Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Структурное подразделение «Радиоэлектроники и телекоммуникационных систем»

УТВЕРЖДЕНА:
на заседании кафедры
Протокол №13 от 02 июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины

«ПРОЦЕССЫ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ»

Направление: 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Материалы микро- и наносистемной техники

Квалификация: Магистр

Форма обучения: очная

Документ подписан простой
электронной подписью
Составитель программы:
Ниндакова Лидия Очировна
Дата подписания: 21.06.2025

Документ подписан простой
электронной подписью
Утвердил: Ченский Александр
Геннадьевич
Дата подписания: 26.06.2025

Документ подписан простой
электронной подписью
Согласовал: Ниндакова Лидия
Очировна
Дата подписания: 21.06.2025

Год набора – 2025

Иркутск, 2025 г.

1 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

1.1 Дисциплина «Процессы микро- и нанотехнологий» обеспечивает формирование следующих компетенций с учётом индикаторов их достижения

Код, наименование компетенции	Код индикатора компетенции
ОПК-2 Способен управлять профессиональной и иной деятельностью на основе применения знаний проектного и финансового менеджмента	ОПК-2.2
ОПК-4 Способен выполнять исследования при решении инженерных и научно-технических задач, включая планирование и постановку сложного эксперимента, критическую оценку и интерпретацию результатов	ОПК-4.1
ОПК-7 Способен разрабатывать и актуализировать научно-техническую документацию в области нанотехнологий и микросистемной техники	ОПК-7.1
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели	УК-3.1

1.2 В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы

Код индикатора	Содержание индикатора	Результат обучения
ОПК-2.2	Знать: базовые принципы проектного и финансового менеджмента; Уметь: обоснованно выбирать и применять соответствующие принципы проектного и финансового менеджмента в процессах микро- и нанотехнологий; Владеть: информацией о принципах проектного и финансового менеджмента в области процессов микро- и нанотехнологий и владеть навыками их адекватного выбора при решении конкретных задач	Знать базовые принципы проектного и финансового менеджмента; Уметь обоснованно выбирать и применять соответствующие принципы проектного и финансового менеджмента в процессах микро- и нанотехнологий; Владеть информацией о принципах проектного и финансового менеджмента в области процессов микро- и нанотехнологий и владеть навыками их адекватного выбора при решении
ОПК-4.1	Знать: методы планирования и проведения экспериментальных исследований процессов микро- и нанотехнологий; Уметь: выбирать оптимальные методы планирования и проведения экспериментальных исследований процессов микро-	Знать методы планирования и проведения экспериментальных исследований процессов микро- и нанотехнологий; Уметь выбирать оптимальные методы планирования и проведения экспериментальных исследований процессов микро- и

	и нанотехнологий, провести интерпретацию результатов эксперимента и их критическую оценку; Владеть: навыками представления результатов эксперимента в требуемом формате	нанотехнологий, провести интерпретацию результатов эксперимента и их критическую оценку; Владеть навыками представления результатов эксперимента в требуемом формате
ОПК-7.1	Знать: научно-техническую, нормативную и справочную документацию в области нанотехнологий и микросистемной техники; по процессам микро- и нанотехнологий; Уметь: разрабатывать и актуализировать научно-техническую документацию в области нанотехнологий и микросистемной техники, процессам микро- и нанотехнологий; Владеть: навыками поиска научно-технической и справочной литературы, нормативных документов с использованием информационных технологий	Знать научно-техническую, нормативную и справочную документацию в области нанотехнологий и микросистемной техники; по процессам микро- и нанотехнологий; Уметь разрабатывать и актуализировать научно-техническую документацию в области нанотехнологий и микросистемной техники, процессам микро- и нанотехнологий; Владеть навыками поиска научно-технической и справочной литературы, нормативных документов с использованием информационных технологий
УК-3.1	Знать: методы организации и руководства работой команды; Уметь: выработать командную стратегию для достижения поставленной цели; Владеть: навыками организации и руководства работой команды для достижения поставленной цели	Знать методы организации и руководства работой команды; Уметь выработать командную стратегию для достижения поставленной цели; Владеть навыками организации и руководства работой команды для достижения поставленной цели

2 Место дисциплины в структуре ООП

Изучение дисциплины «Процессы микро- и нанотехнологий» базируется на результатах освоения следующих дисциплин/практик: «Актуальные проблемы современной нанотехнологии»

Дисциплина является предшествующей для дисциплин/практик: «Гетероструктурные полупроводниковые приборы», «Микро- и наносистемы в технике и технологии», «Производственная практика: практика по получению профессиональных умений и опыта профессиональной деятельности», «Материалы с иерархической структурой для микро- и наносистемной техники»

3 Объем дисциплины

Объем дисциплины составляет – 3 ЗЕТ

Вид учебной работы	Трудоемкость в академических часах
--------------------	------------------------------------

	(Один академический час соответствует 45 минутам астрономического часа)	
	Всего	Семестр № 1
Общая трудоемкость дисциплины	108	108
Аудиторные занятия, в том числе:	26	26
лекции	13	13
лабораторные работы	13	13
практические/семинарские занятия	0	0
Самостоятельная работа (в т.ч. курсовое проектирование)	82	82
Трудоемкость промежуточной аттестации	0	0
Вид промежуточной аттестации (итогового контроля по дисциплине)	Зачет	Зачет

4 Структура и содержание дисциплины

4.1 Сводные данные по содержанию дисциплины

Семестр № 1

№ п/п	Наименование раздела и темы дисциплины	Виды контактной работы						СРС		Форма текущего контроля
		Лекции		ЛР		ПЗ(СЕМ)		№	Кол. Час.	
		№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Введение. Системный подход к процессам микро- и нанотехнологии. Осаждение пленок из газовой фазы.	1	1					4, 5	4	Устный опрос
2	Методы нанесения вещества в вакууме из молекулярных пучков: вакуум-термическое испарение.	2		1	6			2, 4	5	Отчет по лабораторной работе
3	Физико-химические основы золь-гель технологии.	3	1					1, 5	8	Тест
4	Формирование стекловидных пленок золь-гель методом.	4		2	4			2, 4	6	Отчет по лабораторной работе
5	Процессы химического и сухого травления в микро-и нанозлектронике.	5		3	3			2, 5	7	Отчет по лабораторной работе

