



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДФУ)

ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

«СОГЛАСОВАНО»
Руководитель ОП


_____ Крайнова Г.С.
(подпись) (Ф.И.О. рук. ОП)
« 19 » сентября 2018 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий (ая) кафедрой
Физики низкоразмерных структур
(название кафедры)


_____ Саранин А.А.
(подпись) (Ф.И.О. зав. каф.)
« 19 » сентября 2018 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии.
Направление подготовки 11.03.04 Электроника и микроэлектроника
Форма подготовки очная

курс 4 семестр 7
лекции - 30 час.
практические занятия – час.
лабораторные работы 16 час.
всего часов аудиторной нагрузки 46 час.
в том числе с использованием МАО 16 час.
самостоятельная работа 62 час.
в том числе на подготовку к экзамену 36 час.
контрольные работы (количество) 7.
курсовая работа / курсовой проект не предусмотрены
экзамен 7 семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями образовательного стандарта, самостоятельно устанавливаемого ДВФУ, утвержденного приказом ректора от 18.02.2016 № 12-13-235

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры физики низкоразмерных структур, протокол № 3 от «19» сентября 2018 г.

Заведующий (ая) кафедрой Саранин А.А.
Составитель (ли): к.ф.-м.н. Давыденко А.В.

Оборотная сторона титульного листа РПУД

I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:

Протокол от « _____ » _____ 20__ г. № _____

Заведующий кафедрой _____ А.А. Саранин
(подпись) (И.О. Фамилия)

II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:

Протокол от « _____ » _____ 20__ г. № _____

Заведующий кафедрой _____ А.А. Саранин
(подпись) (И.О. Фамилия)

ABSTRACT

Study program in 11.03.04 Electronics and nanoelectronics.

Course title: Probe nanotechnologies in electronics. Basics of nanolithography.

Basic part of Block, 3 credit

Instructor: A.V. Davydenko, Cand. of phys. and math., School of Natural Sciences of Far Eastern Federal University.

At the beginning of the course a student should be able to:

GPC-2, reveal natural-science essence of problems, arising during professional activity, attract appropriate physico-mathematical apparatus for solving such problems,

GPC-6, carry out search, storage, processing and analysis of information from different sources and data bases, present it in required format with application of information, computer and networking technologies,

GPC-9, use computer working skills, methods information technologies, follow basic requirements of information security.

Learning outcomes:

SPC-2, choose and realize on practice effective methodic of experimental investigation of parameters and characteristics of devices, schemes, equipments and apparatus of electronics and nanoelectronics of different functional purposes,

SPC-9, ability to perform work on technological preparation of production of materials and products of electronic equipment.

Course description:

This course consists of two parts. In the first one physical principles and peculiarities of construction of devices, by means of which probe nanotechnologies may be implemented, are considered. Special attention is given for different

approaches and methodic of work with devices. The second part of the course describes as existing and working probe nanotechnologies as perspective ideas, which will be implemented in future.

The aim of studying the discipline is to obtain basic knowledge about the devices, principles of operation of various types of probe microscopes and to expand the general outlook regarding probe nanotechnologies.

Preparation of academic bachelors in the field of nanotechnology in electronics, understanding the physical and technological aspects of the development and technological creation of microcircuits with limiting sizes of less than 22 nm, and also understanding the prospects for their further development of nanolithography technology with a subsequent decrease in the minimum size to 10 nm and 5 nm new types of ultra-high-speed integrated circuits.

Tasks of studying the discipline:

- Training in basic skills in atomic-force, scanning tunnel and magnetic-force microscopes.
- Mastering the software for processing data obtained using scanning microscopes
- Ability to analyze the experimental data and present them in the form of a scientific report
- The study of modern scientific literature, which describes the probe nanotechnology.

Main course literature:

1. Nevolin V.K. Probe nanotechnologies in electronics. M. Technosphaera, 2014 y. – 174 p. <http://www.iprbookshop.ru/26894.html>

2. Ageev O.A., Phedotov A.A., Smirnov V.A. Methods of formation of element structures of nanoelectronics and nanosystem technique: Tutorial. – Taganrog: publisher TTI YFU, 2010. 72 p. <http://window.edu.ru/resource/948/73948>

3. Starostin V.V. Materials and methods of nanotechnology: Tutorial / ed. by L.N. Patrikeev. – M.: BINOM. Laboratory of knowledge, 2015. – 432 p. <http://www.iprbookshop.ru/4589.html>

4. Gusev A.I. Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology. M. Physmatlit, 2009. – 416 p. <http://www.iprbookshop.ru/12979.html>

Form of final knowledge control: exam.

АННОТАЦИЯ

Учебная дисциплина «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии» разработана для студентов 4 курса направления бакалавриата 11.03.04 Электроника и микроэлектроника, в соответствии с требованиями образовательного стандарта, самостоятельно устанавливаемого ДВФУ.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 3 зачетные единицы (108 часов). Учебным планом предусмотрены лекции (30 часов), лабораторные работы (16 часов), самостоятельная работа студента (62 часа, в том числе 36 часов на подготовку к экзамену). Дисциплина «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии» входит в группу «Дисциплины по выбору» профессионального цикла, реализуется на 4 курсе, в 7 семестре.

Дисциплина «Зондовые нанотехнологии в электронике. Нанолитография» логически и содержательно связана с дисциплинами, как «Механика и молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Неорганическая, органическая и физическая химия», «Теоретические основы электротехники», «Наноэлектроника» и «Материалы электронной техники» и др.

Данный курс состоит из двух частей. В первой части рассматриваются физические принципы и особенности конструкции приборов, с помощью которых можно реализовать зондовые нанотехнологии практически. Отдельное внимание уделяется различным подходам и методикам работы с приборами. Вторая часть курса описывает как уже существующие и работающие зондовые нанотехнологии, так и перспективные идеи, которые будут воплощаться в будущем.

Цель изучения дисциплины – получение базовых знаний об устройствах, принципах функционирования различных видов зондовых микроскопов и расширение общего кругозора, касающегося зондовых нанотехнологий.

Подготовка академических бакалавров в области нанотехнологий в электронике, понимающих физические и технологические аспекты разработки и технологического создания микросхем с предельными размерами менее 22

нм, а также понимающих перспективы их дальнейшего развития технологии нанолитографии с последующим снижением минимальных размеров до 10 нм и 5 нм при разработке новых типов сверхбыстродействующих интегральных схем.

Задачи изучения дисциплины:

- Обучение базовым навыкам работы на атомно-силовом, сканирующем туннельном и магнитно-силовом микроскопах.
- Освоение программного обеспечения по обработке данных, полученных с помощью сканирующих микроскопов
- Умение анализировать полученные экспериментальные данные и представлять их в форме научного отчета
- Изучение современной научной литературы, в которой описаны зондовые нанотехнологии.

