100). Напряжение пленки AlN на поверхности Si (100) не изменяется много при изменении мощности разряда, а напряжение пленок AlN на Si (111) явно зависит от мощности разряда.

Существование остаточных напряжений в нанесенных пленках возникает из трех факторов: (1) внутренние присущие напряжения из-за дефектов; (2) несоответствующие напряжения решетки или доменов; (3) тепловое остаточное напряжение из-за различного коэффициента теплового расширения между подложками и нанесенными покрытиями. Дефекты в осажденных пленках AlN становятся сложными, таких как вакансии, дислокации, границы зерен и примеси. Рис. 1.11. показывает поперечное

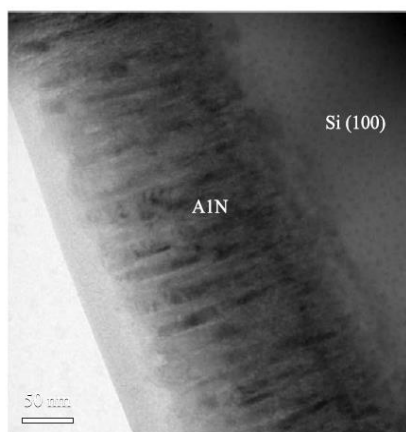


Рис. 1.11. Поперечное частное ТЕМ изображение покрытия AlN на поверхности Si (100) [11].

частное ТЕМ изображение покрытия AlN на поверхности Si (100). Морфология покрытия на поверхности Si (111) аналогично. Видно, что AlN слой имеет колоннообразные столбчатые структуры, состоящие из слегка

неправильно-ориентированных подложек, которые ограничивают пронизывающими дислокациями. Благодаря высокому сродству между атомами алюминия и кислорода, высокое включение кислорода является еще одним источником дефектов в покрытиях AlN. Высокая мощность разряда может вызвать высокое напряжение в пленках AlN. По мере увеличения мощности разряда, последствия пере распыления, вход тепла в поверхности и повышение поверхностной подвижности осаждение генерация точечных дефектов намного проявляются. Кроме того, дефекты, вместе с пере распылением также вызывают разрушение роста колоннообразных морфологии и усиление напряжения в покрытиях AlN. Эти дефекты, несомненно, вызывают присущее напряжение в покрытиях AlN. Кроме того, мобильность адатомов усиливается при высокой мощности разряда, в связи с увеличением передачи кинетической энергии от бомбардирующих частиц, и, поэтому, осажденная температура также повышает. Так как тепловая деформация в пленке AlN, нанесенной при высокой температуре дается по формуле $(\alpha_{AlN} - \alpha_{Si})\Delta T$ (α – коэффициент теплового расширения, ΔT – разность между температурой осаждения и комнатной температурой). Пленки AlN осажденные при высокой мощности разряда имеют большее тепловой напряжение.

Через изучение кристаллографической ориентации напряжение в пленках, которые распылены при разных значениях мощности разряда, видно, что ориентация подложки Si могут сильно влиять напряжение в осажденных пленках. Для Si (100), большое несоответствие решетки между AlN (0001) и Si (100) является основным вкладом в большое напряжение в формованных пленках, и напряжение меняется немного с изменением мощности разряда. Для Si (111), напряжение увеличивается явно с изменением значения мощности разряда. Напряжение, введенными дефектами и термическим несоответствием являются основной вкладом в остаточное напряжение в пленках.

1.4 Физические механизмы датчиков газов

Датчик газов сделанный из окиси полупроводника обнаруживает горючий газ через контроль изменения электрического сопротивления поликристаллического элемента. Адсорбированные атомы и молекулы на поверхности полупроводника влияют на его свойства, такие как электропроводность и поверхностный потенциал. Далее рассмотрим несколько механизмов работы датчиков газов.

1.4.1 Механизм адсорбции-десорбции

Значение энергии адсорбций возможно за счет электронов, остающихся в определенных диапазонах или в особых зонах энергии в кристалле. Энергетические зоны, в которых не существует электронов никаких состояний, является шириной запрещенной зоной (E_g). В полупроводнике самая высокая энергетическая зона, занимаемая фундаментальными состояниями электронов, является валентной зоной. Верхняя зона, в которой электроны «свободны», называется зоной проводимости. Зона проводимости будет совершенно пуста в идеальном кристалле при 0 К. Схема зоны полупроводников кремния показана на рис. 1.12, где E_c – дно зоны проводимости (или потолок запрещенной зоны); E_g –

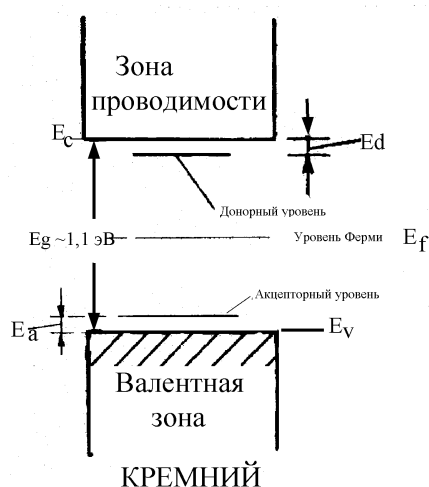


Рис. 1.12. Схема зонной структуры кремния.

ширина запрещенной зоны; E_v – потолок валентной зоны (или дно запрещенной зоны); E_f – энергия уровня Ферми; E_d – энергия донорного уровня; E_a – энергия акцепторного уровня.

Полупроводник применяется для зондирования газов благодаря тому, что поверхностные электроны могут быть переданы или удалены из зоны проводимости, для того, чтобы вызвать последовательные изменения в проводимости материала.

Например, в случае SnO_2 , ширина запрещенной зоны E_g которого вокруг 3.6eV , n-типа проводимость обусловлена вакансией кислорода, который могут быть отдельности или дважды ионизован. Они выступают в качестве состояния доноров с уровнями энергии, расположенными на $0,03$ и 0.015eV ниже зоны проводимости. Таким образом, в n-типа полупроводнике, как показано на рисунке 1.13, состояния донора передают электроны в зону

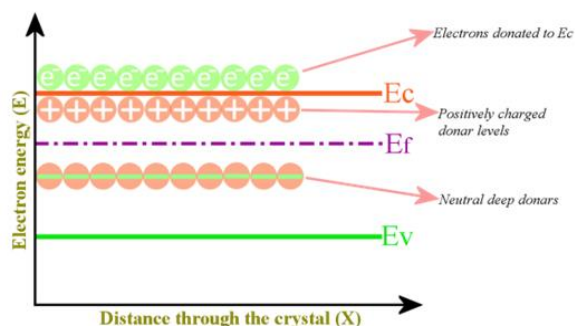


Рис. 1.13. Схема зоны полупроводника n-типы [14].

проводимости и повышают проводимости материала. Как следствие этого пересыщения электронов в зоне проводимости, уровень Ферми повышается.

Адсорбция внешних окисляющих молекул газа на поверхности кристалла приводит к резкому возмущению в периодичности кристаллической решетки. Поэтому, поверхностные атомы или ионы имеют неполное координационное число (число первых соседей), что приводит к перегруппировке и большую реакционную способность по сравнению с таковым объемными атомами или ионами. Это прерывание периодичности решетки достаточно вызвать особые локализованные состояния электронов

на уровне поверхности. Эти особые локализованные состояния электронов, присутствующие на поверхности кристалла действует в качестве акцепторного и донорного уровня энергии. Рис. 1.14 показана схема

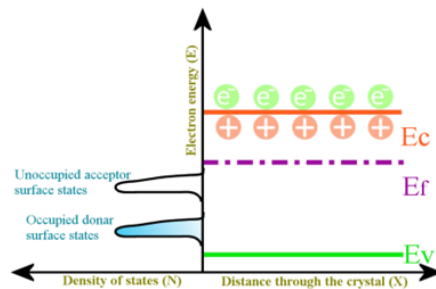


Рис. 1.14. Схема зоны с поверхностью кристаллов и наличие поверхностных состояний [14].

запрещенной зоны с уровнями, созданными состояниями поверхностных электронов кристаллов (при наличие поверхностных состояний).

Возможны случаи, когда электроны в запрещенной зоне находятся на гораздо более высоком уровне энергии, чем уровень акцепторной. Поэтому, они будут двигаться из зоны проводимости к состоянию с меньшей энергией под действием этого новой энергетически более выгодной конфигурации. Когда происходят такие переходы, заряд накапливается на поверхности и встречное в объеме (далее встречное в том, что из ионов-доноров). Этот заряд и счетчик зарядов создает электрическое поле и далее обедненная

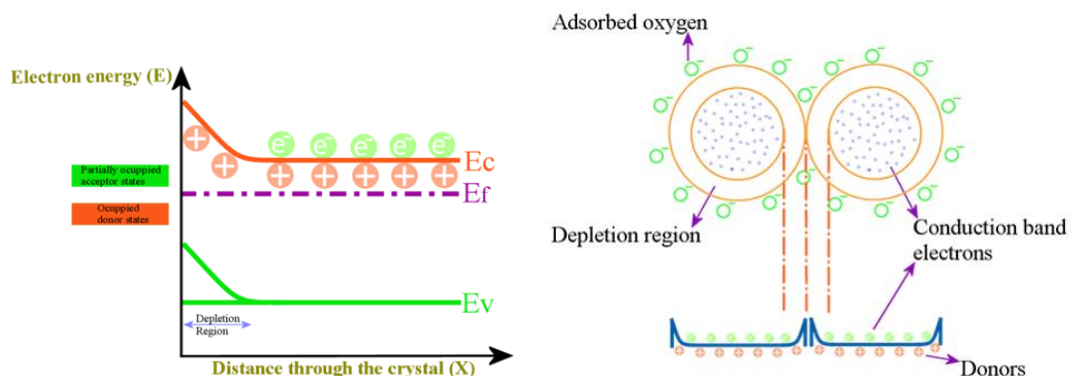


Рис. 1.15. (а) n-типа полупроводника после того, как заряд переместился из ионов доноров в состояние поверхности и обедненной области. (б) схема двух зерен порошки металлического оксида [14].

область формируется на поверхности. Рис. 1.15 (а) показывает n-типа полупроводника после того, как заряд переместился из ионов доноров в состояние поверхности и обедненной области. На рис. 1.15 (б) представлена схема двух зерен порошки металлического оксида. Адсорбированный кислород будет создавать слой поверхностного заряда, который действует как межкристаллитной потенциального барьера, так и называется барьером Шоттки. Электроны должны преодолеть этот барьер Шоттки, для того, чтобы перейти от данного зерна к другому.

1.4.2 Механизм зондирования газов для легированных датчиков

Уменьшение размера кристаллитов полупроводникового материала может значительно повысить чувствительность датчика; тем не менее, такие мелкие нужные меры трудно достичь в практическом детектировании. Также, можно увеличивать чувствительность датчиков через контроль каталитической активности материала датчика. Тем не менее, на практике, широко используемые датчики газа на основе оксидов металлов являются наименее активными с каталитической точки зрения.

Для того чтобы изменить или контролировать свойства поверхности, часто легируют благородные металлы. Благородные металлы являются высокоэффективными оксидными катализаторами, наиболее важные эффекты добавления благородного металла являются увеличение максимальной чувствительности и скорости реакции, а также понижение температуры максимальной чувствительности и селективности к специальным газам. Широкое разнообразие методов, в том числе пропитка, распыление и термическое испарение, используется для добавок благородных металлов. Различные легирующие состояния могут быть получены различными способами, среди которых, две механизмы стали

широко приняты для описания химических и физических процессов с добавками: электронные и каталитические механизмы.

Химическая сенсibilизация: Здесь действие добавки в общем случае показывается в двух сторонах: а) металлический кластер показывает выше коэффициент приклеивания газам, чем полупроводникам, и б) на кластере, почти все молекулы газа диссоциированы, в дальнейшем все продукты диссоциации выльются на полупроводниковой матрице. Поэтому, как правило, действие добавки заключается в адсорбции на катализаторе с последующей диффузией из катализатора на поддержке. Поскольку энергия активации для десорбции значительно выше, чем для диффузии, поддержка может выступать в качестве источника реагирующего питания, хотя противоположный случай или оба могут также происходить.

Электронная сенсibilизация: В этом есть электронное взаимодействие между катализаторами и полупроводником через пространственный заряд, созданный в полупроводнике поверхностными кластерами. Присадки на поверхности полупроводника выступают в качестве рецепторов, и полупроводник действует как преобразователь изменений, происходящих на поверхности при адсорбции газов. Состояние окисления частиц изменяется вслед адсорбцией газом, вызывая соответствующее изменение электронного состояния полупроводника.

Глава 2. Методы вакуумного ионно-плазменного нанесения тонких пленок и методы анализа поверхности

В данной части рассмотрены методов вакуумного ионно-плазменного получения тонких пленок и методов анализа поверхности [15], методов имплантации, а также методы насыщения водорода и анализа концентрации водорода в образцах.

2.1 Факторы, влияющие на формирование пленок при их нанесении вакуумными ионно-плазменными методами

Исследуя зарождение и рост тонких пленок в условиях осаждения их вакуумными ионно-плазменными методами, необходимо учитывать следующие факторы, которые могут существенно влиять на механизмы, рассмотренные в пп. 2.2–2.5 [16]:

Радиационно-стимулированную диффузию, в материале, обусловленную ионной бомбардировкой.