6	Процессы самоорганизации и самосборки наноструктур	6	1					5	6	Устный опрос
7	Литографические процессы. Классификация базовых методов литографии. Принципы формирования изображения.	7	2					1, 5	8	Тест
8	Оптическая литография	8	2					5	4	Устный опрос
9	Литография сканирующими электронными и ионными пучками. Рентгено-лучевая литография.	9	2					5	4	Устный опрос
10	Зондовые методы литографии	10	2					5	4	Устный опрос
11	Нанолитография.	11	2					3, 5	26	Устный опрос
	Промежуточная аттестация									Зачет
	Всего		13		13				82	

4.2 Краткое содержание разделов и тем занятий

Семестр № 1

№	Тема	Краткое содержание
1	Введение. Системный подход к процессам микро-и нанотехнологии. Осаждение пленок из газовой фазы.	Возникновение и развитие микро- и нанотехнологии. Миниатюризация и тенденции развития. Закон Мура. Кинетика и термодинамика процессов роста пленок. Механизмы роста пленок. Физические методы осаждения пленок: импульсное лазерное осаждение, распылительное осаждение, PVD-процесс.
2	Методы нанесения вещества в вакууме из молекулярных пучков: вакуум-термическое испарение.	Методы нанесения вещества в вакууме из молекулярных пучков: вакуум-термическое испарение.
3	Физико-химические основы золь-гель технологии.	Физико-химические основы золь-гель технологии для формирования тонких пленок. Физико-химические основы получения фрактальных агрегатов, наночастиц, порошков, наноструктурированных пленок и нанокерамики. Основы модели роста фрактальных агрегатов в золь-гель-процессах. Модель DLA (кластер - частица, модель Виттена-Сэндера), модель CCA (кластер-кластерная агрегация). Модель химически ограниченной агрегации.

4	Формирование стекловидных пленок золь-гель методом.	Формирование стекловидных пленок золь-гель методом.
5	Процессы химического и сухого травления в микро-и нанoeлектронике.	Типы загрязнений подложек в технологии микро и нанoeлектроники. Специфика комплексной очистки на различных стадиях технологического процесса. Рекомендации по оптимальному использованию жидкостных и сухих методов очистки. Процессы химического травления: механизмы травления; оборудование, методы и среды для жидкостного и газового травления; изотропное, анизотропное, локальное, селективное травление. Плазмохимическое и реактивно-ионное сухое травление. Классификация методик сухого травления. Оборудование для сухого травления. Электрохимическое травление.
6	Процессы самоорганизации и самосборки наноструктур	Характеристики самоорганизующихся и самособирающихся систем в нанотехнологиях. Типы самоорганизации. Диссипативные структуры. Типы диссипативных структур. Диссипативная самоорганизация. Консервативная самоорганизация. Неравновесные процессы. Континуальная самоорганизация. Самоорганизация эпитаксиальных структур, формирование пленок Ленгмюра-Блоджетт. Управление параметрами самоорганизации. Саморегулирующиеся процессы. Самоорганизация в объемных материалах.
7	Литографические процессы. Классификация базовых методов литографии. Принципы формирования изображения.	Классификация базовых методов литографии: фото-, рентгено-, электроно- и ионо-литография. Основные этапы технологического процесса литографии. Технологическая схема процесса фотолитографии. Назначение, физическая сущность и технология основных этапов процесса фотолитографии. Оборудование для фотолитографии. Резисты и способы их нанесения. Параметры резистов. Типы термической обработки резиста. Фотошаблоны. Виды фотошаблонов, их структура и технические требования к ним. Процесс разработки и изготовления фотошаблонов. Принципы формирования изображения. Преимущества и особенности проекционной фотолитографии. Пространственное разрешение процесса фотолитографии. Методики улучшения разрешения фотолитографии: уменьшение длины волны излучения, технологические методики улучшения разрешения (коррекция эффекта близости, фазосдвигающие маски, двойное экспонирование). Эволюция процессов экспонирования.
8	Оптическая литография	Возможности и перспективы оптической

		<p>фотолитографии. Литография в области экстремального ультрафиолета (EUV). Иммерсионная литография. Резисты для ближнего УФ диапазона. Особенности резистов для дальнего и экстремального УФ диапазонов. Химически усиленные резисты. Процесс «взрывной» литографии.</p>
9	<p>Литография сканирующими электронными и ионными пучками. Рентгено-лучевая литография.</p>	<p>Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ). Электронрезисты. Проекционная электронная литография. Сканирующая электронная литография. Технология SCALPEL. Многолучевые методы. Оборудование для электронно-лучевой литографии. Применение ЭЛЛ для изготовления структур наноэлектроники. Ионно-лучевая литография. Основы FIB- технологии. Рентгено-лучевая литография (РЛЛ): определение, особенности реализации, преимущества и недостатки по сравнению с фотолитографией. Способы переноса изображения с рентгеношаблона на рабочую площадь подложек. Особенности экспонирования в РЛЛ. Рентгенрезисты, их свойства и характеристики. Выбор резистов для РЛЛ.</p>
10	<p>Зондовые методы литографии</p>	<p>Зондовые методы формирования наноструктур. Формирование наноструктур с помощью сканирующей туннельной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии. Нелитографические методы получения топологии наноструктур. Технологический процесс создания структур «кремний-на изоляторе» (КНИ), «кремний-на-сапфире» (КНС) и перспективы их применения в нано- и микросистемной технике.</p>
11	<p>Нанолитография.</p>	<p>Нанолитография в современном понимании. Лазерно-интерференционная нанолитография (ЛИН). Атомная нанолитография. Литография наносферами. Dip-Pen, Nano-Pen литографии. Муаровая нанолитография. Наноимпринт литография. Типы наноимпринт - литографии. Материалы и оборудование. «Мягкая» литография. Варианты процессов S-FIL- наноимпринт-литографии. Лазерная литография. Взаимодействие лазерного излучения с резистом. Сравнение методов фокусированного ионного пучка, электронно-лучевой литографии и лазерной литографии. Новые литографические методы получения топологии наноструктур.</p>