Формирование у студентов следующих **знаний** о:

- взаимосвязи разрешения оптической системы, фотошаблонов, процессов плазменного травления разнородных материалов при разработке новых технологических процессов в нанолитографии.
- особенностях технологических процессах при создании объемных полевых транзисторов с минимальным размером канала менее 22 нм при создании новых видов сверхбыстродействующих интегральных микросхем.
- принципах функционирования сканирующих атомно-силовых или туннельных микроскопов
- возможностях применения зондовых микроскопов для создания наноустройств и в нанотехнологиях

Для успешного изучения дисциплины «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии» у обучающихся должны быть сформированы следующие предварительные компетенции:

ОПК-2. Способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат;

ОПК-6. Способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий;

ОПК-9. Способность использовать навыки работы с компьютером, владеть методами информационных технологий, соблюдать основные требования информационной безопасности.

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие общекультурные/ общепрофессиональные/ профессиональные компетенции.

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
ПК-2, способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения	Знает	Принципы оформления научных отчетов, презентаций
	Умеет	Правильно ставить цель научного исследования, строить эксперимент, работать в текстовых и графических редакторах
	Владеет	навыками обобщения, анализа научной информации, постановки цели и выбору путей ее достижения
ПК-9, способность выполнять работы по технологической подготовке производства	Знает	Основы работы с графическими редакторами и программным обеспечением для построения графиков и диаграмм
	Умеет	Обрабатывать экспериментальные данные, полученные с помощью сканирующих зондовых микроскопов

материалов и изделий электронной техники	Владеет	Навыками работы в программах по обработке изображений сканирующей зондовой микроскопии текстовых и графических редакторов
--	---------	---

Для формирования вышеуказанных компетенций в рамках дисциплины «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии» применяется метод активного/ интерактивного обучения:

- дискуссия;
- практические занятия на лабораторном оборудовании.

I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА

Раздел I. Сканирующие зондовые микроскопы (15 часов)

Тема 1. Особенности сканирующих зондовых микроскопов (5 час.)

Введение в курс. История открытия и развития зондовых микроскопов. Классификация зондовых микроскопов. Общие элементы конструкции сканирующих зондовых микроскопов. Программная обработка изображений.

Тема 2. Сканирующий туннельный микроскоп (2 часа)

Приготовление вольфрамовых и платиноиридиевых игл. Теоретическое описание принципов функционирования сканирующего туннельного микроскопа. Конструкционные особенности. Режимы работы. Результаты, получаемые с помощью сканирующего туннельного микроскопа.

Тема 3. Атомно-силовая микроскопия (3 часа).

Теоретическое описание принципов функционирования сканирующего атомно-силового микроскопа. Конструкционные особенности. Контактная, полуконтактная и бесконтактная методики сканирования. Результаты, получаемые с помощью сканирующего атомно-силового микроскопа.

Тема 4. Другие виды зондовых микроскопов (5 час.).

Электросиловая микроскопия. Магнитно-силовая микроскопия. Ближнеполюсная оптическая микроскопия.

Раздел II. Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии (15 часов)

Тема 1. Атомные и кластерные манипуляции (5 час.)

Основные понятия нанотехнологий. История развития нанотехнологий. Атомные манипуляции с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Сканирующая атомно-силовая литография. Локальное анодное окисление. Новые методики сканирования.

Тема 2. Углеродные наноструктуры (3 часа)

Аллотропные формы углерода. Фуллерены. Углеродные нанотрубки. Виды, характеристики и методы получения углеродных нанотрубок. Свойства и применение нанотрубок. Нанотрубки в зондовых нанотехнологиях.

Тема 3. Нанолитография по принципу чернильной ручки (НПЧР) (3 часа)

Основные концепции метода НПЧР. Типы используемых чернил. Литографические возможности. Мультизонды. Способы нанесения наночернил, микроминиатюрные устройства, нагрев зондов. Коммерциализация и перспективы развития технологии НПЧР.

Тема 4. Применение зондовых нанотехнологий в нанобиологии (4 часа)

Объекты изучения нанобиологии. Характеристические размеры. Возможности зондовых нанотехнологий. Результаты применения. Дальнейшие перспективы.

II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (16 ЧАС.)

Занятие 1. Изучение вакуумной техники (1 час).

Изучение базовых элементов вакуумных камер, принципов получения вакуума, загрузки и перемещения образцов.

Занятие 2. Изучение сверхвысоковакуумного комплекса Omicron (1 час)

Изучение базовых элементов сверхвысоковакуумного комплекса Omicron, получение представления о процессах изготовления пленок, перемещения образцов магнитными манипуляторами, функционировании шлюзовой камеры.

Занятие 3. Травление игл для сканирующего туннельного микроскопа (1 час)

Изучение принципов работы установки электрохимического травления, самостоятельное травление вольфрамовых игл, контроль результатов травления на оптическом микроскопе.

Занятие 4. Измерение рельефа поверхности сканирующим туннельным микроскопом. (2 часа)

Изучение базовых принципов работы сканирующего туннельного микроскопа, наблюдение за работой преподавателя. Получение изображений рельефа тонкой металлической пленки на поверхности кремния.

Занятие 5. Изучение поверхностных фаз сканирующим туннельным микроскопом. Атомные манипуляции. (2 часа)

Исследование поверхностной фазы Si(111) 7x7, Si(5.55x5.55-Cu) или др. с помощью сканирующего зондового микроскопа

Занятие 6. Сканирующая туннельная спектроскопия (1 час)

Получение основных знаний о сканирующей зондовой спектроскопии, измерение кривых спектроскопии на разных участках полупроводникового образца с металлической пленкой

Занятие 7. Атомно-силовой микроскоп. Контактный режим работы. (2 часа)
Изучение общих принципов работы на атомно-силовом микроскопе, основных его конструктивных элементов. Наблюдение за работой преподавателя.

Занятие 8. Полуконтактный режим работы атомно-силового микроскопа (2 часа)

Тренировка работы в полуконтактном режиме. Самостоятельное снятие изображений рельефа образцов тонких пленок.

Занятие 9. Магнитно-силовая микроскопия пленок различными режимами (2 часа)

Изучение основных принципов магнитно-силовой микроскопии, изучение влияния различных параметров сканирования, намагниченности кантилевера на результаты сканирования пленок, получение магнитных изображений от поверхности пленки.

Занятие 10. Влияние типа магнитного кантилевера на магнитно-силовую микроскопию наноструктур (1 час)

Самостоятельное исследование магнитных наноструктур, изучение влияния типа кантилевера и его магнитного состояния на полученные результаты

Занятие 11. Атомно-силовая литография (1 час)

Изучение основных принципов и возможностей атомно-силовой литографии, наблюдение за работой преподавателя.

III. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

- план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;
- характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;
- требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;
- критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

IV. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства		
			текущий контроль	промежуточная аттестация	
1	Тема 1. Основы вакуумных систем, общие элементы сканирующих зондовых микроскопов, травление игл	ПК-2 ПК-9	знает	Лабораторная работа 1-3, контрольная работа 1-2	Экзамен, вопросы 1-7, 13
			умеет	Лабораторная работа 1-3, контрольная работа 1-2	Экзамен, вопросы 1-7, 13
			владеет	Лабораторная работа 1-3, контрольная работа 1-2	Экзамен, вопросы 1-7, 13
2	Тема 2. Сканирующая туннельная микроскопия	ПК-2 ПК-9	знает	Лабораторная работа 4-6, контрольная работа 3-4	Экзамен, вопросы 8-11, 13
			умеет	Лабораторная работа 4-6, контрольная работа 3-4	Экзамен, вопросы 8-11, 13
			владеет	Лабораторная работа 4-6, контрольная работа 3-4	Экзамен, вопросы 8-11, 13
3	Тема 3. Атомно-силовая микроскопия	ПК-2 ПК-9	знает	Лабораторная работа 7-8, контрольная работа 5-6	Экзамен, вопросы 12-17

			умеет	Лабораторная работа 7-8, контрольная работа 5-6	Экзамен, вопросы 12-17
			владеет	Лабораторная работа 7-8, контрольная работа 5-6	Экзамен, вопросы 12-17
4	Тема 4. Магнитно-силовая микроскопия	ПК-2 ПК-9	знает	Лабораторная работа 9-10, контрольная работа 7	Экзамен, вопросы 18-21
			умеет	Лабораторная работа 9-10, контрольная работа 7	Экзамен, вопросы 18-21
			владеет	Лабораторная работа 9-10, контрольная работа 7	Экзамен, вопросы 18-21

Вопросы и типы заданий к экзамену, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, представлены в Приложении 2.

КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Контрольная работа №1 (методы травления материалов)

1. Что понимается под плазменным процессом травления?
2. Каковы ограничения во влажных процессах травления?
3. Что такое планарный плазменный реактор и чем он принципиально отличается от цилиндрического реактора?
4. С какой целью в цилиндрическом плазменном реакторе была установлена защитная сетка?
5. Что такое плазмообразующий газ и какие плазмообразующие газы вы можете назвать?
6. На какие параметры плазменного травления влияет рабочее давление в плазменном реакторе?

7. Что такое селективность травления и на какие процессы она оказывает максимальное влияние?
8. Какое влияние оказывает отрицательная зарядка боковых поверхностей при плазменном травлении, и какие способы его минимизации используются в промышленности?
9. Какой принцип используется при построении реакторов при травлении потоком нейтральных частиц? В чем заключается основное преимущество такого типа реакторов по сравнению с плазменными реакторами?
10. Для каких практических целей необходимо плазменное травление структур с высоким отношением высоты линии к ее ширине?

Контрольная работа № 2 (методы литографии для наноразмерных структур)

1. Чем определяются физические ограничения оптической литографии?
2. Перечислите основные источники излучения для построения фотолитографических систем.
3. Обоснуйте на какие параметры литографического процесса влияет метод фазосдвигающих масок в оптической литографии?
4. Тенденции развития литографии с нанометровым разрешением. Обоснуйте выбор длины волны 197 мкм в настоящее время.
5. Почему не произошел запуск литографического процесса с длиной волны 157 мкм?
6. Проекционная электронно-лучевая литография. Каковы сложности в проведении и технологическом освоении данного процесса?
7. Из чего состоит и как работает система SCALPEL?
8. Ионно-лучевая литография: подходы и реализация. Каковы особенности процесса?
9. Литография с экстремальным ультрафиолетом. Каковы перспективы данного метода? В чем основная проблема метода?

10. Пример проведения нанолитографического процесса. Последние достижения в нанолитографии.
11. Что позволяет достичь иммерсионная фотолитография? Можно ли ее расценивать как пример нанолитографии?
12. Каковы основные особенности, преимущества и недостатки рентгеновской фотолитографии?
13. Особенности конструкции ионно-лучевого мультиплексора.
14. Какой вид фотошаблонов используется для электронно-лучевой фотолитографии?

Контрольная работа №3 (резисты для оптической литографии и нанолитографии)

1. Что такое фоторезист? Чем отличаются положительные и отрицательные фоторезисты?
2. Как изменяется чувствительность и защитная функция органических фоторезистов при уменьшении длины волны падающего на фоторезист излучения?
3. Многослойные резисты в оптической литографии. Что позволяет достичь двухслойный фоторезист с антиотражающим покрытием?
4. Зачем используются в фотолитографии двухслойные фоторезисты с различной полярностью?
5. Особенности обработки фоторезистов для различных длин волн облучения.
6. Резисты для «сухой» нанолитографии. Аморфный оксид ванадия как резист для нанолитографии.
7. Характеристики оксидно-ванадиевого резиста. Получение оксидно-ванадиевого резиста. Экспонирование и проявление оксидно-ванадиевого резиста.

Контрольная работа № 4 (методы зондовой нанолитографии)

1. Принцип работы сканирующего зондового микроскопа. Какие из объектов могут быть исследованы на воздухе?
2. Сверхвысоковакуумная сканирующая туннельная микроскопия. Какие процессы могут быть простимулированы на атомарно-чистой поверхности полупроводников?
3. Каким образом можно создавать нанометровый рельеф методом СТМ?
4. Принцип действия атомного силового микроскопа. Его достоинства и недостатки по сравнению с СТМ.
5. Каковы методы стабилизации зонда в методах АСМ и СТМ? Оцените основные особенности и недостатки.
6. Основные особенности реализации технологии нанолитографии глубокого пера. Каковы достоинства и недостатки?
7. В чем особенности метода термонанолитографии? Как она реализована на практике? Минимально достижимое разрешение и производительность работ.
8. Как реализован метод сворачивания нанотрубок для гетероструктур? Что такое жертвенный слой? На что влияет толщина слоев в гетероструктуре с жертвенным слоем?
9. Как можно получить нанокольца и нанотрубки в методе самосворачивания гетероструктурных слоев?
10. Как можно создать периодичные квантовые твердотельные наноструктуры методом самосворачивания? От чего зависит период таких наноструктур?
11. Опишите последовательность в достижении минимальных размеров, полученных методами фотолитографии и нанолитографии.
12. Как повлияла технология напряженного кремния на достижение минимальных размеров в интегральных схемах?

13. Какова роль подзатворного диэлектрика в минимизации размеров интегральных схем?

Контрольная работа № 5 (сканирующая туннельная микроскопия)

1. Как зависит туннельный ток от приложенного напряжения между металлическим зондом и полупроводниковым образцом?
2. Как зависит туннельный ток от приложенного напряжения между металлическим зондом и металлическим образцом?
3. Какова зависимость туннельного тока от расстояния между зондом и образцом?
4. Как с помощью СТМ можно измерить рельеф поверхности?
5. Какие методики сканирования СТМ вам известны?
6. Чем определяется латеральное разрешение изображений, полученных с помощью СТМ?
7. Какую информацию можно получить, используя метод сканирующей туннельной спектроскопии?
8. Какую информацию можно получить, используя спин-поляризованный СТМ?