Ионное распыление поверхности частицами магнетронной плазмы или плазмы дугового разряда.

Температурные эффекты при больших плотностях тока ионов, воздействующих на поверхность.

Перераспыление уже созданных слоев.

2.2 Методы вакуумного ионно-плазменного нанесения тонких пленок

Для формирования тонких пленок существует разнообразные методы, в зависимости от способов формирования потоков осаждаемых частиц, самые употребительные методы плазменного нанесения покрытий делятся на две группы: метод ассистированного плазмой химического газофазного осаждения (PACVD) и метод физического газофазного осаждения (PVD) [17].

В первую группу включают технологии, при которых покрытие образуется через химические реакции, протекающие в плазмах, которые возбуждаются тлеющим, дуговым ВЧ или СВЧ разрядами. Во вторую группу включают технологии, при которых пленки на подложку осаждают из паровой фазы, которая получается при процессах испарения или распыления поверхности мишени наносимого материала. Например, термическое испарение, распыление ионным пучком, планарное диодное и триодное распыление, лазерная абляция, ионное осаждение, ионизированное кластерно-лучевое нанесение, магнетронное распыление, вакуумное дуговое распыление и т.д.

В данной работе мы подробно обсуждаем ионно-плазменные методы:

По энергии E осаждаемых на поверхность частиц в момент начала их взаимодействия с поверхностью, методы нанесения покрытий и модификации поверхности в вакууме можно подразделить на четыре группы:

1. Когда $E < 1$ эВ, термическое вакуумное испарение и конденсация происходят.
2. Когда $1 \text{ эВ} < E < 10^3 \text{ эВ}$, наличие процесс катодного распыления и осаждения.
3. Когда $10^3 \text{ эВ} < E < 10^4 \text{ эВ}$, ионно-плазменное осаждение происходит.
4. Когда $E > 50 \text{ кэВ}$, будет ионная имплантация.

Вообще говоря, у ионно-плазменных методов свои собственные характеристики. Для методов катодного распыления характерно относительно низкая скорость осаждения покрытия. С помощью методом ионно-плазменного осаждения, покрытиям полученным существенно плотность структуры, пониженная пористость и повышенная коррозионная стойкость. Метод ионной имплантации позволяет получать новые справы, которые трудно получать другими способом.

2.3 Метод магнетронного распыления

Магнетронное распыление – технология нанесения тонких пленок на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда – диодного разряда в скрещенных полях. Устройства для реализации нанесения покрытия является магнетронными распылительными системами (магнетронами). Это усовершенствованные диодные системы, отличающиеся бытием в прокаточной области друг другу перпендикулярных электрического и дугообразного магнитного полей [18].

Магнетронное напыление покрытий подразумевает, вообще говоря, два процесса: магнетронное распыление материала из которого создается покрытие, осаждение распыленного материала на поверхность, которую следует модифицировать. Если необходимо создавать пленки типа оксидных, нитридных или оксинитридных, то в распыленный материал добавляются еще и соответствующие газы.

2.3.1 Магнетронные установки

Магнетрон состоит из катода, анода и магнитной системы, предназначенной для локализации плазмы около поверхности мишени (катод) (рис. 2.1).

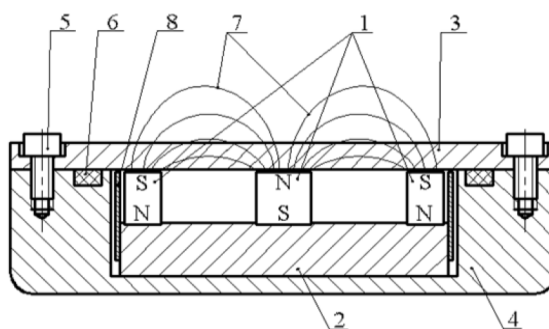


Рис. 2.1. Схема магнетрона [19].

1 – магниты, 2 – магнитопровод, 3 – мишень, 4 – корпус, 5 – винты крепления мишени, 6 – резиновое уплотнение, 7 – силовые линии магнитного поля, 8 – магнитный шунт.

Расположенная под катодом магнитная система содержит центральные и периферийные постоянные магниты 1, которые расположены на основании, сделанном из магнитомягкого материала 2. От источника питания на катод 3 постоянное напряжение. Магнитный шунт 8 служит для предотвращения выхода силовых линий магнитного поля на боковую поверхность магнетрона.

Вакуумная камера откачивается до давления не более 10^{-3} Па, в нее напускается рабочий газ (аргон) до давления порядка 0.1-0.5 Па. Между магнетроном (катод) и корпусом камеры (анод) прикладывается напряжение (250-900 В), называющее эмиссию электронов с поверхности мишени. Электроны ускоряются в электрическом и закручиваются в магнитном поле, в результате чего происходит их движение по циклоиде вдоль поверхности мишени. Ускоренные электроны ионизируют рабочий газ (аргон). Образовавшиеся таким образом ионы аргона ускоряются в электрическом поле, бомбардируют поверхность мишени, и распыляют ее. Распыленные атомы осаждаются на поверхность образца.

Чтобы обеспечить во производимость и стабильность процесса, обязательное условие является высокой точностью силы тока разряда. В процессе магнетронного распыления, используется в качестве рабочей среды смесь реакционных или инертных газов. Подбором парциальных давлений компонентов газов газовой смеси при постоянном общем давлении, которое необходимо поддерживает высокой точностью.

Посредством разряда постоянного тока распыляют разные металлы, сплавы (ванадий, хром, никель, титан, медь, нержавеющая сталь и др.) и полупроводниковые материалы, но не нарушают их стехиометрические состава. Если смешивают в плазмообразующий газ (Ar) некоторые реактивные газы (O_2 , N_2 и др.), то получают химические соединения при помощи магнетронного распыления.

2.3.2 Преимущества магнетронного метода напыления

Основное преимущество способа магнетронного распыления является высокой скоростью нанесения пленки и точностью воспроизведения стехиометрического состава распыляемого материала. Используя магнетронное распыление, в принципе получают покрытия практически из любых металлов, сплавов и полупроводников и одновременно сохранять изначальный стехиометрический состав до наибольшего предела. Используя разные состава рабочей атмосферы (долей диоксида углерода, азота, кислорода, сернистых газообразных соединений), получают соответствующие пленки карбидов, нитритов, оксидов, сульфитов разных материалов.

Благодаря высокой энергии осаждающейся частиц при магнетронном распылении и дополнительной активации поверхности действием плазмы, адгезия металлических слоев с подложкой у пленок, полученных магнетронным распылением, существенно выше, чем у таких же пленок, полученных термовакуумным напылением, в пределах сравнимых скоростей напыления.

2.4 Методы ионно-плазменной дуговой модификации поверхности

2.4.1 Процесс формирования вакуумно-дуговой плазмы

Зажигая вакуумную дугу, отличающуюся высоким током и низким напряжением, вакуумно-дуговой процесс испарения начинается. На поверхности катода, бывающего в качестве мишени, формируется одна или несколько точечных эмиссионных зон называемые катодными пятнами, в которых концентрируется вся мощность разряда. Размеры точечных катодных пятен различны от единиц микрон до десятков микрон.

Локальная температура катодного пятна всегда достигает чрезвычайно

высоких уровней (около 15000 °С), в результате чего происходят интенсивное испарение и ионизация в материале катода и образование высокоскоростных потоков плазмы (скорость которого до 10 км/с), которые распространяются в окружающем пространстве катодного пятна. Время существования отдельного катодного пятна в порядке микросекунда. После того, как падало на поверхности катода характерный микрокарте, начитаются самопогасание и самоинициация на катоде в новой области рядом с предыдущим кратером [20].

Видимо, дуга существенно представляет собой проводник с током, на неё воздействует наложение электромагнитного поля, что на практике используют в целях управления перемещением дуги по поверхности катода, а также для обеспечения его равномерной эрозии.

Чтобы обеспечить нормальную работу электродуговых источников паров металлов, необходимо внимательно выбрать с катодного пятна генерируемый материал. Когда попадает относительно небольшой ток дуги (~ 1А) на катоде образуется катодное пятно первого рода. Такой тип пятна характеризуется свойственно движением по катоду под силой Лоренца и генерация легких углеводородных фракций с массопереносом 10^{-10} кг/кулон. Скорость движения плазмы ~ 10^5 м/с. При увеличении тока дуги до нескольких десятков ампер образуется катодные пятна второго рода, которые характеризуются брыззовым выносом материала электродов с массопереносом приблизительно 10^{-7} кг/кулон. Скорость такой субстанции составляет 10 – 100 м/с. При дальнейшем нагреве катода до температуры плавления, возрастает термоионная эмиссия с катода. При таких условиях образуется катодное пятно третьего рода с диффузным испарением материала. В среди этих трех режимов работы, второй режим работы дуги наиболее характерен для электродуговых источников, а третий режим работы практически почти не применяют.

2.4.2 Метод вакуумно-дугового нанесения (формирования) покрытий

Для получения плазмы металлов используются электродуговые испарители, конструкция которых представлена ниже (рис. 2.2).

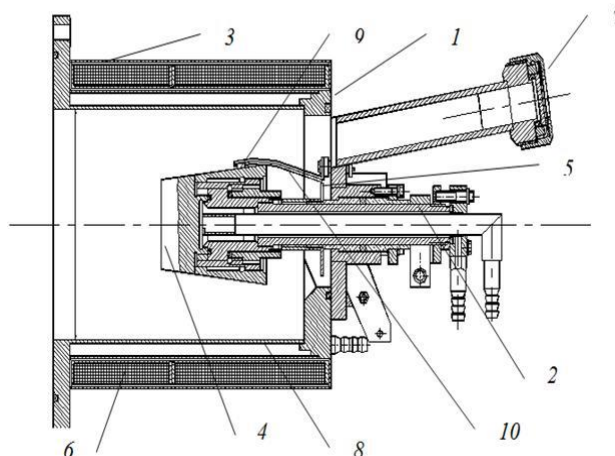


Рис. 2.2. Схема конструкции электродугового испарителя [19]:

- 1 – корпус, 2 – держатель образцов, 3 – защитный кожух катушек,
4 – катод, 5 – экран, 6 – катушки, 7 – смотровое окно, 8 – анод,
9 – токоограничивающий элемент, 10 – поджигающий электрод.

Вакуумно-дуговой испаритель состоит из корпуса 1 и держателя катода 2 электрически изолируются друг от друга. Держатель в этой схеме является водоохлаждаемой токоподводящей трубой, на которую попадает напряжение. На держателе фиксируется сменный катод 4, который сделан из материала, наносимого в качестве покрытия. Катушки 6 и наружная часть держателя закрыты защитным кожухом 3. На фланце находится смотровое окно 7. Разрядный промежуток генератора плазмы формируется благодаря массивному водоохлаждаемому катоду и аноду 8.

На поверхности токоограничивающего элемента 9 проводящий пленки испаряют, в результате чего инициируется дуговой разряд. Токоограничивающий элемент 9 поставлен между катодом и поджигающим электродом 10, на который подаётся импульсное напряжение амплитудой до 9кВ и длительностью 1–2 мкс. При погасании дуги, напряжение подаваемое

источником питания на испаритель резко возрастает. Это явление всегда считается сигналом для формирования и подачи импульса поджога. При помощи внешнего магнитного поля B на торцевой поверхности катода реализована стабилизация катодного пятна. При фиксировании давления 1 Па на деталь появляется постоянное напряжение 1 кВ , одновременно в камере зажигается тлеющий разряд. Положительно заряженные ионы из плазмы разряда устремляются на деталь, который находится под отрицательным потенциалом, и производят ее очистку. При обеспечении в камере давления азота в порядке 10^{-2} Па , между катодом и анодом от дугового трансформатора формируется напряжение приблизительно 65 В . Далее, между катодом и поджигающим электродом подаются импульсы напряжения 1 кВ для осуществления искрового пробоя. Плазма из окрестности поджигающего электрода попадает в пространство между катодом и анодом и стимулирует зажигание дугового разряда на катод.

После того, как зажигают дуги, на деталь подается отрицательное напряжение на уровне сотни вольт и начинается напыление покрытия. Выйдя со среза сопла генератора в свободномолекулярном режиме, и проходя вакуумную камеру, плазменная струя начинает взаимодействовать с поверхностями конденсации и образовать покрытие.

2.5 Метод ионно-иммерсионной имплантации

Ионно-иммерсионная имплантация (ИИИ) является способом введения атомов примесей в приповерхностные слои детали или пленки при помощи бомбардировки его поверхности пучком ионов с энергией в периоде от 10 кэВ до 20 МэВ .

Необходимы источники ионов с высокой импульсной и средней мощностью. Принцип действия источников основан на непрерывной генерации очищенной от МКФ плазмы непрерывным вакуумно-дуговым разрядом с последующим импульсно-периодическим или непрерывным

формированием ионного пучка в диодной системе прямого действия.

Импульсно-периодическая имплантация ионов с компенсацией распыления поверхности осаждением металлической плазмы реализуется при формировании в одном источнике на основе вакуумно-дугового разряда импульсно-периодических пучков ускоренных ионов и плазменных потоков. Этот метод получил название метода высококонцентрационной (ионно-иммерсионной) имплантации.