4.3 Перечень лабораторных работ

Семестр № 1

№	Наименование лабораторной работы	Кол-во академических
---	----------------------------------	----------------------

		часов
1	Получение металлических пленок методом термического испарения в вакууме.	6
2	Получение стекловидных пленок золь-гель методом.	4
3	Жидкостная очистка и травление полупроводниковых пластин.	3

4.4 Перечень практических занятий

Практических занятий не предусмотрено

4.5 Самостоятельная работа

Семестр № 1

№	Вид СРС	Кол-во академических часов
1	Выполнение тренировочных и обучающих тестов	8
2	Оформление отчетов по лабораторным и практическим работам	10
3	Подготовка к зачёту	20
4	Подготовка к сдаче и защите отчетов	6
5	Проработка разделов теоретического материала	38

В ходе проведения занятий по дисциплине используются следующие интерактивные методы обучения: Дискуссия

5 Перечень учебно-методического обеспечения дисциплины

5.1 Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

5.1.1 Методические указания для обучающихся по лабораторным работам:

Лабораторные работы предназначены для приобретения опыта практической реализации полученных теоретических знаний. Лабораторные работы позволяют объединить теоретические знания и практические навыки студентов в процессе обучения. При подготовке к лабораторным занятиям необходимо заранее изучить методические рекомендации по их проведению. Обратит внимание на цель занятия, основные вопросы для подготовки к занятию, содержание темы занятия. В подготовку входят: изучение соответствующего теоретического материала, подготовка таблиц для занесения в них экспериментальных результатов, а также знакомство с разделом «порядок выполнения работы». Методические указания к лабораторным работам прорабатываются студентами во время самостоятельной подготовки. Необходимый уровень подготовки контролируется преподавателем перед проведением лабораторных работ. На лабораторных работах под руководством преподавателя проводятся опыты с использованием специального оборудования, химической посуды и реактивов.

При изучении дисциплины «Процессы микро- и нанотехнологии», согласно учебному плану, обучающиеся выполняют следующие лабораторные работы:

1. Получение металлических пленок методом термического испарения в вакууме.
2. Получение стекловидных пленок золь-гель методом.
3. Жидкостная очистка и травление полупроводниковых пластин.

Лабораторная работа №1 «Получение металлических пленок методом термического испарения в вакууме».

Цель работы:

1. Ознакомление с технологией получения тонких металлических пленок методом вакуумного термического испарения.
2. Исследование влияния режимов процесса вакуумного термического испарения на параметры формируемой пленки.

Оборудование и материалы: установка ВУП-4 (вакуумный универсальный пост); испаритель – вольфрам; напыляемое вещество – медная проволока; подложка – стекло; растворители для очистки поверхности стекла – спирт этиловый, ацетон.

В настоящее время наиболее широкое применение получил метод напыления тонких пленок путем термического испарения в вакууме. Основное достоинство метода - его универсальность. На одной и той же вакуумной установке можно получить однородные слои металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков различной толщины, а также получить тонкие пленки из разнородных веществ с определенным соотношением составных частей и различной толщиной каждого слоя.

В теоретической части рассмотрены вопросы, касающиеся актуальности пленочных технологий, требований к условиям вакуума в процессе напыления, устройство и работа вакуумного универсального поста ВУП-4, вид и конструкция испарителя.

Порядок выполнения работы:

Вид работы: напыление. Испаритель: вольфрам.

Напыляемое вещество: металлические медь, серебро. Объект напыления: стекло.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Подготовка подложки (стекла) к напылению.
2. Подготовка напыляемого вещества - медной проволоки.
3. Установление необходимого вакуума.
3. Непосредственно процесс напыления в камере установки вакуумного поста (ВУП-4). Приведено детальное описание процесса напыления.
4. Взвешивание полученных подложек с пленочным покрытием.
5. Расчет толщины металлических пленок.
6. Ознакомление с контрольными вопросами
7. Подготовка материалов к отчету по лабораторной работе. Написание отчета по лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой вакуум-термическое испарение? Где оно используется?
2. При каких условиях протекает процесс испарения материалов? Сравните низкий, средний и высокий вакуум.
3. Поясните процесс испарения материалов в вакууме. Объясните процессы плавления, сублимации. Как влияют температура, скорость испарения и давление паров на процесс испарения?
3. Какова связь между длиной свободного пробега молекул и степенью вакуума в камере установки?
4. Каковы порядок и содержание операций при напылении тонко-пленочных элементов?
5. Каковы особенности испарения материалов, использованных в работе?
6. Каковы технологические режимы напыления пленок резисторов, конденсаторов и проводников?
7. Какая взаимосвязь существует между условиями напыления и электрическими параметрами тонких пленок?

Лабораторная работа №2 «Получение стекловидных пленок золь-гель методом»

Цель работы: научиться получать стекловидные пленки золь-гель методом.

Приборы и реактивы: магнитная мешалка с обогревом, центрифуга, тетраэтилортосиликат, нитраты кобальта и никеля, хлориды кобальта и никеля, этиловый спирт (изопропиловый спирт), дистиллированная вода.