Контрольная работа № 6 (атомно-силовая микроскопия)

1. По какому закону изменяются силы взаимодействия между зондом и поверхностью образца в случае Ван-дер-Ваальсовского взаимодействия?
2. Как с помощью АСМ можно измерить твердость поверхности?
3. Какие методики сканирования применяются при работе с АСМ?
4. Какие режимы работы применяются при работе с АСМ?
5. Как резонансная частота кантилевера зависит от длины балки?
6. Как резонансная частота кантилевера зависит от толщины балки?
7. Какую информацию дает амплитудное и фазовое изображение исследуемой поверхности?
8. Какие преимущества дает гибридный режим сканирования в микроскопах фирмы NT-MDT?

Контрольная работа № 7 (магнитно-силовая микроскопия)

1. Какими характеристиками могут отличаться магнитные зонды и почему?
2. Как толщина магнитного покрытия зонда влияет на магнитный контраст?
3. В каких режимах можно работать на МСМ?
4. Какой контраст будет зарегистрирован при исследовании лабиринтной магнитной структуры поверхности жесткого диска с перпендикулярной магнитной анизотропией?
5. Назовите способы, с помощью которых можно однозначно определить, что у зонда двойной конец?
6. Почему важно учитывать магнитные характеристики используемого магнитного зонда, его коэрцитивность и магнитный момент?
7. Из каких материалов сделаны магнитные зонды?
8. При каких размерах исследуемых объектов зондовую микроскопию целесообразно заменить на другой метод измерения магнитной структуры и почему?

V. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература

(электронные и печатные издания)

1. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. М. Техносфера, 2014. – 174 с. <http://www.iprbookshop.ru/26894.html>
2. Агеев О.А., Федотов А.А., Смирнов В.А. Методы формирования структур элементов нанoeлектроники и наносистемной техники: Учебное пособие. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. - 72 с. <http://window.edu.ru/resource/948/73948>
3. Старостин В.В. Материалы и методы нанотехнологии: Учебное пособие / Под общ. редакцией Л.Н. Патрикеева. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. - 432 с.: ил. <http://www.iprbookshop.ru/4589.html>

4. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2009. - 416 с. <http://www.iprbookshop.ru/12979.html>

Дополнительная литература

1. Головин Ю.И. Основы нанотехнологий – Изд. "Машиностроение", 2012. - 656 с. <http://www.iprbookshop.ru/18532.html>
2. Юраков Ю.А. Получение тонких пленок сложного состава методом испарения и конденсации в вакууме: Учебно-методическое пособие для вузов. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. - 18 с. <http://window.edu.ru/resource/535/65535>
3. Старостин В.В. Материалы и методы нанотехнологии: Учебное пособие / Под общ. редакцией Л.Н. Патрикеева. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. - 431 с.: <http://window.edu.ru/resource/622/64622>

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1. Нанотехнологии в России <http://www.nanonewsnet.ru>
2. «Нанотехнология», «нанонаука» и «нанообъекты»: что значит «нано»? http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431265/Nanotekhnologiya_nanonauka_i_nanoobekty_chno_znachit_nano
3. Российский электронный наножурнал <http://www.nanorf.ru>

Перечень информационных технологий и программного обеспечения

При осуществлении образовательного процесса по дисциплине используется общее программное обеспечение компьютерных учебных классов (Windows XP, Microsoft Office и др.), а также специализированное свободно

распространяемое программное обеспечение по обработке экспериментальных данных Gwyddion.

VI. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

В общей трудоемкости дисциплины 108 час. (3 ЗЕТ) лекционные занятия составляют 30 час., лабораторные работы 16 час.

По дисциплине предусмотрена внеаудиторная самостоятельная работа в объеме 26 час. на весь курс дисциплины.

Для базового изучения курса необходимо посещать лекции, практические занятия, выполнять контрольные отчеты, работы и работать с основной литературой по дисциплине.

Для углубленного изучения теоретического материала курса дисциплины помимо вышеперечисленных рекомендаций необходимо использовать дополнительную литературу, указанную в приведенном выше перечне.

Рекомендованные источники доступны обучаемым в научной библиотеке (НБ) ДВФУ (в перечне приведены соответствующие гиперссылки этих источников), а также в электронной библиотечной системе (ЭБС) IPRbooks (приведены аналогичные гиперссылки).

Доступ к системе ЭБС IPRbooks осуществляется на сайте www.iprbookshop.ru под учётными данными вуза (ДВФУ):

логин **dvfu**, пароль **249JWmhe**.

Для подготовки к зачету определен перечень вопросов, представленный ниже, в материалах фонда оценочных средств дисциплины.

VII. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Образовательный процесс по дисциплине проводится в лаборатории пленочных технологий, расположенной в корпусе ДВФУ на ул. Суханова 8. Лаборатория оснащена современными компьютерами и мультимедийными

(презентационными) системами, с подключением к общекорпоративной компьютерной сети ДВФУ и сети Интернет. В лаборатории есть сканирующий туннельный, атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопы.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДФУ)

ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ
РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

**по дисциплине «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы
нанолиитографии»**

Направление подготовки 01.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Форма подготовки очная

Владивосток

2018

План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине

№ п/п	Дата/сроки выполнения	Вид самостоятельной работы	Примерные нормы времени на выполнение	Форма контроля
1	1 неделя семестра	Подготовка отчета по лабораторной работе 3	2 час.	Защита отчета
2	2-3 недели семестра	Подготовка отчета по лабораторной работе 4	2 час.	Защита отчета
3	4-5 недели семестра	Подготовка отчета по лабораторной работе 5	4 час.	Защита отчета
4	6-7 недели семестра	Подготовка отчета по лабораторной работе 6	4 час.	Защита отчета
5	8-9 недели семестра	Подготовка отчета по лабораторной работе 7	3 час.	Защита отчета
6	10 неделя семестра	Подготовка отчета по лабораторной работе 9	3 час.	Защита отчета
7	11-12 недели семестра	Подготовка отчета по лабораторной работе 10	2 час.	Защита отчета
8	13-14 недели семестра	Подготовка отчета по лабораторной работе 11	3 час.	Защита отчета
9	15-16 недели семестра	Подготовка оставшихся отчетов, задолженностей	3 час.	Защита отчета
Итого			26 час.	

Темы дисциплины

Для удобства проверки отчетов лабораторные работы объединены в четыре общие темы:

Тема 1. Основы вакуумных систем, травление игл

Тема 2. Сканирующая туннельная микроскопия

Тема 3. Атомно-силовая микроскопия

Тема 4. Магнитно-силовая микроскопия

Характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению

Задания и методические рекомендации для самостоятельной работы обеспечивают подготовку отчетов к лабораторным работам. Их полное содержание приведено в программе и методических указаниях.

Требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы

Результаты самостоятельной работы отражаются в письменных работах (отчетах по лабораторным работам).

К представлению и оформлению отчетов по лабораторным работам предъявляются следующие требования.

Структура отчета по лабораторной работе

Отчеты по лабораторным работам представляются в электронной форме, подготовленные как текстовые документы в редакторе MS Word.

Отчет по работе должен быть обобщающим документом, включать всю информацию по выполнению заданий, в том числе, построенные диаграммы, таблицы, приложения, список литературы и (или) расчеты, сопровождая необходимыми пояснениями и иллюстрациями в виде схем, экранных форм («скриншотов») и т. д.

Структурно отчет по лабораторной работе, как текстовый документ, комплектуется по следующей схеме:

✓ *Титульный лист* – обязательная компонента отчета, первая страница отчета, по принятой для лабораторных работ форме (титульный лист отчета должен размещаться в общем файле, где представлен текст отчета);

✓ *Исходные данные к выполнению заданий* – обязательная компонента отчета, с новой страницы, содержат указание варианта, темы и т.д.);

✓ *Основная часть* – материалы выполнения заданий, разбивается по рубрикам, соответствующих заданиям работы, с иерархической структурой: разделы – подразделы – пункты – подпункты и т. д.

Рекомендуется в основной части отчета заголовки рубрик (подрубрик) давать исходя из формулировок заданий, в форме отглагольных существительных;

✓ *Выводы* – обязательная компонента отчета, содержит обобщающие выводы по работе (какие задачи решены, оценка результатов, что освоено при выполнении работы);

✓ *Список литературы* – обязательная компонента отчета, с новой страницы, содержит список источников, использованных при выполнении работы, включая электронные источники (список нумерованный, в соответствии с правилами описания библиографии);

✓ *Приложения* – необязательная компонента отчета, с новой страницы, содержит дополнительные материалы к основной части отчета.

Оформление отчета по лабораторной работе

Лабораторная работа относится к категории «*письменная работа*», оформляется *по правилам оформления письменных работ студентами ДВФУ*.

Необходимо обратить внимание на следующие аспекты в оформлении отчетов работ:

- набор текста;
- структурирование работы;
- оформление заголовков всех видов (рубрик-подрубрик-пунктов-подпунктов, рисунков, таблиц, приложений);
- оформление перечислений (списков с нумерацией или маркировкой);
- оформление таблиц;
- оформление иллюстраций (графики, рисунки, фотографии, схемы, «скриншоты»);
- набор и оформление математических выражений (формул);
- оформление списков литературы (библиографических описаний) и ссылок на источники, цитирования.

Набор текста

Набор текста осуществляется на компьютере, в соответствии со следующими требованиями:

✓ печать – на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (размер 210 на 297 мм.);

✓ интервал межстрочный – полуторный;

✓ шрифт – Times New Roman;

✓ размер шрифта - 14 пт., в том числе в заголовках (в таблицах допускается 10-12 пт.);

✓ выравнивание текста – «по ширине»;

✓ поля страницы - левое – 25-30 мм., правое – 10 мм., верхнее и нижнее – 20 мм.;

✓ нумерация страниц – в правом нижнем углу страницы (для страниц с книжной ориентацией), сквозная, от титульного листа до последней страницы, арабскими цифрами (первой страницей считается титульный лист, на котором номер не ставится, на следующей странице проставляется цифра «2» и т. д.).

✓ режим автоматического переноса слов, за исключением титульного листа и заголовков всех уровней (перенос слов для отдельного абзаца блокируется средствами MSWord с помощью команды «Формат» – абзац при выборе опции «запретить автоматический перенос слов»).

Если рисунок или таблица размещены на листе формата больше А4, их следует учитывать, как одну страницу. Номер страницы в этих случаях допускается не проставлять.

Список литературы и все *приложения* включаются в общую в сквозную нумерацию страниц работы.

Рекомендации по оформлению графического материала

Графические материалы – сканы рельефа поверхности или изображения магнитного контраста должны быть экспортированы из программного обеспечения Gwiddion в виде файла с расширением *.tif с разрешением не менее 512 пк x 512 пк и вставлены в отчет. При необходимости изображения нужно расширить, чтобы преподаватель имел возможность увидеть детали скана.

Рекомендации по оформлению графиков

Графики должны быть построены в программном пакете Excel или Origin. Оси графиков должны быть подписаны. Если в графике присутствуют несколько кривых, на графике необходимо привести легенду (отличительное описание каждой кривой). Все цифры на графике должны быть различимы.

Критерии оценки выполнения самостоятельной работы

Оценивание лабораторных работ проводится по критериям:

- полнота выполненных заданий;
- качество полученных научных результатов;
- качество обработки графических результатов;
- качество оформления отчета, использование правил и стандартов оформления текстовых и электронных документов;
- правильно сделанные выводы
- использование данных отечественной и зарубежной литературы, источников Интернет, информации нормативно-правового характера и передовой практики;
- отсутствие фактических ошибок, связанных с пониманием проблемы.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДФУ)

ШКОЛА ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
по дисциплине «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы
нанолиитографии»
Направление подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника
Форма подготовки очная

Владивосток
2018

Паспорт ФОС

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции	
ПК-2, способностью аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения	Знает	Принципы оформления научных отчетов, презентаций
	Умеет	Правильно ставить цель научного исследования, строить эксперимент, работать в текстовых и графических редакторах
	Владеет	навыками обобщения, анализа научной информации, постановки цели и выбору путей ее достижения
ПК-9, способностью выполнять работы по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники	Знает	Основы работы с графическими редакторами и программным обеспечением для построения графиков и диаграмм
	Умеет	Обрабатывать экспериментальные данные, полученные с помощью сканирующих зондовых микроскопов
	Владеет	Навыками работы в программах по обработке изображений сканирующей зондовой микроскопии текстовых и графических редакторов

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства		
			текущий контроль	промежуточная аттестация	
1	Тема 1. Основы вакуумных систем, общие элементы сканирующих зондовых микроскопов, травление игл	ПК-2 ПК-9	знает	Лабораторная работа 1-3, контрольная работа 1	Экзамен, вопросы 1-7, 13
			умеет	Лабораторная работа 1-3, контрольная работа 1	Экзамен, вопросы 1-7, 13
			владеет	Лабораторная работа 1-3, контрольная работа 1	Экзамен, вопросы 1-7, 13