2.6 Мощный ионный ускоритель

Имплантация углерода на кремний осуществлялась мощным ионным ускорителем ТЕМП-4М, внешний вид ускорителя представлен на рисунке



Рис. 2.3. Внешний вид ускорителя.

2.3. Схема ускорителя ТЕМП-4М представлена на рисунках 2.4 и 2.5.

Принцип работы ускорителя ТЕМП-4М изображен в следующем. Генератор импульсного напряжения (ГИН) заряжает емкость, образованную средним электродом ДФЛ и корпусом ускорителя. Емкость внутреннего

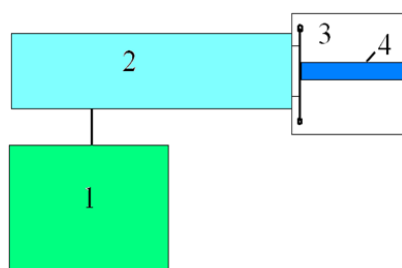


Рис. 2.4. Функциональная схема ускорителя: 1 – ГИН; 2 – ДФЛ, 3 – диодная камера, 4 – активная нагрузка [21].

электрода двойной формирующей линии (ДФЛ) относительно среднего электрода много больше емкости внутреннего электрода ДФЛ относительно корпуса, поэтому потенциал внутреннего электрода приблизительно равен потенциалу среднего электрода. При достижении на предварительном газовом разряднике пробивного напряжения он срабатывает и происходит зарядка емкости между внутренним и средним электродами ДФЛ. Зарядка происходит через предварительный газовый разрядник и диод. Одновременно на диоде формируется импульс отрицательного напряжения. В течение первого импульса на поверхности графитового потенциального электрода диода образуется взрывоэмиссионная плазма. Пробивное напряжение основного разрядника выше, чем у предварительного

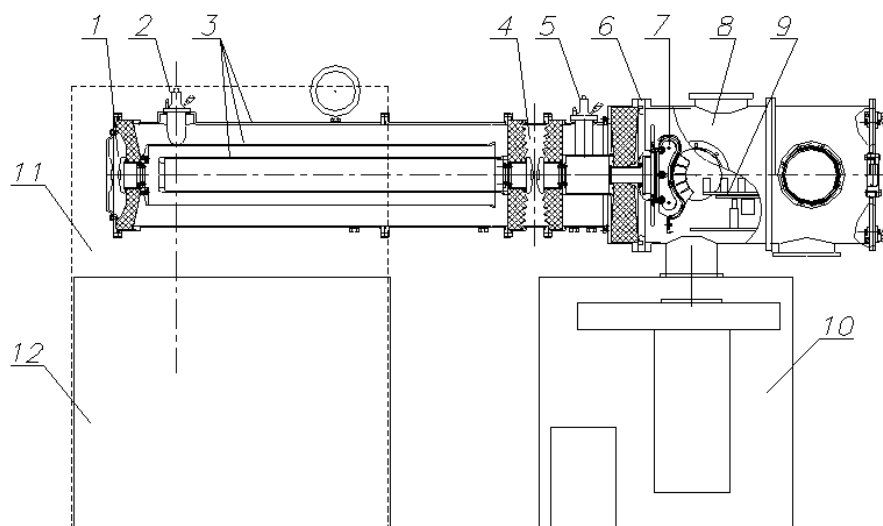


Рис. 2.5. Схема ускорителя «ТЕМП-4М»: 1, 4 – газовые разрядники; 2, 5 – делители напряжения; 3 – ДФЛ; 6 – пояс Роговского; 7 – диод; 8 – вакуумная камера; 9 – мишенный узел; 10 – вакуумная система; 11 – ГИН; 12 – система газоподачи и водоподготовки [21].

разрядника, и его пробой происходит через паузу, контролируемую давлением газа в основном разряднике. В течение паузы происходит дополнительная зарядка емкостей среднего электрода относительно корпуса и внутреннего электрода ДФЛ. После срабатывания основного газового разрядника генерируется второй импульс напряжения положительной полярности. В течение второго импульса из взрыв эмиссионной плазмы

формируется пучок-ионов, который ускоряется в диодном зазоре. При работе ускорителя без зарядной индуктивности потери передачи энергии из ДФЛ в нагрузку снизились до 30-31% [22].

2.7 Процесс насыщения водорода с помощью автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller LP

Насыщение водорода осуществляется методом Сиверца, суть которого лежит в том, что вход водорода при высокой температуре и высоком давлении. Для проведения насыщения водорода используем «автоматизированный комплекс Gas Reaction Controller Low Presser 100»,

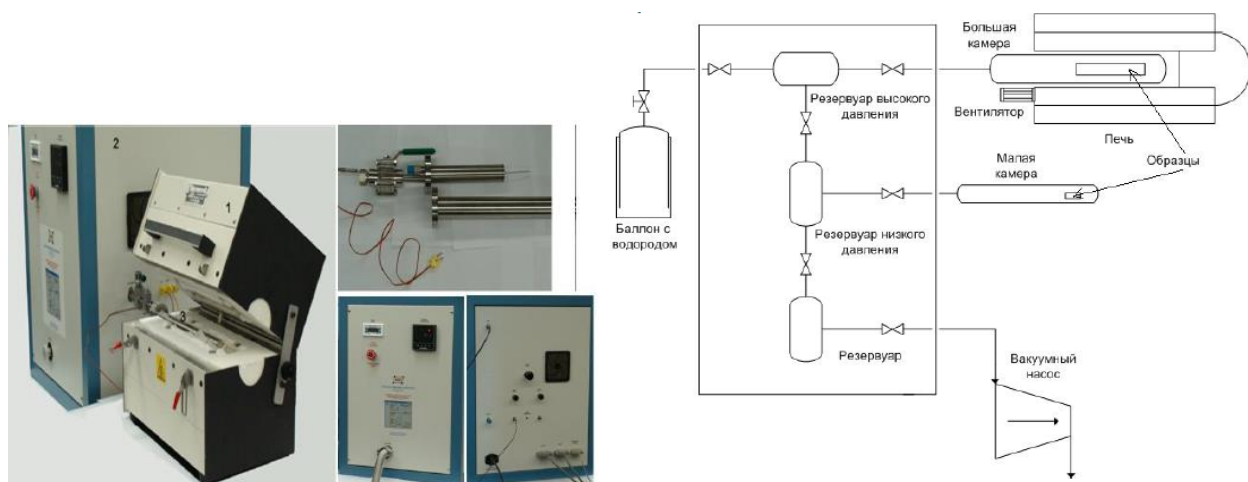


Рис. 2.6. Внешний вид и схема установки «Автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller».

внешний вид и схема установки представлены на рисунке 2.6 [23].

Автоматизированный комплекс «Gas Reaction Controller Low Pressure 100» состоит из 4 части: компьютер с программным обеспечением, контроллер управления, горизонтальная печь и камер. Существует 2 размера камеры: маленькая и большая, которые в эксперименте положены в печи, которую используют для нагревания образцов. Комплекс используется для изучения сорбции и десорбции газов в автоматическом режиме. Установка насыщает образцы водородом при высокой температуре и высоком давлении

из газовой среды, т.е., метод Сивертса. Данные о проникновении водорода в образец записываются компьютером в режиме реального времени.

Данная установка использованы для записи графической интерпретации процессов и автоматических процессов сорбции и десорбции, а также для измерения скорости сорбции и десорбции газов образцом. Насыщенные газы бывают водород, азот и аргон.

Установка напускает достаточное количество нужного газа в резервуар. Далее открывается клапан между резервуаром и реакционной камерой, и необходимое количество газа входит в реакционную камеру. После внедрения газа в твердое тело реакция завершается, и вычислено общее молярное количество газа в камере с образцом и в резервуаре. Количество поглощенного твердым телом газа определяется путем нахождения разности начального и конечного количество газа в реакционной камере.

Принцип работы автоматизированного комплекса GRC представлены на рисунке 2.7.

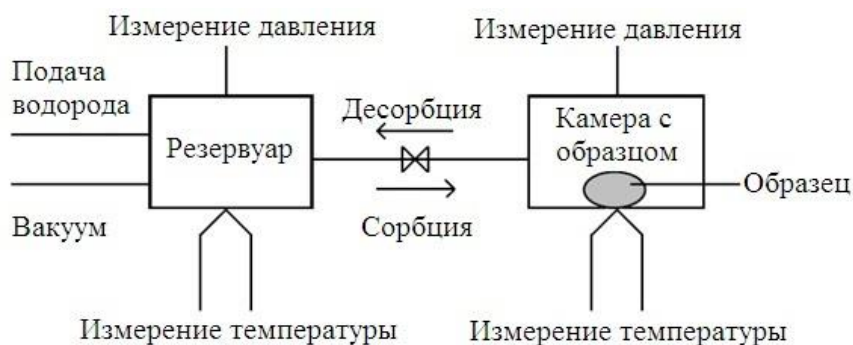


Рис. 2.7. Принцип работы GRC.

Молярный объем водорода поглощается твердый (N_S) находится по формуле $N_S = N_{S0} + N_0 - N_g$, где N_{S0} – количество водорода, которое уже существуют в твердом теле, может быть равно 0; N_0 – заданное количество водорода, которое находится в резервуаре; N_g – количество водорода после завершений реакции, затем вычисляется общее молярное количество водорода N_g .

2.8 Измерение концентрации с помощью «Анализатора водорода серии RHEN602»

Анализатор RHEN602 используется для измерения водорода в металлах и сплавах, в том числе титане, цирконии и неорганических материалах, используя принцип плавления в инертной среде.

Для этого, предварительно взвешенная проба, помещается в шлюз, и после дегазации графитового тигля сбрасывается в него. Проба плавится в восстановительной среде графита тигля в потоке инертного газа. Водород, присутствующий в пробе, выделяется в виде молекулярного водорода, измеряется в ячейке теплопроводности. Внешний вид установки представлен на рисунке 2.8.



Рис. 2.8. Внешний вид установки «Анализатора водорода серии RHEN602»

Аналитическая концентрация водорода лежит в диапазоне от 0,05 до 250 ppm. Процесс анализа максимально продолжается 10 мин. включая продувку, дегазацию и анализ. Часто используют в качестве газа носителя аргон или гелий. Детектором является ячейка теплопроводности. Печь для нагрева становится импульсной, т.е., управляем температуру по току, мощности. Из одного процесса измерения можно получить графическую интерпретацию процесса сгорания.

Глава 3. Экспериментальная часть

3.1. Подготовка образцов.

Для изготовления образцов использовались технологические пластины кремния диаметром 75 мм для приготовления больших и сверхбольших интегральных схем. Марка кремния КЭФ(100). Одна из поверхностей пластин обработана до зеркального, другая до матового блеска. На рис. 3.1 схематически изображены вырезанные из пластин образцы. На зеркальную

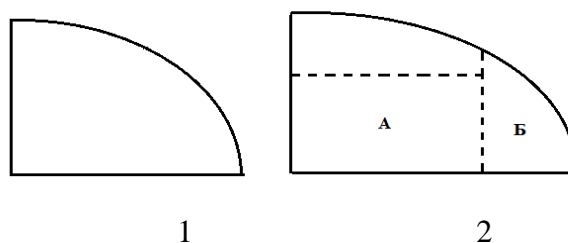


Рис. 3.1. Образцы кремния (вид зеркальных сторон): (а) образец 1 с имплантацией титаном, (б) образец 2 имплантированного углеродом.

поверхность образца 1 и 2 имплантированы титаном и углеродом соответственно.

3.1.1 Ионная имплантация

Вакуумная плазменно-иммерсионная ионная имплантация (ПИИИ) титана в зеркальные поверхности образцов №1 проведена на установке «Радуга-спектр» кафедры ОФ ФТИ ТПУ [19]. Имплантирован титан с использованием источников ионов титанов на основе импульсно-периодической вакуумной дуги. Имплантация производилась при предельном давлении 10^{-5} Па, и рабочее давление (после напуска аргона) – 10^{-1} Па. Ток дуги является 100 А, максимальное напряжение 1.5 кВ, имплантация продолжает 5 мин.

Образец №2 был обрезан по пунктирной линии, часть Б используется как исходный кремний, на часть А обработан мощным ионным пучком [24–26]. Перед обработкой образцы не очищались от загрязнений. Обработка осуществлялась на ускорителе «ТЕМП-4М» лаборатории №1 ИФВТ ТПУ. Ускоряющее напряжение составляло порядка 220-250 кВ, длительность импульса 100 нс на полувысоте ускоряющего напряжения, состав пучка <15% H⁺, >85% C⁺ (предполагается что вклад многозарядных ионов незначительный), давление в камере порядка 10⁻² Па, откачка камеры осуществлялась паромасляным диффузионным насосом, число импульсов – 200 импульсов, плотность энергии на мишени за импульс – 0,2 Дж/см² (определена тепловизионной диагностикой), расчетная имплантированная доза ≈ 10¹⁵ см⁻².