В теоретической части рассмотрены основные принципы и условия формирования стекловидных пленок золь-гель методом, особенности применения стекловидных пленок в планарной технологии микроэлектроники, достоинства и недостатки метода, температурно-временные режимы золь-гель нанотехнологии, способы нанесения покрытий из растворов, термическая обработка пленок, особенности получения гибридных органо-неорганических нанокомпозитов для электроизоляционных покрытий. Приведен пример расчета состава исходных компонентов для получения стекловидных пленок.

Порядок выполнения работы:

1. Приготовление раствора, содержащего компоненты – модификаторы, входящие в состав золя.
2. Приготовление реакционного состава добавляя необходимое (расчетное) количество силикатного реагента (тетраэтилортосиликата).
3. Подготовка стеклянной подложки для нанесения пленки.
4. Формирование стекловидной пленки на стеклянной подложке методом центрифугирования.
5. Термообработка полученной пленки
6. Исследование пленки методом оптической микроскопии и СЗМ.
7. Подготовка материалов к отчету по лабораторной работе. Написание отчета по лабораторной работе.
8. Ознакомление с контрольными вопросами.

Контрольные вопросы:

1. Напишите реакции гидролиза тетраэтоксисилана $\text{Si}(\text{OEt})_4$ и поликонденсации продуктов гидролиза.
2. Как можно описать темплатное действие гиперразветвленных полимеров, введенных в золи, на структуру образующегося гибрида.
3. Что такое структура «гость-хозяин». Опишите подобную структуру на примере тонких силикатных пленок, полученных из золь-гелей на основе тетраэтоксисилана и неорганических добавок (солей металлов).
4. Какое соотношение органической и неорганической составляющих должно быть в золе, чтобы образовалась структура ВПС (взаимопроникающие сетки).
5. Приведите пример получения люминесцентных материалов золь-гель методом.
6. Какие функции могут выполнять тонкие пленки в технологическом цикле изготовления микроэлектронных устройств, например, металлооксидных газовых сенсоров?
7. Какие достоинства имеет способ диффузии из пленок, полученных золь-гель методом? Почему малозумящие транзисторы получают, используя легирование из пленочных источников, полученных по золь-гель технологии.
8. Какие легирующие примеси можно вводить в золь? Какие проблемы могут возникнуть при увеличении концентрации допантов в золях?

Лабораторная работа №3 «Жидкостная очистка и травление полупроводниковых пластин»

Цель работы: практическое освоение технологических приемов химического травления при изготовлении печатной платы.

Приборы и реактивы: пластины текстолита, фторопластовый пинцет, резиновые перчатки, стаканы химические (250-350 мл)- 5 шт., перекись водорода (3%-ный раствор), хлорное железо, сульфат меди, хлорид натрия, соляная кислота, лимонная кислота, дистиллированная вода, этиловый спирт, ацетон, бумажные фильтры, наждачная бумага (мелкой фракции).

В теоретической части работы рассмотрены составы травильных растворов, способы

травления заготовок печатных плат.

Порядок выполнения работы:

Получить у преподавателя пластины текстолита, пинцет, резиновые перчатки.

Ознакомиться с рабочим местом: оборудованием, приборами, инструментом, материалами. Все работы с использованием травителей выполнять в резиновых перчатках в вытяжном шкафу при включенной вытяжной вентиляции.

I. Подготовительные операции:

1.1. Подготовить пластины из одностороннего фольгированного текстолита (поскольку мы будем делать одностороннюю плату) - заготовка для платы; их размер 5x7 см;

1.2. Подготовить наждачную бумагу самой мелкой фракции – она необходима для повышения адгезионных свойств поверхности меди, для улучшенного переноса тонера на медь;

1.3. Подготовить спирт и ацетон - для обезжиривания медной поверхности;

1.4. Подготовить фотобумагу или глянцевую бумагу для переноса рисунка печатной платы;

1.5. Подготовить 5 химических термостойких стаканов (250-350 мл).

2. Подготовка поверхности пластины

2.1. Обработать наждачной бумагой поверхность текстолита.

2.2. Обезжирить при помощи спирта, ацетона (или аналогов).

2.3. При обезжиривании поверхности текстолитовой пластинки, не только очищается поверхность от загрязнений, но и усиливаются адгезионные свойства медной поверхности - это упрощает перенос тонера.

3. Подготовка бумажного шаблона для переноса рисунка на печатную плату.

Изображение платы в зеркальном отображении распечатывается на лазерном принтере на подложке. При этом в качестве подложки используется тонкая мелованная бумага (обложки от различных журналов), бумага для факсов, глянцевая сторона фотобумаги или пленка для лазерных принтеров (это маска будущей платы).

4. Перенос рисунка с бумаги на текстолит.

5. Травление печатной платы.

6. После окончания процесса травления аккуратно пинцетом извлечь пластинки из растворов, промыть под проточной водой и сушить на бумажном фильтре.

7. Определить влияние состава раствора- травителей на эффективность процесса травления. Представить результаты травления в виде таблицы, указав для каждого из растворов - травителей химические реакции, происходящие в них.

8. После заполнения таблицы необходимо сделать вывод об эффективности применения растворов-травителей, используемых в данной работе.

9. Подготовка материалов к отчету по лабораторной работе. Написание отчета по лабораторной работе.

10. Ознакомление с контрольными вопросами.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются процессы травления и очистки поверхностей?

2. Каковы требования к рабочим газам и условия образования летучих компонент в процессе травления?

3. Жидкостная очистка подложек в технологии компонентов микро-и наносистемной техники и микроэлектроники: их назначение, возможности, преимущества и недостатки.

4. Жидкостное химическое травление. Травители, стадии процесса, очистка.

5. Понятие полирующих, селективных и анизотропных травителей и процессов травления.

6. Классификация, возможности, преимущества и недостатки сухих методов обработки подложек при их очистке.