2	Тема 2. Сканирующая туннельная микроскопия	ПК-2 ПК-9	знает	Лабораторная работа 4-6, контрольная работа 2	Экзамен, вопросы 8-11, 13
			умеет	Лабораторная работа 4-6, контрольная работа 2	Экзамен, вопросы 8-11, 13
			владеет	Лабораторная работа 4-6, контрольная работа 2	Экзамен, вопросы 8-11, 13
3	Тема 3. Атомно-силовая микроскопия	ПК-2 ПК-9	знает	Лабораторная работа 7-8, контрольная работа 3	Экзамен, вопросы 12-17
			умеет	Лабораторная работа 7-8, контрольная работа 3	Экзамен, вопросы 12-17
			владеет	Лабораторная работа 7-8, контрольная работа 3	Экзамен, вопросы 12-17
4	Тема 4. Магнитно-силовая микроскопия	ПК-2 ПК-9	знает	Лабораторная работа 9-10, контрольная работа 4	Экзамен, вопросы 18-21
			умеет	Лабораторная работа 9-10, контрольная работа 4	Экзамен, вопросы 18-21
			владеет	Лабораторная работа 9-10, контрольная работа 4	Экзамен, вопросы 18-21

Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		критерии	показатели	баллы
ПК-2, способностью аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и	Знает	Принципы оформления научных отчетов, презентаций	воспроизводить и объяснять учебный материал с требуемой степенью научной точности и полноты	Умение работать в программных пакетах MS Office, представить полученные материалы в виде отчета, сделать соответствующие выводы	60 - 74
	Умеет	Правильно ставить цель научного исследования, строить эксперимент, работать в текстовых и графических редакторах	выполнять типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения	Способность применить теоретические знания при написании отчета, составлять отчет с использованием нескольких программных пакетов для обработки научных результатов	75 - 89
	Владеет	навыками обобщения,	решать усложненные	Способность выделить самые важные научные результаты,	90 - 100

наноэлектроники различного функционального назначения		анализа научной информации, постановки цели и выбору путей ее достижения	задачи в нетипичных ситуациях на основе приобретенных знаний, умений и навыков	представить их по всем требованиям в отчете, но с использованием продвинутых программных пакетов для обработки изображений и построения графиков, использовать мультимедийные редакторы и аниматоры	
ПК-9, способностью выполнять работы по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники	Знает	Основы работы с графическими редакторами и программным обеспечением для построения графиков и диаграмм	воспроизводить и объяснять учебный материал с требуемой степенью точности и полноты	Способность показать базовые знания и основные умения в использовании программного обеспечения Matrix, NtMdt, Gwiddion. Необходимо получить изображения рельефа или магнитного контраста, проанализировать их и вставить в отчет	60 - 74
	Умеет	Обрабатывать экспериментальные данные, полученные с помощью сканирующих зондовых микроскопов	выполнять типичные задачи на основе воспроизведения стандартных алгоритмов решения	Способность показать продвинутое знания и умения в использовании программного обеспечения Matrix, NtMdt, Gwiddion. Использование дополнительных методов фильтрации, повышающих качество изображений.	75 - 89
	Владеет	Навыками работы в программах по обработке изображений сканирующей зондовой микроскопии текстовых и графических редакторов	решать усложненные задачи в нетипичных ситуациях на основе приобретенных знаний, умений и навыков	Способность применить сложные математические модели для оценки параметров полученных изображений. Детальная обработка изображений, использование профилей, фурье преобразований. Умение представить изображения в единой цветовой шкале.	90 - 100

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков

Текущая аттестация студентов. Текущая аттестация студентов по дисциплине «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии» проводится в форме контрольных мероприятий (защита лабораторных работ) по оцениванию фактических результатов обучения студентов осуществляется ведущим преподавателем.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина (активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость всех видов занятий по аттестуемой дисциплине);
- уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы;
- результаты самостоятельной работы.

Оценивание результатов освоения дисциплины на этапе текущей аттестации проводится в соответствии с используемыми оценочными средствами и критериями.

Критерии оценки отчетов по лабораторным работам

Оценивание защиты лабораторной работы проводится при представлении отчета в электронном виде, по двухбалльной шкале: «зачтено», «не зачтено».

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если он представляет к защите отчет по лабораторной работе, удовлетворяющий требованиям по поставленным заданиям, по оформлению, демонстрирует владение методами и приемами теоретических и/или практических аспектов работы.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, если он не владеет методами и приемами теоретических и/или практических аспектов работы, допускает существенные ошибки в работе, представляет отчет с существенными отклонениями от правил оформления письменных работ.

Промежуточная аттестация студентов. Промежуточная аттестация студентов по дисциплине «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии» проводится в виде экзамена, форма экзамена - «устный опрос в форме ответов на вопросы», «практические задания по типам». Допуск к экзамену возможен только после защиты 80% отчетов по лабораторным работам курса.

Критерии выставления оценки студенту на экзамене по дисциплине «Зондовые нанотехнологии в электронике. Основы нанолитографии»:

Баллы (рейтинговой оценки)	Оценка зачета (стандартная)	Требования к сформированным компетенциям
86 -100	«отлично»	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он полно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач. Сданы все отчеты по лабораторным работам. Зачтены 70% семинарских занятий.
76 - 85	«хорошо»	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения. Сданы все отчеты по лабораторным работам. Зачтены 50% семинарских занятий.
61 -75	«удовлетворительно»	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ. Сданы 80% отчетов по лабораторным работам. Зачтены 70% семинарских занятий.
0 -60	«не удовлетворительно»	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы. Как правило, оценка «неудовлетворительно»

		«неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине. Сдано меньше 80% отчетов по лабораторным работам или зачтено менее 70% семинаров.
--	--	--

Оценочные средства для промежуточной аттестации

Вопросы к экзамену

1. Понятия «наносистема», «нанотехнологии», «наноматериалы». История развития зондовых микроскопов.
2. Общие принципы работы сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ).
3. Сканирующие элементы зондовых микроскопов. Нелинейность, крип и гистерезис пьезокерамики.
4. Устройства для прецизионных перемещений зонда и образца.
5. Защита зондовых микроскопов от внешних воздействий. Стабилизация термодрейфа.
6. Формирование СЗМ изображений. Вычитание плоскости. Построчное вычитание.
7. Медианная фильтрация. Фурье-фильтрация. Методы восстановления поверхности по ее СЗМ изображению.
8. Физические основы сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Режимы работы СТМ.
9. Измерение локальной работы выхода в СТМ. Измерение вольт-амперной характеристики (ВАХ) контакта.
10. Система управления СТМ. Конструкции СТМ.
11. Туннельная спектроскопия. ВАХ металл-металл, металл-полупроводник, металл-сверхпроводник.
12. Принципы атомно-силовой микроскопии (АСМ).
13. Зонды СТМ и АСМ. Приготовление зондов.