3.1.2 Нанесение покрытия AlN

На все образцы (образец 1, часть А образца 2, часть Б образца 2) были нанесены покрытия нитрид алюминий AlN методом магнетронного распыления в лаборатории №23 кафедры ЭФ ФТИ ТПУ. Параметры напыления следующие: предельное давление в камере магнетрона 3×10⁻³ Па, рабочее давление 1,4×10⁻¹ Па, поток аргона для поддержания магнетронного разряда – 15,2 ст. см³/мин, поток азота – 13,5 ст. см³/мин. Напряжение напыления в максимуме – 630 В, ток – 2,8 А, частота импульсов – 100 кГц, коэффициент заполнения – 80%. Напыление продолжалось 30 минут. Перед напылением чистка ионным источником (напряжение: 2500 Вольт, 30 мА).

3.1.3 Насыщение водородом

После нанесения покрытия части этих 3 типов образцов были насыщены водорода методом Сиверста на установке автоматизированного комплекса «Gas Reaction Controller Low Press 100» кафедры ОФ ФТИ ТПУ. Параметры

насыщения водорода: температура – 350 °С, давление при насыщении в камере – 2 атм., время продолжения насыщения – 30 мин.

3.2. Проведение измерений.

На первом этапе эксперимента снятие зеркальных поверхностей образца с имплантацией титана и углерода регентскими излучением и спектрами Рамановского смещения.

На втором этапе эксперимента измерение поверхностной проводимости образцов проводилось методом накладными электродами (изготовлены из меди), образцы предварительно не очищались. Было произведено снятие вольт-амперной характеристики (ВАХ) путем приложения напряжения и регистрации соответствующего тока для всех образцов до и после имплантации, а также и после нанесения покрытия [27,28].

На третьем этапе эксперимента, провели рассмотрение изображения поверхности трех образцов под обычным оптическим микроскопом до и после насыщения водорода.

На четвертом этапе эксперимента, провели измерение концентрации водорода в этих образцах на установке газоанализатора водорода RHEN-602 «LECO» кафедры ОФ ФТИ ТПУ.

3.3. Результаты и обсуждение

3.3.1 Рассмотрение состава поверхности после имплантации

При просмотре микро капель на образце №1 (с имплантацией титана) микроскопом, заметили что, микрокапли появились только в верхней области образца. На рис. 3.2 указано место, в котором появились микро капли.

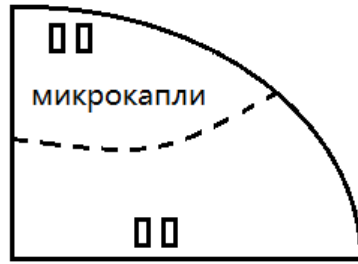


Рис. 3.2. Место микро капли и место проведения измерения ВАХ на образце №1, рис.3.1.

Результаты по регентскому излучению и спектрам Рамановского смещения на образец №1 представлены на рис. 3.3, который показаны (а) микро капли наблюдаемые под микроскопом и (б) спектры Рамановского смещения в разных местах.

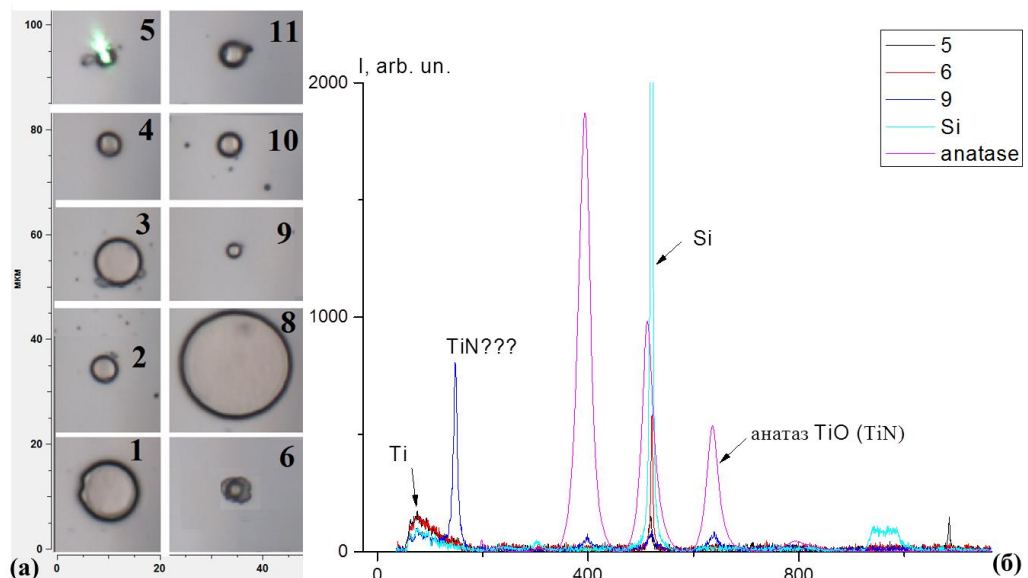


Рис. 3.3. (а) Микро капли на кремнии после имплантация титаном. (б) Спектры Рамановского смещения с разных микро каплями.

Из спектра видно, что кроме чистого титана и кремния на образце появились также анатазом TiO и нитридом титана TiN . Распределение имплантированный титан не является равномерным.

Результаты по регентскому излучению и спектрам Рамановского смещения на части А образца №2 (с имплантацией углерода) представлены

на рис. 3.4. На данном образце не наблюдали микрокапели как на образце с имплантацией титана.

По работе [29–31] знаем, что на часть А образца 2 (с имплантацией углерода) появится карбид кремния (SiC), характеристические пики которого близки 1600см^{-1} . По работе [32] можно предполагать, что ещё существуют 3С-SiC, потому что в интервале $1300\sim 1700\text{ см}^{-1}$ есть широкий прерывный пик,

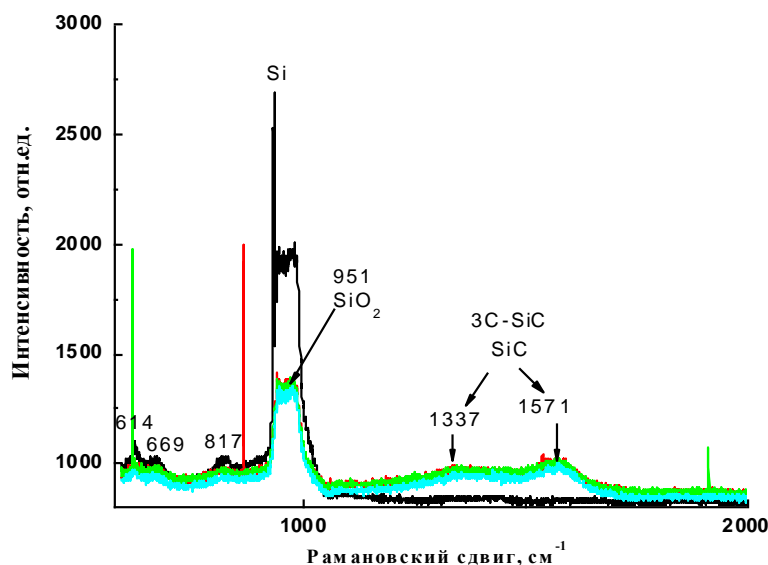


Рис. 3.4. Спектры Рамановского смещения в разных точках на части А образца

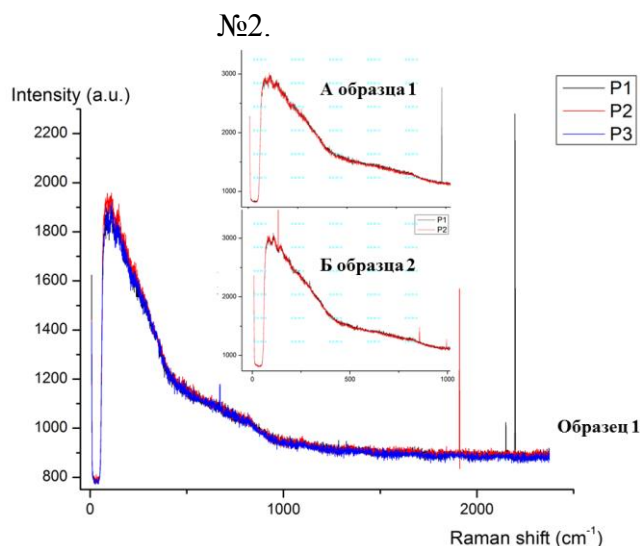


Рис. 3.5. Результаты по регентскому излучению и спектрам Рамановского смещения на всех образцах после нанесения покрытия нитрида алюминия (AlN), который может объяснить как объединение некоторых пиков. По работе [33]

знаем что, ещё есть оксид кремния SiO_2 , характеристические пики которого находятся близи 951 см^{-1} .

Результаты по регентскому излучению и спектрам Рамановского смещения на всех образцах после нанесения покрытия нитрида алюминия (AlN) представлены на рис. 3.5.

По работам [34–37], узнаем, что, на рамановском спектре тонкой пленки системы AlN/Si, кроме высокоинтенсивного пика кремния (Si) около 521 см^{-1} , должно увидеть несколько способных пиков покрытия нитрида алюминия (AlN) в области $600\sim 900 \text{ см}^{-1}$. Но, реально не получится, может быть нанесен не нитрида алюминия, а какие-нибудь другие покрытия.

3.3.2 Вольт-амперная характеристика образцов до и после имплантации

Измерение ВАХ на образце №1 проведено на и имплантированной области (верх) и на не имплантированной области (низ), место положения накладных электродов показано на рис. 3.2. Результаты измерения представлены в таблице 3.1, и на рисунке 3.6.

Таб. 3.1. Результаты измерения ВАХ образца №1.

Напряжение, В	Сила тока, А		
	Облученный (Верх)	Облученный (Низ)	Исходный
0,04	$7 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-10}$	--
0,1	$7 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-10}$	--
0,2	$7 \cdot 10^{-10}$	--	$5 \cdot 10^{-10}$
0,4	--	$3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-9}$
0,8	$5 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$
1	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$
2	$1 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
3	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$
4	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$
5	$2 \cdot 10^{-6}$	$7,8 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
6	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-7}$
7	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$
8	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-7}$
9	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$

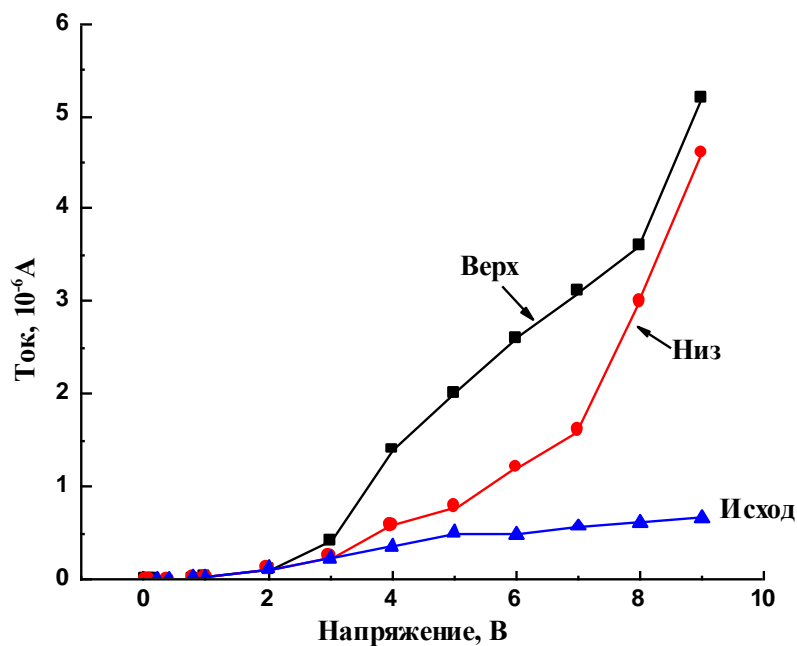


Рис. 3.6. Кривая ВАХ образца №1 в разных местах до и после имплантации титана.

Из рис. 3.6 видно, что имплантация титана на пластине кремния изменила поверхностную проводимость пластины. На верхней части образца оказалось выше поверхностной проводимостей, чем проводимость в нижней части и проводимость исходного кремния. По сравнению с результатом [24], зависимость тока от напряжения близко к линейному.

Результаты измерения ВАХ образца №2 до (часть Б) и после (часть А) обработки МИП представлены в таблице 3.2 и на рисунке 3.7.

Рис. 3.2. Результаты ВАХ образца №2.