На лабораторных работах под руководством преподавателя проводятся опыты с использованием специального оборудования, оборудования и реактивов. По итогам

эксперимента составляется отчет о проделанной работе, согласно стандарту ИРНИТУ СТО 027-2015.

5.1.2 Методические указания для обучающихся по самостоятельной работе:

Самостоятельная работа студентов включает проработку лекционного курса, подготовку к практическим (семинарским занятиям) и лабораторным работам, выполнение всех заявленных в рабочей программе видов самостоятельной работы. Самостоятельная работа предусматривает не только проработку материалов лекционного курса, но и их расширение в результате поиска, анализа, структурирования и представления в компактном виде современной информации их всех возможных источников.

Самостоятельная работа - это планируемая работа студентов, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

К основным видам индивидуальной самостоятельной работы можно отнести: подготовку к лекциям, практическим занятиям, лабораторным работам, зачетам, экзаменам, выполнение рефератов, заданий, курсовых работ и проектов, а на заключительном этапе - выполнение выпускной квалификационной работы магистра.

Самостоятельная работа по дисциплине «Процессы микро- и нанотехнологии» выполняется в соответствии с рабочим учебным планом направления подготовки 28.04.01 «Нанотехнология и микросистемная техника».

Целью самостоятельной работы является закрепление полученных знаний в области базовых процессов микро- и нанотехнологии, применяемых при производстве компонентов микро- и наносистемной техники.

Основными задачами, решаемыми при выполнении самостоятельной работы, являются:

- приобретение навыков использования программных средств при представлении материалов и оформлении всех видов работ;
- развитие навыков самостоятельной работы с научно-технической и справочной литературой с использованием информационных технологий.

Самостоятельная работа проводится с целью углубления знаний по дисциплине и предусматривает:

- изучение отдельных разделов тем дисциплины;
- чтение студентами рекомендованной литературы и усвоение теоретического материала дисциплины;
- подготовку к практическим (семинарским) занятиям;
- работу с Интернет-источниками.

Самостоятельная работа предназначена не только для овладения дисциплиной, но и для формирования навыков самостоятельной работы вообще, в учебной, научной, профессиональной деятельности, способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решить проблему, находить конструктивные решения.

Использование консультаций при самостоятельной работе. Если в процессе самостоятельной работы над изучением теоретического материала, возникли проблемы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения у него разъяснений или указаний. При этом следует формулировать вопросы максимально конкретно.

6 Фонд оценочных средств для контроля текущей успеваемости и проведения промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Оценочные средства для проведения текущего контроля

6.1.1 семестр 1 | Отчет по лабораторной работе

Описание процедуры.

На лабораторных работах под руководством преподавателя проводятся опыты с использованием специального оборудования, химической посуды и реактивов. По итогам эксперимента составляется отчет о проделанной работе, согласно стандарту ИРНИТУ СТО 027-2015. Каждый студент оформляет отчет по лабораторной работе, независимо от выполнения данной работы в группе. Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать:

-тему работы;

-цель работы;

-оборудование и реактивы, использованное при проведении опытов;

-уравнения соответствующих химических реакций и расчетные данные;

-таблицы экспериментальных результатов;

-вывод с заключением о проделанной работе.

Защита отчета по лабораторной работе выполняется в виде устного ответа на контрольные вопросы, приведенные в методическом пособии для лабораторных работ. Итогом выполнения лабораторной работы является защита отчета по лабораторной работе, оценка «зачтено» и подпись преподавателя, проверившего работу.

Критерии оценивания.

Зачтено

Задание по работе выполнено в полном объеме; вывод сделан самостоятельно; даны верные ответы на контрольные вопросы. Студент свободно ориентируется в теоретическом материале,

отвечает на дополнительные вопросы по теме лабораторной работы. Отчет выполнен аккуратно и в соответствии с предъявляемыми требованиями. Задание по работе выполнено в полном объеме. Студент ответил на теоретические вопросы, испытывая небольшие затруднения. Качество оформления отчета к работе полностью соответствует требованиям.

Не зачтено

Студент правильно выполнил задание к работе. Составил отчет в установленной форме, представил решения большинства заданий, предусмотренных в работе. Студент не может полностью объяснить полученные результаты.

Студент не выполнил все задания работы и не может объяснить полученные результаты. При выполнении лабораторной работы студентом допущены существенные ошибки по содержанию теоретического материала. Отчет по работе выполнен с нарушением требований действующего стандарта, в уравнениях химических реакций и расчетах допущены грубые ошибки, на контрольные вопросы даны неверные ответы.

6.1.2 семестр 1 | Устный опрос

Описание процедуры.

Устный опрос позволяет оценить знания и кругозор студента, умение логически построить ответ, владение речью и иные коммуникативные навыки; позволяет выявить детали, которые по каким-то причинам оказались недостаточно осмысленными в ходе учебных занятий.

Описание процедуры:

Устный опрос проводится во время аудиторных занятий. Преподаватель продумывает вопросы с целью выяснения, как студенты усвоили теоретический материал. Устный опрос является одним из эффективных методов повышения активности студентов на занятии. Проводится фронтальный, индивидуальный и комбинированный опрос.