14. Контактная АСМ. Зависимость силы взаимодействия между зондом и образцом от расстояния между ними. Система управления АСМ в контактном режиме.
15. Колебательные методики АСМ. Общие принципы.
16. Бесконтактный режим работы АСМ.
17. Полуконтактный режим работы АСМ.
18. Электросиловая микроскопия.
19. Магнитно-силовая микроскопия (МСМ). Квазистатические методики.
20. Колебательные методики МСМ. Система управления АСМ, МСМ (колебательные методики).
21. Ближнепольная оптическая микроскопия.
22. СТМ литография.
23. Локальное анодное окисление.
24. АСМ литография.
25. Аллотропные формы углерода (карбин, графит, углерод).
26. Фуллерены и нанотрубки. Виды углеродных нанотрубок.
27. Получение углеродных нанотрубок.
28. Свойства и применение углеродных нанотрубок.
29. Основные принципы Dip-реп нанолитографии (литографии по принципу чернильной ручки).
30. Нанесение чернил на зонд и образец в Dip-реп нанолитографии.

Оценочные средства для текущей аттестации

Типовые задания к лабораторным работам

Занятие 1. Изучение вакуумной техники (4 часа).

Целью данного занятия является изучение базовых принципов вакуумной техники и осаждение тестовой пленки с помощью термического осаждения с вольфрамовой спирали.

В качестве вакуумной установки используется вакуумный пост 5 (ВУП-5).

Студенты знакомятся с устройством

1. Системы откачки ВУП-5, которая представлена роторным предвакуумным и диффузионным высоковакуумным насосами.
2. Системы измерения давления, которая состоит из термодатчика и ионной лампы и блока питания / измерения ВИТ-2.
3. Системы нагрева спирали, которая состоит из понижающего трансформатора, латтера и тоководов.

В качестве напыления тестового образца предполагается сформировать тонкую пленку золота на поверхности естественно оксидированного Si(111). Для этого в камеру студенты загружают определенное количество хрома и золота, отмеренное с помощью аналитических весов, и кремневую подложку. Студенты учатся резать образцы кремния заданных размеров из кремниевых пластин. Кремневая подложка перед загрузкой в камеру очищается путем полоскания в ацетоне, изопропиловом спирте и воде.

Путем последовательной откачки сначала предвакуумным насосом, а затем диффузионным насосом в камере достигается давление $10^{-4} - 10^{-5}$ Торр. На подложку сначала напыляется хром, а затем золото. После в камеру напускается воздух. Полученная пленка проверяется на достаточную адгезию к подложке. Она не должна отшелушиваться и отскребаться при легком воздействии пластиковым пинцетом.

Занятие 2. Изучение сверхвысоковакуумного комплекса Omicron (4 часа).

Целью данного занятия является изучение оборудования сверхвысоковакуумного комплекса Omicron.

Студенты знакомятся с устройством

1. Системы откачки комплекса Omicron. Они рассматривают четыре вида вакуумных насосов: масляный, турбомолекулярный, ионный и сублимационный.
2. Вентилей и заслонок. Рассматриваются пневматические и ручные вентили, магнитные заслонки.
3. Манипуляторов. Изучаются горизонтальные и вертикальные, криогенные и некриогенные, с двумя или с тремя степенями свободы манипуляторы.
4. Эффузионных ячеек и электронно-лучевых испарителей.

В качестве тестового образца предлагается сформировать эпитаксиальную пленку Cu(14 МС)/Co(50 МС)/Cu(10 МС) на поверхности Si(111). Студенты знакомятся с устройством держателя образца фирмы Omicron и загружают образец в камеру через шлюзовый отсек. Далее процесс напыления контролирует преподаватель, поясняя свои действия студентам и предлагая студентам помочь ему в перемещении образца по камере, настройке источников напряжения для эффузионных ячеек, отжиге образца косвенным и прямым прогревом, открывании и закрывании заслонок и вентиляей и т.д.

Занятие 3. Травление игл для сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) (4 часа)

Целью данной работы является изучение процесса травления вольфрамовых игл для СТМ, приготовление нескольких образцов игл и их загрузка в вакуумную камеру.

Студенты знакомятся с установкой для травления игл фирмы Omicron. Установка позволяет травить иглы путем пропускания тока через вольфрамовую проволоку, находящуюся в растворе щелочи. Студенты варьируют

различные параметры: напряжение травления, ток обрыва, концентрацию раствора, форму мениска - для получения оптимальной формы острия иглы.

Получившиеся в результате травления иглы анализируются с помощью оптического микроскопа и лучшие образцы студенты загружают в вакуумную камеру. Для этого они предварительно знакомятся с устройством держателя для игл фирмы Omicron.

Занятие 4. Измерение рельефа поверхности СТМ. (4 часа)

Целью данной работы является изучение устройства сканирующего туннельного микроскопа фирмы Omicron и получение пробных изображений рельефа поверхности тестовой пленки в сверхвысоком вакууме.

Преподаватель показывает студентам основные элементы конструкции СТМ: пьезосканер, систему виброгашения, систему охлаждения/нагрева, гибкий СТМ-манипулятор (wobble-stick). Также студентам демонстрируются управляющие блоки СТМ, джойстик подвода и перемещения сканера, программное обеспечение Matrix.

После знакомства с прибором преподаватель вместе со студентами осуществляют процедуры замены иглы в микроскопе (она производится с помощью пьезосканера и гибкого СТМ-манипулятора) и установки тестового образца.

Далее осуществляется процесс грубого ручного подвода иглы к поверхности образца. Для этого необходимо настроить оптическую систему, чтобы видеть на экране монитора увеличенное изображение иглы и образца. После грубого подвода запускается автоматическая процедура точного подвода, которая при надобности контролируется вручную.

После успешного подвода иглы преподаватель объясняет основные элементы программного обеспечения Matrix и запускает процесс сканирования. В процессе сканирования студентам демонстрируются влияние величины

напряжения, туннельного тока, режима фильтрации, скорости сканирования на качество изображения рельефа поверхности. Студентам показывают возможность кратковременного приложения импульса напряжения в процессе сканирования и возможные последствия данной процедуры.

После освоения программы студенты получают несколько стабильных изображений рельефа поверхности образца с разным масштабом и с различных областей образца.

Занятие 5. Изучение поверхностных фаз сканирующим туннельным микроскопом. Атомные манипуляции.

Целью данной работы является формирование поверхностной фазы на поверхности кремния и осуществление атомных манипуляций путем приложения кратковременных импульсов напряжения.

Студенты загружают в вакуумную камеру подложку кремния ориентации (111), отжигают ее прямым током для получения чистой поверхности кремния. Затем они переносят подложку в СТМ, осуществляют процесс подвода иглы к поверхности образца.

Преподаватель демонстрирует реконструкцию Si(111)-7×7 на поверхности подложки. Путем приложения импульсов напряжения преподаватель показывает возможность удаления адатома кремния из решетки Si(111).

Затем образец перемещают в камеру осаждения и на поверхности Si(111) формируют поверхностная фаза $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -In или 5.55 × 5.55-Cu. Образец перемещают в СТМ камеру и получают изображение поверхностной фазы на Si(111). Путем приложения импульсов напряжения показывается возможность контролируемых перемещений или удалений групп атомов с заданных позиций.