Напряж ение, В	Сила тока, А	
	Исходны й	Облученный
0,01		$3 \cdot 10^{-9}$
0,05		$8 \cdot 10^{-9}$
0,1		$1,6 \cdot 10^{-8}$
0,2		$3 \cdot 10^{-8}$
0,4		$9,7 \cdot 10^{-8}$
0,6		$6,5 \cdot 10^{-8}$
0,8		$1,3 \cdot 10^{-7}$
1	$9 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$
2	$1 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-7}$
4	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$
6	$1,65 \cdot 10^{-9}$	$9,5 \cdot 10^{-7}$
8	$1,75 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$

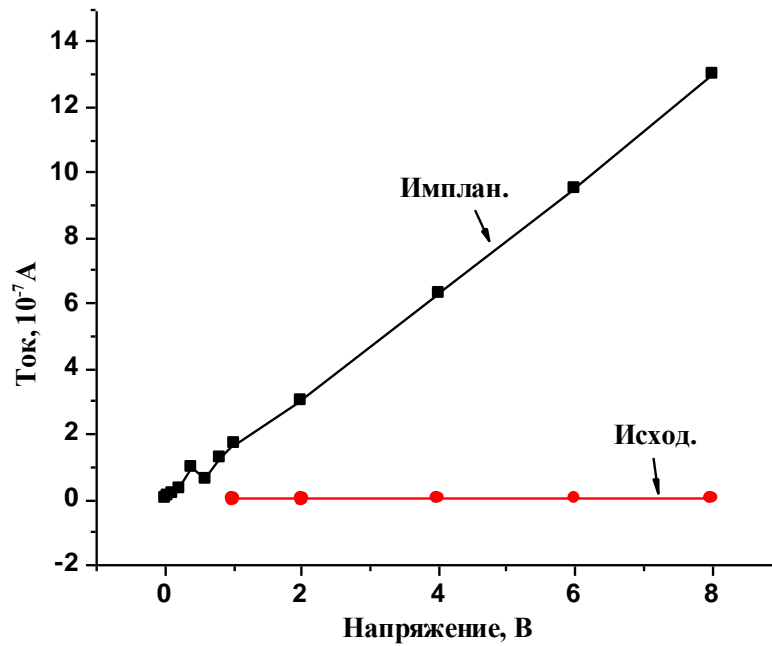


Рис. 3.7. ВАХ образцов №2 до (исход.) и после (имплан.) обработки МИП.

Из графика, видно что, имплантация изменила электрофизическое свойство поверхности, образец после имплантации имеет выше электропроводимости, чем до имплантации.

Измерение ВАХ на всех трех образцов ещё раз провело после нанесения покрытия нитрида алюминия (AlN). Результаты измерения представлены в таблице 3.3, и на рисунках 3.8.

Таб. 3.3. Результаты ВАХ образцов с покрытиями.

Напряжение, В	Сила тока, А		
	Образец 1, Si+Ti+AlN	А образца 2, Si+C+AlN	Б образца 2, Si+AlN
0.01	1.57E-8	1.46E-8	1.35E-8
0.02	2.47E-8	2.36E-8	2.27E-8
0.03	3.36E-8	3.26E-8	3.17E-8
0.04	4.26E-8	4.16E-8	4.07E-8
0.05	5.16E-8	5.06E-8	4.98E-8
0.06	6.05E-8	5.95E-8	5.87E-8
0.07	6.94E-8	6.85E-8	6.77E-8
0.08	7.86E-8	7.77E-8	7.68E-8
0.09	8.75E-8	8.66E-8	8.58E-8

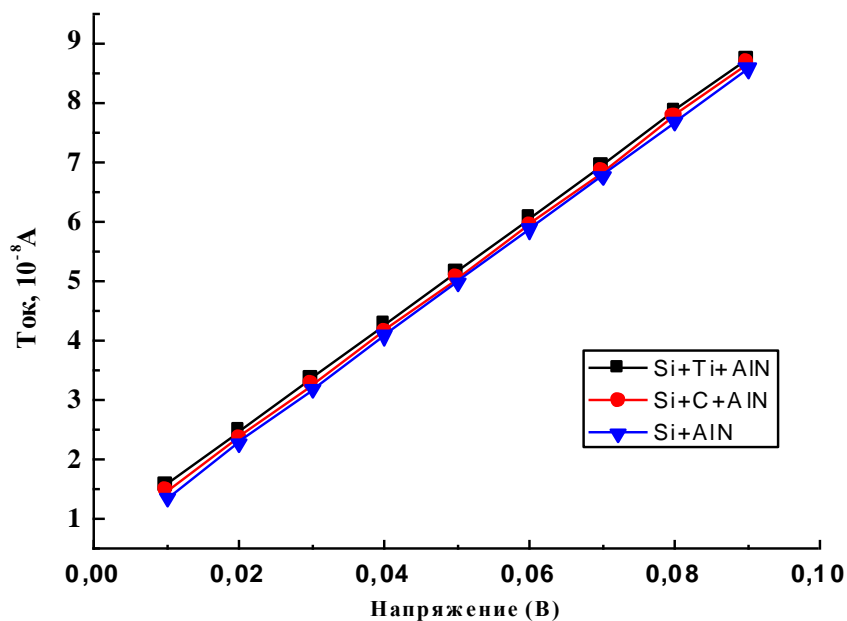


Рис. 3.8. ВАХ всех образцов после нанесения покрытия нитрида алюминий (AlN).

Из графика, видно что, вольт-амперная характеристика трех образцов после нанесения покрытия отличается незначительно. Образец с титана имеет выше электропроводности образца с углеродом и образца без подслоя.

3.3.3 изображение поверхности под микроскопом

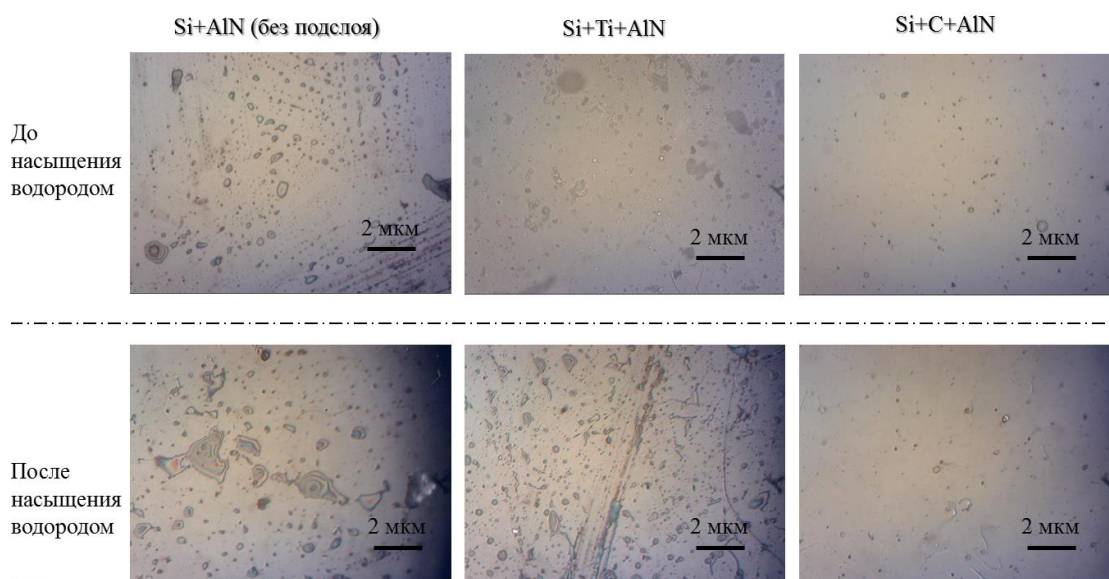


Рис. 3.9. Изображение зеркальной (имплантированной) стороны поверхности под оптической микроскопией до и после насыщения водородом.

На рисунке 3.9 показывается изображения зеркальной (имплантированной) стороны поверхности образцов под оптическим микроскопом до и после насыщения водородом.

Из графиков видно, что поверхность образца в случае отсутствия подслоя и с подслоем титана сильно разрушается, а поверхность образца с углерода остается также. Т.е. насыщение структуры AlN/Si водородом методом Сивертса приводит к сильному изменению структуры пленки (вплоть до её разрушения) в случае отсутствия подслоя и с подслоем титана.

3.3.4 Исследование концентрации водорода в образцах после наводороживания

Результаты измерения концентрация водорода на установке газоанализатора водорода RHEN-602 «LECO» показаны на таблице 3.4. На рисунке 3.10 показаны спектры термогазовыделения на установке LECO водорода при измерении его концентрации в образцах структур на кремнии.

Рис. 3.4. Концентрация водорода после насыщения.

Образец	Si+AlN	Si+Ti+AlN	Si+C+AlN
Концентрация (ppm)	27,4	24,7	20,9

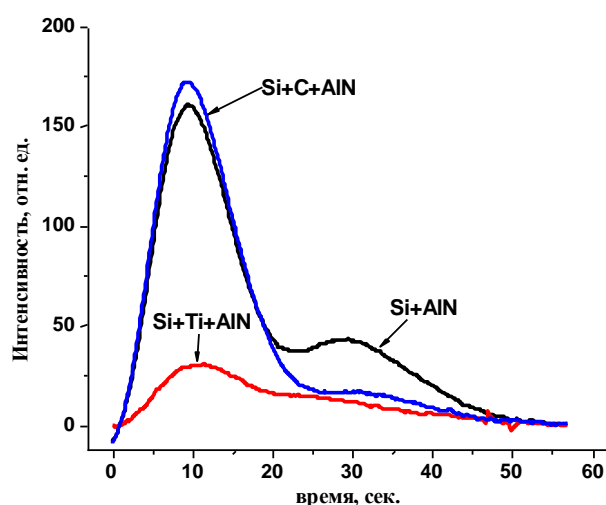


Рис. 3.10. Спектры термогазовыделения H_2 в установке LECO при измерении его концентрации в образцах структур на кремнии.

Из таблицы видно, что в образец без подслоя входит водорода наибольшего количества, а в образец с подслоем углерода насытили наименьшее количество водорода в процессе наводороживания.

Из рисунка видно, что спектры из образца без подслоя, и с подслоем углерода имеют 2 пика. По-видимому, первый пик появляется в результате выхода водорода (при плавлении образца) из покрытия нитрида алюминия и подслоя, а второй пик в результате плавления подложки кремния. Рисунок 3.11 показывает спектр термогазовыделения водорода на установке ТСГВ [38,39].

По результатам «термо-стимулированного газовойделения», знаем что, газавыделение H_2 началось при температуре $400\text{ }^\circ\text{C}$, которая соответствует «0 сек.», т.е. начало выхода водорода. По справочке знаем, что температура плавления Si – $1400\text{ }^\circ\text{C}$, которая соответствует на рисунке «50 сек.», когда кривая больше не меняется. Отсюда, модно вычислить скорость нагревания, примерно равно $20\text{ }^\circ\text{C}$ на каждую секунду.

Тогда, модно изменить время на температуру и перестроить спектр

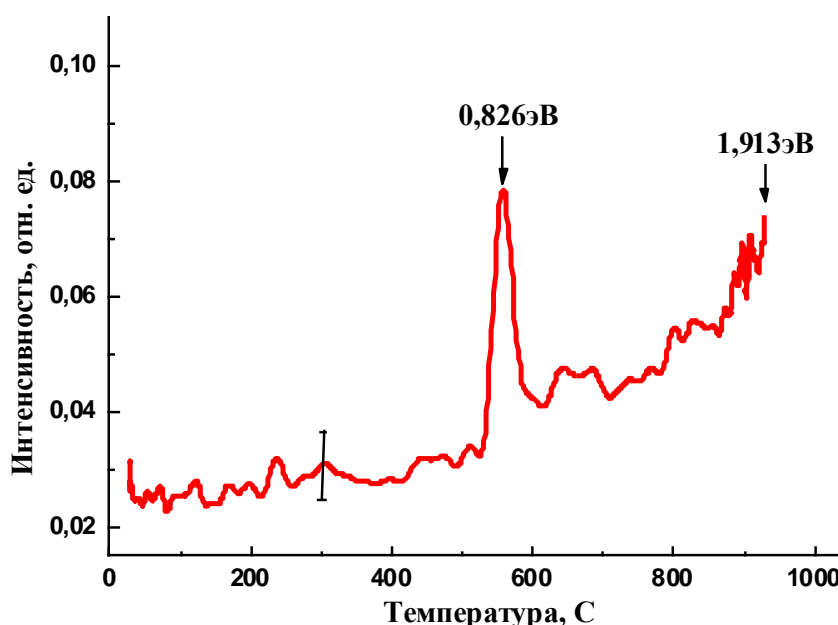


Рис. 3.11. Спектр термогазовыделения H_2 из образца AlN/Si (установка ТСГВ).

термогазовыделения H_2 , как показан на рисунке 3.12 (б). На рисунке 3.12 (а)

показана зависимость энергии активации десорбции (энергии связи атомов H_2) от положения пика ТСГВ. Зная скорость нагревания и температуры пика, по прямой можно найти энергию связи H_2 в покрытии и подложке. Температуры пиков на установке LECO – 592 °С и 985 °С (319 К и 712 К), по зависимости рис. 3.12 (а) при скорости нагрева 20 К/с, можно найти соответствующие энергии активации – 0,809 эВ и 1,951 эВ. Соответственно, используя рис. 3.11 и 3.12 (а) при скорости нагрева 1 К/с, можно найти

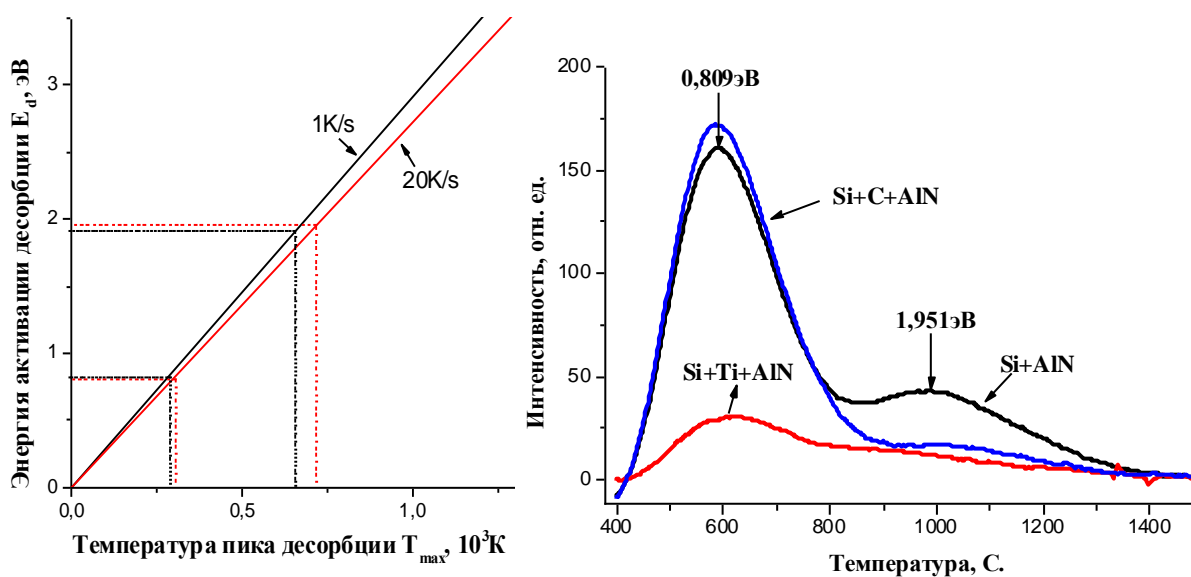


Рис. 3.12. Зависимость энергии активации десорбции (энергии связи атомов Н) от положения пика ТСГВ (а) [40]. Спектры термогазовыделения H_2 от температуры (LECO) (б).