Тема: Технологии литографических процессов

Вопросы для контроля:

1. Литография. Классификация литографических процессов: в зависимости от способа переноса изображения на подложку, в зависимости от типа используемого резиста, в зависимости от длины волны используемого излучения. Анализ факторов, обуславливающих широкое использование литографии в технологии микро- и наносистемной техники, микро- и наноэлектроники.
2. Литографический цикл: резисты и способы их нанесения, позитивные, негативные, жидкие и сухие резисты; методы повышения адгезии, плазмостойкости; планаризация, предэкспозиционная обработка, проявление и сушка.
3. Что такое литографически индуцированная самосборка?
4. Оптические методы нанолитографии.
5. Технологический процесс фотолитографии. Резисты. Фотошаблоны. Экспозиция. Разрешение фотолитографии.
6. Литография в области глубокого УФ, рентгеновская и электронная литография.
7. Электронная литография с прямой записью электронным пучком. Преимущества и недостатки электронной литографии с прямой записью электронным пучком.
8. Нанолитография. Нанолитография с помощью СЗМ. Нанопечатная литография.
9. Нанолитография «глубокого пера» (dip pen – нанолитография) была предложена в 1997 г. Чадом Миркиным. Особенностью литографии является перенос молекул полимерного материала с острия зонда атомного-силового микроскопа на модифицированную поверхность. В 2000г. была организована фирма «Nanoink» , которая в 2004г. довела толщину линии до 10 нм при обеспечении возможности одновременной работы 55 000 зондов. Какие требования к полимерным материалам предъявляются в этой перспективной нанотехнологии?
10. Оцените перспективы «мягких» нанотехнологий (nanoimprintig) для пластиковой электроники. Какие требования должны предъявляться к наночернилам? Сравните технологию нанопечати с технологией наностамп и нанотехнологией создания рельефа.
11. Процесс «взрывной» литографии. Сущность процесса. Преимущества и недостатки.

Критерии оценивания.

«отлично»: ответ содержательный, уверенный и четкий; показано свободное владение материалом различной степени сложности; при ответе на дополнительные вопросы выявляется владение материалом; допускаются один-два недочета, которые студент сам исправляет по замечанию преподавателя;

«хорошо»: твердо усвоен основной материал; ответы удовлетворяют требованиям, установленным для оценки «отлично», но при этом допускаются ошибки при изложении фактического материала; при ответе на дополнительные вопросы демонстрируется понимание требуемого материала с несущественными ошибками;

«удовлетворительно»: обучаемый знает и понимает основной материал программы, основные темы, но в усвоении материала имеются пробелы; излагает его упрощенно, с небольшими ошибками и затруднениями; изложение теоретического материала приводится с ошибками, неточно или схематично; появляются затруднения при ответе на дополнительные вопросы;

«неудовлетворительно»: отказ от ответа; отсутствие минимальных знаний по дисциплине; присутствуют грубые ошибки в ответе; практические навыки отсутствуют; студент не способен исправить ошибки даже с помощью рекомендаций преподавателя.

6.1.3 семестр 1 | Тест

Описание процедуры.

Тест является простейшей формой контроля, направленной на проверку владения терминологическим аппаратом и конкретными знаниями по изучаемой дисциплине. Тест состоит из небольшого количества вопросов и задач; может предоставлять возможность выбора из перечня ответов; занимает часть учебного занятия (10-30 минут); правильные решения разбираются на том же или следующем занятии. Частота тестирования определяется преподавателем.

Цель тестирования - выявить уровень знаний студентов, оценить степень усвоения ими учебного курса и определить на этой основе направления дальнейшего совершенствования работы с ними, а также стимулировать активность их самостоятельной работы.

Описание процедуры:

Тест составлен из небольшого количества вопросов. Тестовые задания составлены таким образом, что нужно выбрать один вариант ответа из предложенных 3 – 4 вариантов.

Проводится тестирование на аудиторных занятиях в течение 10 – 30 минут.

Пример тестового задания

1. Какой из перечисленных ниже металлов чаще всего используется при получении наноструктурированных материалов с использованием "мягкой литографии"?

- а) Li
- б) Fe
- в) Os
- г) Be
- д) Au

2. С помощью какой методики на полимерную матрицу лучше всего наносить планарную структуру из листов графена для гибкой электроники?

- а) электродуговым распылением
- б) лазерной абляцией
- в) мягкой литографией
- г) микросферной литографией
- д) с помощью графоэпитаксии

3. Укажите правильную последовательность видов литографии в зависимости от уменьшения размера получаемых элементов интегральных схем (ИМС):

- а) Оптическая › УФ-литография › Рентгеновская › Электронно-лучевая;
- б) Электронно-лучевая › Рентгеновская › УФ-литография › Оптическая;
- в) Рентгеновская › УФ-литография › Оптическая › Электронно-лучевая;
- г) УФ-литография › Оптическая › Электронно-лучевая › Рентгеновская.

4. Вариант литографии, в котором все операции выполняются в жидкости, куда погружена оптическая система и подложка, называется:

- а) биомиметикой;
- б) квантовой механикой;
- в) нанонаблюдением;
- г) иммерсионной литографией.

5. Светочувствительный слой на кремниевой подложке, затвердевающий под воздействием света, называется:

- а) фоторезистом;
- б) маскарадом;
- в) растворителем;
- г) высокопроизводительным элементом.

6. Какая из указанных ниже методик не позволяет эффективно получать планарные наноструктуры?

- а) FIB-литография;
- б) ИК-литография;

- в) СЗМ-литография;
 г) контактная микропечать;
 д) микросферная литография.
7. Какой из параметров является наименее важным при создании полевого транзистора на основе углеродных нанотрубок?
 а) толщина диэлектрического слоя;
 б) хиральность нанотрубки;
 в) тип проводимости полупроводника;
 г) толщина слоя проводника;
 д) длина углеродной нанотрубки.
8. Что не влияет на частоту плазмонного резонанса наночастиц серебра?
 а) анизотропия;
 б) размер;
 в) модификатор поверхности;
 г) наличие точечных дефектов и F-центров (центров окраски); д) температура;
 е) давление.
9. «Самосборка» квантовых точек на подложке при осаждении из газовой фазы вызвана:
 а) флуктуациями (модуляцией) состава питающей среды;
 б) химическим взаимодействием квантовых точек с подложкой;
 в) эпитаксиальным ростом пленок;
 г) рассогласованием параметров решеток пленки и подложки;
 д) осаждением полупроводниковых «островков» на вицинальных выходах винтовых дислокаций подложки;
 е) затрудненной миграцией ростовых блоков по боковой поверхности эшелонов ростовых ступеней подложки.
10. При получении монослоев методом Лэнгмюра-Блоджетт Y-тип пленки означает:
 а) голова к голове, хвост к хвосту;
 б) голова к хвосту;
 в) хвост к голове;
 г) комбинация X и Z – типов;
 д) латеральное упорядочение в пленке;
 е) периодически гофрированный монослой.