соответствующие энергии активации для случая получения спектра ТСГВ на установке ТСГВ КОФ ТПУ – 0,826 эВ и 1,913 эВ. Таким образом, приведённые сравнения величин энергии активации десорбции, свидетельствуют, что данные LECO. Сравнение энергии активации, вычисленных по данным на установке LECO и ТСГВ представлено в таблице 3.5.

Таб. 3.5. Сравнение энергии активации.

	LECO	ТСГВ
№ пика	Энергия десорбции, эВ	
1	0,809	0,826

$T_{\text{пика1}}$	312 К	712К
2	1,951	1,913
$T_{\text{пика2}}$	285 К	657 К

3.4 Выводы

Из вышеизображенных результатов, можно прийти к следующим выводам:

1. Создание подслоя титана (методом ПИИИ при 1.5 кэВ) и углерода (имплантацией при 250 КэВ), приводит к формированию на поверхности кремния соединений Ti и Si с O, N и C в незначительных количествах.
2. Электрофизические свойства поверхности структуры AlN/Si незначительно изменяются при создании подслоя и не зависят от типа подслоя (Ti, C).
3. Насыщение структур AlN/Si, AlN/C/Si, AlN/Ti/Si водородом методом Сивертса $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=2\text{ атм.}$, $t=30\text{ мин}$ приводит к сильному изменению структуры пленки (вплоть до её разрушения) в случае отсутствия подслоя и с подслоем титана. В случае подслоя углерода структура плёнки не изменяется при данном насыщении.
4. Результаты измерения зависимостей выхода водорода от времени нагрева, полученные на установке LECO, могут быть использованы для определения энергии активации десорбции.

Создание подслоя углерода при производстве датчиков водорода на основе пленки AlN приведёт к значительному увеличению времени эксплуатации этих датчиков без ухудшения их характеристик.

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсоснабжение

Чтобы нормально провести данное научное исследование и закончить во времени, при выборе тему, надо оценить актуальность данной темы, т.е. перспектив и потенциал вашего исследования; необходимо за ранее планировать прохождения целой работы. Для финансового обеспечения нужно провести расчет бюджета.

В данной главе, будем оценить коммерческих перспективности и потенциала для данного научного исследования, планировать целых работ, а также провести расчет бюджета, который необходим для выполнения данной работы.

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурс эффективности и ресурсосбережения





4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования




Чтобы анализировать потребитель результатов исследования, один из несколько необходимых этапов является рассмотрению целевого рынка и проведению его сегментирования.

Целевой рынок является сегментами рынка, на котором в будущем будут продать разработку. В свою очередь, сегмент рынка является особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

В нашей работе, можем сегментировать рынок услуг по исследованию новых материалов для детектирования водорода, по следующим критериям: размер компании-заказчика, тип кампании.

Таб. 4.1. Карта сегментирования по типу компании

		Тип компании		
		нефтепромышленность	металлургия	авиастроение
Размер компании	Крупные			
	Средние			
	Мелкие			

 – Фирма А;
 – Фирма Б;
 – фирмы В.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

1. технические характеристики разработки;
2. конкурентоспособность разработки;
3. уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
4. бюджет разработки;
5. финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Таблица 4.2 показывает оценочную карту для сравнения конкурентных технических решений. Для этого необходимо отобрать не менее трех-четырех конкурентных товаров и разработок.

Анализ конкурентных технических решений можно рассчитать следующим образом:

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

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; V_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

В данной работе, наилучший вариант для пробора детектирования водорода является система тонких пленок с подслоем углерода, т.е., структура AlN/C/Si, а сейчас широко используются структуры с подслоем титана, т.е. AlN/Ti/Si, или Al/AlN/Si. Здесь K1 – структура AlN/Ti/Si, K2 – структура Al/AlN/Si.

Таб. 4.2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	B_{K1}	B_{K2}	K_{ϕ}	K_{K1}	K_{K2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,02	3	4	4	0,06	0,06	0,08
2. Удобство в эксплуатации	0,03	5	4	3	0,15	0,12	0,09
3. Энерго-экономичность	0,04	5	3	2	0,20	0,12	0,08
4. Надежность	0,09	5	4	5	0,45	0,36	0,45
5. Уровень шума	0,06	4	3	4	0,24	0,18	0,24
6. Безопасность	0,10	5	2	4	0,50	0,20	0,40
7. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,06	4	5	3	0,24	0,30	0,18
8. Простота эксплуатации	0,05	5	4	2	0,25	0,20	0,10
9. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,10	3	3	4	0,30	0,30	0,40
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,06	4	5	3	0,24	0,30	0,18
2. Уровень проникновения на рынок	0,06	5	2	4	0,30	0,12	0,24
3. Цена	0,06	4	3	5	0,24	0,18	0,30
4. Предполагаемый срок	0,06	4	3	3	0,24	0,18	0,18

эксплуатации							
5. Финансирование научной разработки	0,08	3	5	4	0,24	0,40	0,32
6. Срок выхода на рынок	0,05	5	2	3	0,25	0,10	0,15
7. Наличие сертификации разработки	0,08	4	5	2	0,32	0,40	0,16
Итого	1	68	52	55	4,16	3,46	3,47

Из таблицы видно, что структура, исследованная в данной работе, лучше других вариантов структуры. По сравнению с другими структурами, она является самым конкурентно способным вариантом.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется по следующей очереди:

1. определение структуры работ в рамках научного исследования;
2. определение участников каждой работы;
3. установление продолжительности работ;
4. построение графика проведения научных исследований.

Чтобы выполнить научную работу формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные руководители, инженеры и студенты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В таблице 4.3 предвидены перечень этапов и работ в рамках проведения данного научного исследования и распределение исполнителей по видам работ.

Таб. 4.3. Перечень этапов, работ и распределение пользователей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель

Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Подготовка образцов к эксперименту	Студент
	5	Обработка образцов: имплантации и нанесения покрытия	Инженер
	6	Проведение исследования Рамановской спектроскопией	Инженер
	7	Проведение измерения электрофизические свойства	Инженер
	8	Проведение экспериментов насыщения водородом	Инженер
	9	Проведение анализа концентрации водорода	Инженер
	10	Обработка результатов	Студент
	11	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Студент
	12	Оценка эффективности полученных результатов	Студент
Обобщение и оценка результатов	13	Определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель
	14	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Студент
Оформление отчета	15	Написание отчета	Студент

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения,

ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.2)$$

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

Тогда, можно учитывать продолжительность каждой работы в T_p в рабочих днях по следующей формуле:

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4.3)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн. $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Чтобы выполнить каждый этап целой работы удобным и наглядным, часто нужно построить ленточного графика в форме диаграммы Ганта. Это горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, которые особенны датами начала и окончания выполнения данных работ.

Чтобы удобно построить график, надо перевести единицу измерения длительности каждого пункта работы из рабочих дней в календарные дни, используя следующую формулу:

$$T_{кi} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях; T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях; $k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (4.5)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году; $T_{вых}$ – количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – количество праздничных дней в году. Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа. Например, $k_{кал} = \frac{365}{365 - 66} = 1,22$.

Таблица 4.4 показывает временные показатели проведения научного исследования.

Таб. 4.4. Временные показатели проведения научного исследования.

Название работы	Исп.	Трудоемкость			Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
		t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ож}$, чел-дни		
Составление и утверждение технического задания	Р	5	10	7	7	9
Подбор и изучение материалов по теме	С	10	14	12	12	15
Календарное планирование работ по теме	Р	3	6	4	4	5
Подготовка образцов к эксперименту	С	1	3	2	2	3
Обработка образцов: имплантация	И	10	20	14	14	15
Проведение исследования состава поверхности	И	5	15	9	9	10

Рамановской спектрометрией						
Обработка образцов: нанесение покрытия	И	10	20	14	14	16
Проведение измерения электрофизические свойства	И	5	15	9	9	10
Проведение экспериментов по насыщению водородом	И	5	7	6	6	7
Проведение анализа концентрации водорода	И	7	14	10	10	11
Обработка результатов	С	50	70	58	58	60
Сопоставление результатов эксперимента с теоретическими исследованиями	С	30	40	58	58	71
Оценка эффективности полученных результатов	Р+ С	50	70	58	29 (Р: 15; С: 25)	35
Определение целесообразности проведения ОКР	С	60	80	68	68	75
Составление пояснительной записки	Р+ С	70	90	78	39 (Р: 20; С: 39)	48


Диаграмма Ганта строится в виде таблицы 4.5 с разбивкой по месяцам за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике выделены различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таб. 4.5. Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Название работ	Исполнители	Т _{кал.} кал.дн.	Продолжительность выполнения работ																	
			фев.		мар.		апр.		май.		июн.									
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2								
Составление и утверждение технического задания	Р	9	▨																	
Подбор и изучение материалов по теме	С	15	■																	
Календарное планирование работ по теме	Р	5		▨																
Подготовка образцов к эксперименту	С	3		■																
Обработка образцов: имплантация	И	15		▨																
Проведение исследования состава поверхности Рамановской спектроскопией	И	10				▨														
Обработка образцов: нанесение покрытия	И	16				▨														
Проведение измерения электрофизические свойства	И	10							▨											
Проведение экспериментов по насыщению водородом	И	7										▨								
Проведение анализа концентрации водорода	И	11											▨							
Обработка результатов	С	60																		
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	С	71																		
Оценка эффективности полученных результатов	Р+ С	35																		
Определение целесообразности проведения ОКР	С	75																		
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Р+ С	48																		

▨ – научный руководитель;

 – инженер;

 – студент.

4.3 Бюджет научного исследования

4.3.1 Расчет материальных затрат НИИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (4.6)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования; $N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.); C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.); k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таб. 4.6. Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Цена, руб.	Затраты на материалы, руб.
Основные материалы					
Образцы кремния КЭФ(100)	Шт.	3	15,3	45,9	52,8
Вспомогательные материалы					
Коробка для сохранения образцов	Шт.	1	50	50	57,5
Спирт	Литр	0,2	140	28	32,2
Дополнительные материалы					
Халат	Шт.	1	630	630	724,5
Итого:	867				

4.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, и дополнительную заработную плату. Заработная плата рассчитывается по формуле 4.7:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.7)$$

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

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по формуле 4.8:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.8)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника; T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 4.9:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (4.9)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при шестидневной неделе $M=10,4$); F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала ($F_d=251$).

$$Z_m = Z_{ТС} \cdot k_p, \quad (4.10)$$

где $Z_{ТС}$ – заработная плата согласно Положению по оплате труда; k_p – районный коэффициент ($k_p = 1,3$ для Томска). Пример расчета основной заработной платы:

Исправить дни для студента, инженера и для руководителя

Для студента:

$$Z_{1M} = 9874,45 \times 1,3 = 12836,79,$$

$$Z_{1ДН} = 12836,79 \times 10,4 \div 251 = 531,88,$$

$$Z_{1ОСН} = 531,88 \times 87 = 46273,56;$$

Для инженеров:

$$Z_{2М} = 14874,45 \times 1,3 = 19336,79,$$

$$Z_{2ДН} = 19336,79 \times 10,4 \div 251 = 801,21,$$

$$Z_{2ОСН} = 801,21 \times 30 = 24036,30;$$

Для научного руководителя:

$$Z_{3М} = 33162,87 \times 1,3 = 43111,73,$$

$$Z_{3ДН} = 43111,73 \times 10,4 \div 251 = 1786,30,$$

$$Z_{3ОСН} = 1786,30 \times 32 = 57161,69.$$

4.3.3 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.12)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды ($k_{внеб} = 0,27$). Например (для руководителя):

$$C_{зввне} = 0,27 \times (46984,96 + 0) = 15433,66$$

Расчеты заработной платы каждого исполнителя для выполнения работы приведены в таблице 4.7.

Таб. 4.7. Расчет заработной платы исполнителей.

Исполнители	T _{кл.} дни.	Z _{дн} , руб.	Z _{осн} , руб.	C _{внеб} , руб.
Руководитель	32	531,88	57161,69	15433,66
Инженер	30	801,21	24036,30	5768,71
Студент	98	1786,30	46273,56	12493,86
Итого: 127472руб.				

4.3.4 Накладные расходы

Расчеты затрат на оборудования и электроэнергию представлены на таблице 4.8. (Тариф 5,8 руб за 1 кВт.ч).

Таб. 4.8. Расчеты затрат на оборудования и электроэнергию.

№.	Наименование оборудования	Время использования оборудования, ч	Мощности оборудования, кВт.	Цена использования оборудования, руб./ч.	Сумма, руб.
1	Устройства «Радуга-спектр»	3,0	50	300	1770
2	Ускоритель «ТЕМП-4М»	6,0	80	600	6384
3	Устройства магнетронного распыления	2,5	35	400	1508
4	Рамановский спектроскоп	3,0	0,3	300	905
5	Gas Reaction Controller	1,5	1,8	200	316
6	Газоанализатор а RHEN602 фирмы LECO	3,0	0,5	200	609
Итого: 11492 руб.					

4.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Данные Расчет бюджета затрат в результате проведения научно-исследовательской работы представлен в таблице 4.9.

Таб. 4.9. Бюджет затрат

Наименование статьи	Сумма, руб
Материальные затраты	867
Специализированное оборудование	0

Затраты на научные и производственные командировки	0
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	127472
Отчисления во внебюджетные фонды	34417
Затраты на оборудования и электроэнергию	11492
Бюджет затрат	174248

По данной работе нет дополнительного заработной платы, не было затрат на научные и производственные командировки, также не закупалось специализированное оборудование. Таким образом, была произведена калькуляция затрат необходимых для выполнения НИОКР, которые составили 174248 рублей.

Глава 5. Социальная ответственность

Рассмотрев многие чрезвычайные ситуации, которые происходят на предприятиях, заводах, когда занимают своими научными исследованиями, нам необходимо обратить внимание на обеспечение безопасности рабочих мест, а также на предотвращение возможных опасных и вредных ситуаций.

В основе выпускной квалификационной работы по теме влияние подслоя углерода и титана на свойства структуры AlN/Si и её сорбцию водорода лежит использование вакуумное ионно-плазменное оборудование и ионной мощный ускоритель для модификации используемых образцов, а также использование магнетронное оборудование для нанесения покрытия. В соответствии с этим, данная глава предполагает рассмотрение правил безопасной работы при выполнении основных этапов обработки имплантаций ионов на образцы, нанесения покрытий, а также их последующих испытаний. Рассмотрены условия работы с установкой, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы.

5.1 Вредные факторы проектируемой производственной среды

При проведении научных работ на разных установках возможно существуют следующие вредные факторы:

1. Производственный шум.
2. Микроклимат.
3. Освещенность.

5.1.1 Производственный шум

Имплантация титана осуществлялась на установке «Радуга-Спектр», одними из основных частей которой являются форвакуумный и

турбомолекулярный насосы, создающие производственный шум. Воздействие шума в первую очередь влияет на органы слуха, нервную и сердечнососудистую системы. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума при сосредоточенной умственной работе составляет 75 дБ. По ГОСТ 12.4.026, уровень или эквивалентный уровень звука в зоне не должен превышать 80 дБ чтобы обеспечить нормальные работы в данный в данном месте. Рекомендуются следующие средства коллективной защиты: акустические экраны, выгородки, объемные поглотители звука, виброизолирующие опоры; средства индивидуальной защиты: специальные наушники, вкладыши в ушную раковину, противозвучные каски.

5.1.2 Микроклимат

При работе установки включены нагревание рабочей камеры и соответствующие охлаждающие системы, которые вызывают изменение микроклимата в соответственных рабочих местах. Существуют характеризующие микроклимат следующие параметры:

1. температура воздуха;
2. температура поверхности установки;
3. скорость движения воздуха;
4. относительная влажность воздуха в микроклимате;

В данном научном исследовании, выполняемые работы относятся к Iб категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат в диапазоне 121–150 ккал/ч, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Температура наружных поверхностей технологических установок, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не должен превышать 45 °С.

В следующей таблице показаны оптимальные величины показателей в рабочем месте.

Таб. 5.1. Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений.

Период года	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
холодный	20–23	40–60	0,15
теплый	21–24	40–60	0,15

Чтобы обеспечить оптимальные условия в рабочем месте, можно применять кондиционер, который позволяет поддерживать величины показателей микроклимата постоянными, оптимальными, и не зависимо от меняющихся условий.

В холодное время года в целях поддержания в рабочем месте оптимальной температуры воздуха и относительно влажности воздуха можно использовать отопление.

5.1.3 Расчет искусственной освещенности

Освещение оказывает влияние на работоспособность, безопасность труда, эффективность выполнения работы. Соответственно правильно спроектированное освещение является неотъемлемой частью данной главы. Чтобы рассчитать искусственного освещения, необходимо привести определение требуемой мощности электрической осветительной установки в целях создания заданной освещённости.

При работе с установкой «Радуга-спектр» не требуется освещения высокой точности, поэтому допускается применение системы общего

равномерного освещения. Для общего освещения применяются газоразрядные лампы: дневные (ЛД), холодно-белые (ЛХБ), тепло-белые (ЛТБ) и белые (ЛБ) лампы. Для освещения помещения используются светильники ламп холодно-белых типа ОД (мощность 15 Вт).

Высота лаборатории: $H = 3600$ мм. Расстояние светильников от перекрытия: $h_c = 290$ мм. Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_n = H - h_c = 3600 - 290 = 3390, \quad (5.1)$$

Высота рабочей поверхности над полом: $h_{rp} = 800$ мм.

Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_n - h_{rp} = 3390 - 800 = 2590, \quad (5.2)$$

Для двухламповых светильников ОД при одиночной установке или наименьшая допустимая высота подвеса над полом составляет 3,5 м. Рассчитанная величина $h = 2590$ мм не соответствует требованиям. Схема положения светильников представлена на следующем рисунке.

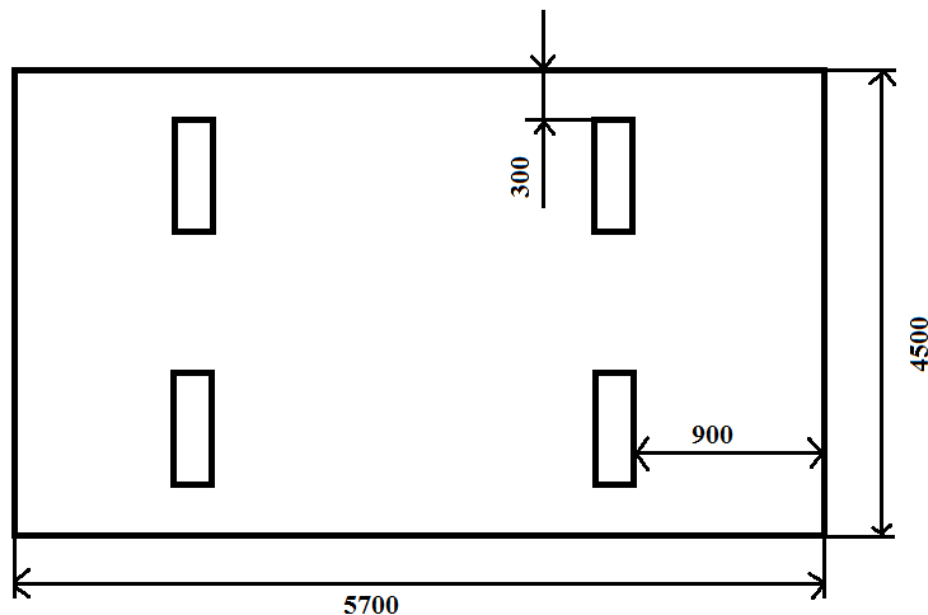


Рис. 5.1. Схема положения светильников в лаборатории.

Чтобы создать благоприятные зрительные условия на рабочем месте, необходимо использовать двухламповые светильники ШЛД или ШОД (наименьшая допустимая высота подвеса над полом: 2,5 м).

Расстояние между соседними светильниками: $L = 3,9$ м;

Расстояние от крайних светильников до стены: $l = 1,2$ м.

Расстояние от крайних светильников до стены является практически оптимальным, так как рекомендуемая величина равна $\frac{L}{3} = \frac{3,9}{3} = 1,3$.

Интегральный критерий оптимальности расположения светильников является величина $\lambda = L/h$. В самом выгодном случае, величина оптимальности расположения должна составлять 1,4 м.

Соответственно, оптимальное расстояние между светильниками L рассчитать следующим образом:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,6 = 3,64 \text{ м}, \quad (5.3)$$

Теперь можно рассчитать общее равномерное искусственное освещение горизонтальной рабочей поверхности выполняется, используя метод коэффициента светового потока, который показан следующей формулой:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 25 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 0,49} = 4209 \text{ Лм}, \quad (5.4)$$

где нормируемая минимальная освещенность (по СНиП 23-05-95): $E_n = 200$ лк (разряд зрительной работы VI: очень малой точности); площадь освещаемого освещения: $S = 25 \text{ м}^2$; коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, наличие в атмосфере дыма, пыли: $K = 1,5$ (помещение с малым выделением пыли); коэффициент неравномерности освещения: $Z = 1,1$ (для люминесцентных ламп); число ламп в помещении: $N = 4$; коэффициент использования светового потока: $\eta = 0,49$.

Расчет искусственного освещения показал, что световой поток от 4 ламп 4209 Лм.

5.2 Выявление опасных факторов проектируемой производственной среды

В процессе проведения исследования, возможно воздействуют следующие опасные производственные факторы:

1. Электрическое напряжение.
2. Пожар взрывоопасность.

5.2.1 Электро-безопасность

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 Гц (6–16мА). Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий.

Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты. Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

1. содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;
2. своевременно проводить техническое обслуживание;
3. соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;
4. проводить инструктаж для работников.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

1. изоляция токоведущих частей;
2. малое напряжение в электрических цепях;
3. защитное заземление, зануление, защитное отключение;
4. применение разделяющих трансформаторов;
5. защитные средства и предохранительные приспособления.

5.2.2 Пожар взрывобезопасность

Используемое помещение относится к категории Г согласно пожарной и взрывопожарной опасности, так в данном помещении расположены горючие легко воспламеняемые материалы, также баллоны с газами. Помещение, в котором находится установка, оснащено аварийными выходами, обеспечено средствами пожаротушения, сигнализацией оповещения пожара. План эвакуации представлен на рисунке 5.2.

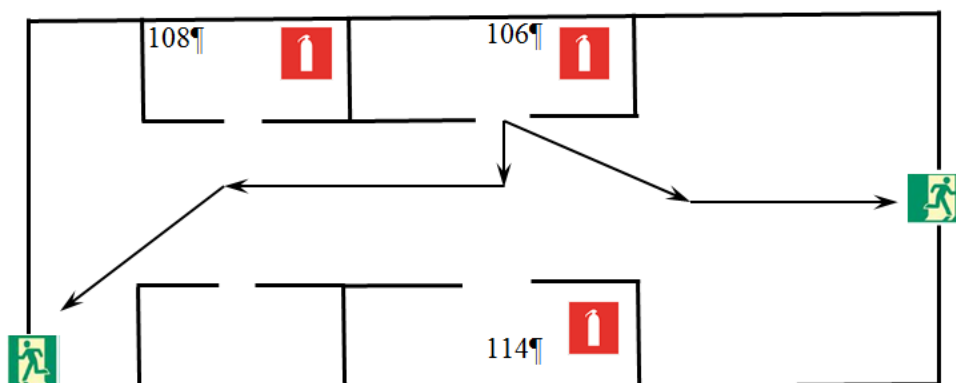


Рис. 5.2. План эвакуации рабочих помещений.

Работники допускаются к работе только после прохождения инструктажа о мерах пожарной безопасности, во всех помещениях вывешены таблички с указанием номера телефона вызова пожарной охраны и таблички с направлением пути эвакуации и план эвакуации.

В лаборатории расположены огнетушители порошковые ОП-4(з)-АВСЕ-02 (предназначен для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000 вольт).

Причинами возникновения пожара могут быть:

1. Курение в запрещённых местах;
2. Неправильное хранение возгорающихся веществ.
3. Перегрузка электрических сетей;
4. Нарушение правил эксплуатации электрического оборудования;
5. Нарушение правил пожарной безопасности;

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны. В целях безопасности, выполнены общие правила эксплуатации баллонов:

1. Баллоны установлены вертикально и надёжно закреплены в таком положении металлическим хомутом, а также защищены от падения на них сверху каких либо предметов.

2. Баллоны с газом, устанавливаемые в помещении находятся от радиаторов отопления и других отопительных приборов на расстоянии не менее 1 метра и от печей и других источников тепла с открытым огнем не менее 5 метров. При невозможности выдержать необходимое расстояние, необходимо применять защитные экраны, предохраняющие баллоны от местного разогрева, располагая баллон не ближе 0,1 м от экрана. Установленные баллоны также необходимо предохранять от действия солнечных лучей.