Критерии оценивания.

оценка «зачтено» выставляется студенту, если количество правильных ответов составляет 60 и более процентов; оценка «не зачтено» выставляется студенту, если количество правильных ответов менее 60%.

6.2 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

6.2.1 Критерии и средства (методы) оценивания индикаторов достижения компетенции в рамках промежуточной аттестации

Индикатор достижения компетенции	Критерии оценивания	Средства (методы) оценивания промежуточной аттестации
ОПК-2.2	Демонстрирует знание базовых принципов проектного и финансового менеджмента. Способен обоснованно их выбирать и применять в процессах	Устное собеседование по теоретическим вопросам и

	микро- и нанотехнологий.	выполнение практических заданий.
ОПК-4.1	Знает методы планирования и проведения экспериментальных исследований процессов микро- и нанотехнологий; Умеет выбирать оптимальные методы планирования и проведения экспериментальных исследований процессов микро- и нанотехнологий, провести интерпретацию результатов эксперимента и их критическую оценку.	Устное собеседование по теоретическим вопросам и выполнение практических заданий.
ОПК-7.1	Демонстрирует знание научно-технической, нормативной и справочной документации в области нанотехнологий и микросистемной техники; по процессам микро- и нанотехнологий; Способен разработать и актуализировать научно-техническую документацию в области нанотехнологий и микросистемной техники, процессам микро- и нанотехнологий.	Устное собеседование по теоретическим вопросам и выполнение практических заданий.
УК-3.1	Демонстрирует знание методов организации и руководства работой команды и способность выработки командной стратегии для достижения поставленной цели.	Устное собеседование по теоретическим вопросам и выполнение практических заданий.

6.2.2 Типовые оценочные средства промежуточной аттестации

6.2.2.1 Семестр 1, Типовые оценочные средства для проведения зачета по дисциплине

6.2.2.1.1 Описание процедуры

Описание процедуры зачета

Промежуточная аттестация предусматривает проведение зачета, который включен в учебный план направления подготовки, и предназначен для проверки успеваемости студентов по дисциплине. Зачет студенты сдают в конце семестра в период семестровых экзаменационных сессий, по расписанию, согласно графику учебного процесса. К зачету допускаются студенты, выполнившие все лабораторные работы и успешно защитившие отчеты по ним. Студентам заранее выдаются контрольные вопросы к зачету. В процессе сдачи зачета студент получает билет, который содержит три теоретических вопроса и практическое задание.

Пример задания:

Контрольные вопросы для подготовки к зачету:

1. Возникновение и развитие микро- и нанотехнологии. Миниатюризация и тенденции развития. Факторы, влияющие на ограничения размеров элементов интегральных схем и возможные пути их преодоления. Фундаментальные пределы миниатюризации. Закон Мура, его обобщение и новые перспективы.
2. Кинетика и термодинамика процессов роста пленок. Механизмы роста пленок. Физические методы осаждения пленок: импульсное лазерное осаждение, распылительное осаждение.
3. Физико-химические основы золь-гель технологии для формирования тонких пленок. Физико-химические основы получения фрактальных агрегатов, наночастиц, порошков, наноструктурированных пленок и нанокерамики.
4. Основы модели роста фрактальных агрегатов в золь-гель-процессах. Модель DLA (кластер-частица, модель Виттена – Сэндера), модель ССА (кластер-кластерная агрегация). Модель химически ограниченной агрегации.
5. Характеристики самоорганизующихся и самособирающихся систем в нанотехнологиях. Типы самоорганизации. Диссипативные структуры. Типы диссипативных структур. Диссипативная самоорганизация.
6. Консервативная самоорганизация. Неравновесные процессы. Континуальная самоорганизация. Самоорганизация эпитаксиальных структур, формирование пленок Ленгмюра-Блоджетт.
7. Управление параметрами самоорганизации. Саморегулирующиеся процессы. Самоорганизация в объемных материалах.
8. Классификация базовых методов литографии: фото-, рентгено-, электроно- и ионолитография. Основные этапы технологического процесса литографии.
9. Технологическая схема процесса фотолитографии. Назначение, физическая сущность и технология основных этапов процесса фотолитографии. Оборудование для фотолитографии. Резисты и способы их нанесения. Параметры резистов. Типы термической обработки резиста.
10. Фотошаблоны. Виды фотошаблонов, их структура и технические требования к ним. Процесс разработки и изготовления фотошаблонов.
11. Процесс экспонирования. Принципы формирования изображения. Преимущества и особенности проекционной фотолитографии. Пространственное разрешение процесса фотолитографии.
12. Методики улучшения разрешения фотолитографии: уменьшение длины волны излучения, технологические методики улучшения разрешения (коррекция эффекта близости, фазосдвигающие маски, двойное экспонирование). Эволюция процессов экспонирования.
13. Возможности и перспективы оптической фотолитографии. Литография в области экстремального ультрафиолета (EUV).
14. Иммерсионная литография.
15. Резисты для ближнего УФ диапазона. Особенности резистов для дальнего и экстремального УФ диапазонов. Химически усиленные резисты.
16. Процесс «взрывной» литографии. Сущность процесса. Преимущества и недостатки.
17. Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ). Электронрезисты. Проекционная электронная литография. Сканирующая электронная литография. Технология SCALPEL. Многолучевые методы. Оборудование для электронно-лучевой литографии. Применение ЭЛЛ для изготовления структур нанoeлектроники.
18. Ионно-лучевая литография. Основы FIB-технологии.
19. Рентгено-лучевая литография (РЛЛ): определение, особенности реализации, преимущества и недостатки по сравнению с фотолитографией. Способы переноса изображения с рентгеношаблона на рабочую площадь подложек.

20. Особенности экспонирования в РЛЛ. Рентгенрезисты, их свойства и характеристики. Выбор резистов для РЛЛ.
21. Зондовые методы формирования наноструктур. Формирование наноструктур с помощью сканирующей туннельной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии
22. Нелитографические методы получения топологии наноструктур.
23. Нанолитография в современном понимании. Лазерно-интерференционная нанолитография (ЛИН).
24. Атомная нанолитография. Литография наносферами.
25. Dip-Pen, Nano-Pen литографии. Муаровая нанолитография.
26. Наноимпринт литография. Типы наноимпринт - литографии. Материалы и оборудование. «Мягкая» литография. Варианты процессов S-FIL- наноимпринт-литографии.
27. Лазерная литография. Взаимодействие лазерного излучения с резистом. Сравнение методов фокусированного ионного пучка, электронно-лучевой литографии и лазерной литографии. Новые литографические методы получения топологии наноструктур.

6.2.2.1.2 Критерии оценивания

Зачтено	Не зачтено
<p style="text-align: center;">Зачтено</p> <p>выставляется при условии, если студент выполнил и защитил все лабораторные работы и показывает хорошие знания изученного теоретического материала; самостоятельно, логично и последовательно излагает и интерпретирует материалы учебного курса; полностью раскрывает смысл предлагаемого вопроса; владеет основными терминами и понятиями изученного курса; успешно справляется с практическим заданием; показывает умение применять полученные теоретические знания на практике.</p>	<p style="text-align: center;">Не зачтено</p> <p>выставляется при условии, если студент не выполнил и не защитил отчеты по лабораторным работам; допускает грубые ошибки при изложении теоретического материала; не владеет основными терминами и понятиями изученного курса; показывает значительные затруднения при ответе на предложенные основные и дополнительные вопросы и испытывает серьезные затруднения при выполнении практического задания.</p>

7 Основная учебная литература

1. Ковшов А. Н. Основы нанотехнологии в технике : учебное пособие для вузов по направлениям подготовки дипломированных специалистов "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" ... / А. Н. Ковшов, Ю. Ф. Назаров, И. М. Ибрагимов, 2009. - 236.
2. Рамбиди Н. Г. Структура и свойства наноразмерных образований: реалии сегодняшней нанотехнологии : учебное пособие / Н. Г. Рамбиди, 2011. - 375.
3. Золь-гель технология микро-и нанокомпозитов : учебное пособие для вузов по направлениям 210100 "Электроника и нанoeлектроника" и 222900 "Нанотехнологии и микросистемная техника" / В. А. Мошников [и др.], 2013. - 292.
4. Наноматериалы и нанотехнологии : учебник для вузов / Е. И. Пряхин [и др.], 2020. - 372.

5. Фахльман Б. Химия новых материалов и нанотехнологии : учебное пособие / Б. Фахльман, 2011. - 463.
6. Лозовский В. Н. Нанотехнологии в электронике. Введение в специальность : учебное пособие / В. Н. Лозовский, С. В. Лозовский, 2019. - 332.
7. Старостин В. В. Материалы и методы нанотехнологии : учебное пособие для вузов по направлению "Нанотехнология" / В. В. Старостин, 2010. - 431.

8 Дополнительная учебная литература и справочная

1. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев, 2007. - 414.
2. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники : учебное пособие / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р. Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда; пер. с англ. А. В. Хачояна; под ред. Е. Б. Якимова, 2009. - 367.
3. Старостин В. В. Материалы и методы нанотехнологии : учебное пособие для вузов по направлению "Нанотехнология" / В. В. Старостин, 2013. - 431.
4. Халл М. Нанотехнологии и экология: риски, нормативно-правовое регулирование и управление : переводное издание / М. Халл, Д. Боумен, 2013. - 344.
5. Егорова Е. М. Нанотехнологии: методология исследований действия наночастиц металлов на биологические объекты : учебное пособие для вузов / Е. М. Егорова, А. А. Кубатиев, 2020. - 198.

9 Ресурсы сети Интернет

1. <http://library.istu.edu/>
2. <https://e.lanbook.com/>

10 Профессиональные базы данных

1. <http://new.fips.ru/>
2. <http://www1.fips.ru/>

11 Перечень информационных технологий, лицензионных и свободно распространяемых специализированных программных средств, информационных справочных систем

1. Microsoft Office 2007 Standard - 2003 Suites и 2007 Suites - поставка 2010
2. Microsoft Windows Seven Professional (Microsoft Windows Seven Starter) - Seven, Vista, XP_prof_64, XP_prof_32 - поставка 2010
3. Лицензионное программное обеспечение Системное программное обеспечение
4. Лицензионное программное обеспечение Пакет прикладных офисных программ
5. Лицензионное программное обеспечение Интернет-браузер

12 Материально-техническое обеспечение дисциплины

1. Учебная аудитория для проведения лабораторных/практических (семинарских) занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Оснащение: комплект учебной мебели, рабочее место преподавателя, доска. Мультимедийное оборудование (в том числе переносное): мультимедийный проектор, экран, акустическая система, компьютер с выходом в интернет.
2. Проектор Epson EB-460i LCD
3. Стол пристенный ЛАБ-1200 ПЛ
4. Компьютер P5B 2 DUO E6X50/2Gb/200/GF512Mb/FDD/DVDRW/Samsung LCD 19 4 шт
5. Доска магнитно-маркерная INDEX настенная ,размер 1x1.8 м
6. 11. Стол пристенный ЛАБ-1200 ПЛ - 8 шт