3. Выпуск газов из баллона производится через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет. Камера низкого давления редуктора имеет манометр и пружинный предохранительный клапан, отрегулированный на соответствующее давление в емкости; во всех случаях открывать и закрывать вентиль баллона необходимо медленно.

5.3. Охрана окружающей среды

В настоящее время одним из важных вопросов в любой сфере деятельности является вопрос экологичности. В обществе происходит изменение предпочтений потребителей в пользу экологически чистой продукции и товаров, которые сами не загрязняют окружающую среду, и производство которых является безвредным.

Экологичность отхода представляет собой способность отхода не оказывать отрицательного воздействия на окружающую среду за пределами допустимых значений.

В данной работе отходами являются металлические порошки, полученные вследствие чистки камеры и других компонентов установки.

Утилизация металлических отходов состоит из нескольких технологических операций, включающих в себя:

1. демонтаж конструкций и сбор металлических отходов;
2. транспортировку отходов на перерабатывающее предприятие;
3. проверка металлических отходов (в т.ч. дозиметрическая);
4. отделение отходов чёрных металлов от отходов цветных металлов;
5. отделение различных примесей неметаллического характера;
6. заключительный контроль отходов;
7. переработка.

5.4 Защита в чрезвычайных ситуациях

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

техногенные и природные. Техногенные чрезвычайные ситуации вызваны производственной деятельностью человека, в то время как природные ЧС возникают по причине природных явлений и процессов. Так, к техногенным чрезвычайным ситуациям относятся пожары и взрывы на производстве, аварии с выбросом химически опасных или радиоактивных веществ и т.д. Природные ЧС могут возникнуть ввиду наводнения, заморозка, урагана и т.д. Рассмотрим две наиболее типичных чрезвычайных ситуации, которые могут произойти на предприятии.

Один из нескольких случаев является остановкой производства в результате сильных морозов.

Меры по предупреждению ЧС:

Повышение устойчивости системы электроснабжения. В первую очередь целесообразно заменить воздушные линии электропередач на кабельные (подземные) сети, использовать резервные сети для запитки потребителей, предусмотреть автономные резервные источники электропитания объекта (передвижные электрогенераторы).

Использование запасных автономных источников теплоснабжения, заглубления теплотрасс.

Обеспечение устойчивости систем водоснабжения (устройство дублирования водопитания, кольцевание системы, заглубление водопроводов, обустройство резервных емкостей и водохранилищ, очистка воды от вредных веществ и т.п.).

Обеспечение устойчивости системы водоотведения. Повышение устойчивости системы канализации достигается созданием резервной сети труб, по которым может отводиться загрязненная вода при аварии основной сети. Насосы, используемые для перекачки загрязненной воды, комплектуются надежными источниками электропитания.

5.5 Правовые вопросы обеспечения безопасности

К работе на установке «Радуга-спектр» допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, прошедшие обучение безопасности труда и инструктаж на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний, норм и правил работы с электроустановками, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы на установке, имеющие не менее III группы по электробезопасности.

По данной теме рассматриваются следующие законодательные и нормативные документы:

ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы.

Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 28.12.2013).

СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение". Утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78.

СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Минздрав России, Москва. – 1996.

СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Минздрав России, Москва. – 1997.

Федеральный закон Российской Федерации от 21.12.1994 N 69-ФЗ (ред. от 12.03.2014) "О пожарной безопасности".

Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".

Список использованных источников

- [1] K. Vijayalakshmi, V.V. Pillay. Influence of deposition time on the microstructure and dielectric properties of AlN/Si thin films for enhanced hydrogen sensing application//Microelectronic Engineering/ 113 (2014) 29–34.
- [2] Г. А. Гумлинский, и С. ташлыков. Распределение углерода в кремнии при ионной имплантации// Микроэлектроника. Выпуск 6(77). УДК 621 3 010.774 002.
- [3] А.В. Боряков, Д.Е. Николичев, Д.И Тетельбаум, А.И. Белов, А.В. Ершов, А.Н. Михайлов. Химический и фазовый состав пленок оксида кремния с нанокластерами, полученными путем ионной имплантации углерода// Физика твердого тела, 2012, том 54, вып. 2.
- [4] Н.Б. Бейсенханов. Структурный анализ слоев кремния, имплантированных углеродом// Физика твердого тела. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2010, № 1, с. 46–56.
- [5] С.В. Булярский, А.С. Амброзевич, С.С. Моливер, Т.А. Джабраилов, Р.М. Баязитов, Р.И. Баталов. Исследование кремния, имплантированного ионами углерода// Письма в ЖТФ, 2001, том 27, вып. 6.
- [6] В. А. Терехов, Д. И. Тетельбаум, И. Е. Занин, К. Н. Панков, Д. Е. Спирин, А. Н. Михайлов, А. И. Белов, А. В. Ершов. Дифракционные исследования формирования нанокристаллов кремния в структурах SiO_x/Si с ионной имплантацией углерода// Материалы электронной техники. № 4. 2012. УДК 621.315.592 : 548.73.
- [7] В.И. Плебанович. А.Р. Челядинский. В.Б. Оджаев. Локализация имплантируемых примесей бора и углерода в кремнии// Вестник БГУ. Сер. 1. 2006. № 2. УДК 621.315.592.
- [8] В. С. Вавилов, А. Р. Челядинский. Ионная имплантация примесей в монокристаллы кремния: эффективность метода и радиационные нарушения. / Успехи физических наук, Март 1995г. Том 165, №3.

- [9] B. Abdallah, S. Al-Khawaja, A. Alkhawwam, I.M. Ismail. Deposition and current conduction of mixed hexagonal and cubic phases of AlN/p-Si films prepared by vacuum arc discharge: Effect of deposition temperature// *Thin Solid Films*/ 562 (2014) 152–158.
- [10] N. S. Zayats, V. G. Boiko, P. A. Gentsar, O. S. Litvin, V. P. Papusha, and N. V. Sopinskioe. Optical Studies of AlN/n-Si(100) Films Obtained by the Method of High-Frequency Magnetron Sputtering// *Semiconductors*, 2008, Vol. 42, No. 2, pp. 195–198.
- [11] J.X. Zhang, H. Cheng, Y.Z. Chen, A. Uddin, Shu Yuan, S.J. Geng, S. Zhang. Growth of AlN films on Si (100) and Si (111) substrates by reactive magnetron sputtering// *Surface & Coatings Technology*/ 198 (2005) 68–73.
- [12] R. Thapa, B. Saha, K.K. Chattopadhyay. Enhanced field emission from Si doped nanocrystalline AlN thin films// *Applied Surface Science*/ 255 (2009) 4536–4541.
- [13] Y.H. Kima, J.H. Lee, Y.K. Noh, J.E. Oh, S.J. Ahn. Microstructural characteristics of AlN thin layers grown on Si (110) substrates by molecular beam epitaxy: Transmission electron microscopy study// *Thin Solid Films*/ 576 (2015) 61-67.
- [14] T. V. K. Karthik, María de la Luz Olvera, Arturo Maldonado and Heberto Gómez Pozos. Thin films as gas sensor devices.
- [15] K. Oura, M. Katayama, A. V. Zotov, V. G. Lifshits, A. A. Saranin. *Surface science: an introduction*. Springer. 2003.
- [16] Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел: Сб. статей 1986–1987 гг.: Пер. с англ./Сост. Е.С. Машкова. – М.: Мир, 1989. – 349 с/
- [17] Плазменные покрытия (методы и оборудование): учебное пособие / В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Соловьёв. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 104 с
- [18] В.А. Барвинок, В.И. Богданович. Физические основы и

математическое моделирование процессов вакуумного ионно-плазменного напыления. – М.: Машиностроение, 1999. – 309с.

[19] Ионно-плазменные технологии формирования покрытий и модификации поверхностей: учебное пособие / Н.Н. Никитенков, И.А. Шулёпов, С.В. Дектярёв, И.Б. Степанов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 89 с.

[20] Кузьмичёв А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – К.: Аверс, 2008. – 244 с. ISBN 966-8934-07-5

[21] Исследование баланса энергии в ионном ускорителе темп-4м. Методические указания к лабораторной работе.

[22] <http://www.findpatent.ru/patent/255/2559022.html>. FindPatent.ru - патентный поиск, 2012-2016.

[23] Кудияров В.Н., Лидер А.М. Изучение процессов сорбции и десорбции водорода при помощи автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller LP // фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-15. – с. 3466-3471;

[24] A. V. Kabyshev, F. V. Konusov, G. E. Remnev and S. K. Pavlov. Influence of the High Intensity Short Pulse Implantation of Ions on the Properties of Polycrystalline Silicon// ISSN 1027 4510, Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2014, Vol. 8, No. 6, pp. 1168–1173.

[25] Г.Е. Ремнёв, Ю.Ф. Иванов, Е.П. Найден, М.С. Салтымаков, А.В. Степанов, В.Ф. Штанько. Формирование наноразмерных частиц карбида кремния и алмазов в поверхностном слое кремниевой мишени при короткоимпульсной имплантации ионов углерода// Журнал технической физики, 2009, том 79, вып. 4.

[26] A. V. Kabyshev, F. V. Konusov, and G. E. Remnev. Electrical and photoelectric properties of polycrystalline silicon after high-intensity short-

- pulse ion implantation// UDC 535.34:620.191. Russian Physics Journal, Vol. 56, No. 6, November, 2013 (Russian Original No. 6, June, 2013).
- [27] X.B. Liao, G.L. Kong, X.R. Yang, P.D. Wang, Y.Q. Chao, Z.M. Chen and C.L. Liu. Electrical properties and photoluminescence of amorphous silicon// Journal De Physique. Colloque C4, supplement au n 10, Tome 42, octobre 1981.
- [28] M.I. Buraschit, G.U. Pignatelli and S. Sanguinetti. Low-temperature conductivity behaviour of ionimplanted silicon bolometers// J. Phys.: Condens. Matter 2 (1990) 10011-10020.
- [29] Xinfu Qiang, HejunLi, Yulei Zhang, Song Tian, Jianfeng Wei. Synthesis and Raman scattering of SiC nanowires decorated with SiC polycrystalline nanoparticles// Materials Letters 107(2013)315–317
- [30] Mohan Kumar Kuntumalla, Harish Ojha, Vadali Venkata Satya Siva Srikanth. Subtle Raman signals from nano-diamond and β -SiC thin films// Thin Solid Films 541 (2013) 62–67
- [31] K. Grodeckia, I. Jozwika, J.M. Baranowskia, D. Teklinskaa, W. Strupinski. SEM and Raman analysis of graphene on SiC (0001)// Micron 80 (2016) 20–23
- [32] Paweł Borowicz, Tomasz Gutt, Tomasz Małachowski, Mariusz Latek. Carbonic inclusions on SiC/SiO₂ interface investigated with Raman Scattering// Diamond & Related Materials 20 (2011) 665–674
- [33] Venu Mankad, N.N.Ovsiuk, SanjeevK.Gupta, PrafullaK.Jha. Unexpected features of the formation of Si and Ge nanocrystals during annealing of implanted SiO₂ layers: Low frequency Raman spectroscopic characterization// Physica B 432(2014)116–120
- [34] Vanni Lughia, David R. Clarke. Defect and stress characterization of AlN films by Raman spectroscopy// APPLIED PHYSICS LETTERS 89, 241911 2006.
- [35] Jie-Jun Wu, Kazuteru Okuura, Kenta Okumura, Hideto Miyake, Kazumasa Hiramatsu, Zhitao Chen, Takashi Egawa. In-plane structural anisotropy and polarized Raman-active mode studies of nonpolar AlN grown on 6H-SiC by

low-pressure hydride vapor phase epitaxy// Journal of Crystal Growth 312(2010)490–494.

[36] Gwiy-Sang Chung, Kang-San Kim. Raman scattering of polycrystalline 3C–SiC film deposited on AlN buffer layer by using CVD with HMDS// Microelectronics Journal 39(2008)1405–1407.

[37] V. Yu. Davydov, Yu. E. Kitaev, I. N. Goncharuk, A. N. Smirnov, J. Graul, O. Semchinova, D. Uffmann, M. B. Smirnov, A. P. Mirgorodsky, R. A. Evarestov. Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN// PHYSICAL REVIEW B VOLUME 58, NUMBER 19 15 NOVEMBER 1998-I

[38] Н.Н. Никитенков, А.М. Хашхаш, Т.И. Сигфуссон, Е.Н. Кудрявцева, Т.В. Смекалина, В.Д. Хоружий, В.С. Сыпченко, Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов. Исследование особенностей поглощения водорода сталью 12Х12М1БФР при электролитическом, плазменном и высокотемпературном под давлением способах насыщения// Математика и механика. Физика. УДК 539.2:669+539.219.3

[39] Никитенков Н.Н., Хоружий В.Д., Хашхаш А.М., Чернов И.П., Тюрин Ю.И. Термостимулированная десорбция из образцов, насыщенных атомарным и молекулярным водородом // Труды XIX Междунар. конф. Взаимодействие ионов с поверхностью. ВИП-2009, Звенигород, август, 2009. М: 2009, Т.1. – С. 152–154.

[40] Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности: Пер. с англ.- М., Мир, 1989.- 564 с, ил. ISBN 5-03-001129-3