Занятие 6. Сканирующая туннельная спектроскопия (4 часа)

Целью данной работы является снятие и сравнительный анализ вольт-амперных характеристик от полупроводниковой и металлической поверхностей.

Студенты загружают в вакуумную камеру подложку кремния ориентации (111), отжигают ее прямым током для получения чистой поверхности кремния. Затем они переносят подложку в СТМ, осуществляют процесс подвода иглы к поверхности образца.

Преподаватель запускает эксперимент СТМ спектроскопии и проводит серию измерений вольт-амперных характеристик поверхности Si(111). Затем студенты перемещают образец в камеру осаждения и формируют металлический эпитаксиальный слой меди толщиной 10 монослоев на поверхности кремния. Образец переносят в камеру СТМ и студенты под контролем преподавателя снимают вольт-амперные характеристики металлической пленки. Все полученные с помощью СТМ данные студенты обрабатывают в свободно распространяемом программном пакете Gwyddion и пишут отчет о наблюдениях. Форма отчета в главе «контрольно-измерительные материалы».

Занятие 7. Атомно-силовой микроскоп. Контактный режим работы. (4 часа)

Целью данной работы является ознакомление студентов общими принципами атомно-силовых микроскопов и измерение рельефа поверхности в контактном режиме сканирования.

Студенты знакомятся с устройством атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47 фирмы NT-MDT. Они изучают систему виброизоляции, от качки, юстировки положения лазера и фотодетектора, юстировки наклона измерительной головки. Преподаватель рассказывает о видах АСМ кантилверов, показывает, как они устанавливаются в измерительную головку, устанавливает контактный кантилвер в измерительную головку, а образец - на столик грубого подвода.

Далее преподаватель настраивает положение лазера фотодетектора относительно кантилевера, регулирует величину обратной связи и выполняет процесс подвода кантилевера. В качестве образца может выступать какая-либо произвольная тонкая пленка, сформированная на поверхности Si(111). После успешного подвода преподаватель измеряет кривые взаимодействия зонда и образца в некоторых точках пленки. Затем осуществляется сканирование рельефа пленки с областями сканирования $2\text{ мкм} \times 2\text{ мкм}$, $5\text{ мкм} \times 5\text{ мкм}$, $10\text{ мкм} \times 10\text{ мкм}$ и $20\text{ мкм} \times 20\text{ мкм}$.

Преподаватель демонстрирует влияние различных параметров на результаты сканирования, например, влияние частоты сканирования, силы прижима, величины обратной связи.

Занятие 8. Полуконтактный режим работы атомно-силового микроскопа (4 часа)

Целью данной работы является изучение полуконтактного режима работы АСМ и измерение рельефа наноструктурного образца в полуконтактном режиме сканирования.

В полуконтактном режиме работы АСМ необходимо настроить резонансную частоту колебаний кантилевера перед подводом его к поверхности образца. Преподаватель проводит настройку резонансной частоты и подводит зонд к поверхности пленки. В качестве тестового образца могут выступать наноструктуры (наноточки или нанополоски). Преподаватель демонстрирует влияние величины обратной связи, силы взаимодействия зонда с образцом, скорости сканирования на результат сканирования. Студенты снимают амплитудный и фазовый контраст с областей сканирования размером $2\text{ мкм} \times 2\text{ мкм}$, $5\text{ мкм} \times 5\text{ мкм}$, $10\text{ мкм} \times 10\text{ мкм}$ и $20\text{ мкм} \times 20\text{ мкм}$.

Все полученные с помощью АСМ данные студенты обрабатывают в программном пакете Nova и пишут отчет о наблюдениях. Форма отчета в главе

«контрольно-измерительные материалы».

Занятие 9. Магнитно-силовая микроскопия пленок различными режимами (4 часа)

Целью данной работы является изучение особенностей магнитно-силовой микроскопии и получение изображений магнитного фазового контраста пленок по одно- и двухпроходной методикам сканирования.

В качестве тестового образца берется магнитная пленка с плоскостной одноосной или перпендикулярной магнитной анизотропией. В зависимости от ориентации оси легкого намагничивания пленки устанавливается определенный тип магнита. Для пленки с намагниченностью в плоскости устанавливается дипольный плоскостной магнит. Для пленки с перпендикулярной магнитной анизотропией устанавливается магнит, дающий магнитное поле перпендикулярно плоскости пленки. Преподаватель устанавливает магнитный кантилевер, предварительно намагниченный в поле 5 кЭ, и подводит его к поверхности образца.

Сначала изучается двухпроходная методика сканирования. Она не требует специальной подготовки лабораторной установки. В опциях выбирается данный тип методики, преподаватель устанавливает высоту второго прохода. На первом проходе снимается рельеф поверхности, на втором проходе – магнитный контраст. Для получения состояния пленки с доменными границами возможно потребуется приложение внешнего магнитного поля нужной величины.

Затем преподаватель отводит кантилевер, выравнивает плоскость сканирования с плоскостью образца микрометрическими винтами и подводится снова. Обратная связь отключается и кантилевер сканирует на некоторой высоте над поверхностью образца, причем эту высоту необходимо подобрать.

Полученные различными способами изображения пленки с доменными

границами обрабатываются и анализируются студентами.

Занятие 10. Влияние типа магнитного кантилевера на магнитно-силовую микроскопию наноструктур (4 часа)

Целью данной работы является установление влияния магнитного кантилевера на измеряемую магнитную структуру образцов и изучение поведения наноструктур во внешнем магнитном поле.

Преподаватель подготавливает несколько типов кантилеверов: с низким магнитным моментом и с высоким магнитным моментом (оба низкокоэрцитивны) и с высоким магнитным моментом и высокой коэрцитивностью. В качестве образца выступают магнитные наноструктуры (наноточки или нанополоски).

Преподаватель устанавливает один из типов кантилеверов, подводит его к поверхности образца и пытается получить доменную структуру. В случае использования кантилевера с высоким магнитным моментом возможен «срыв» намагниченности в образце из-за сильного магнитного взаимодействия между зондом и образцом. В случае использования кантилевера со слабым магнитным моментом магнитный контраст может быть чрезмерно малым. Если кантилевер имеет низкую коэрцитивную силу, то сильное магнитное поле может переключить намагниченность в кантилевере. Тогда магнитный контраст инвертируется. Все вышперечисленные и другие особенности, возникающие вследствие выбора кантилевера с определенными физическими свойствами, преподаватель должен объяснить студентам. Преподаватель чередует три типа зондов и показывает наглядно влияние типа зонда на работу МСМ. В процессе работы преподаватель снимает магнитную структуру нанобъектов в различных магнитных полях и объясняет ее. Студенты должны подготовить отчет со всеми измеренными изображениями магнитного фазового контраста исследуемых нанобъектов.

Занятие 11. Атомно-силовая литография (4 часа)

Целью данной работы является демонстрация возможностей АСМ в режиме литографии.

Преподаватель подготавливает специальную мягкую тонкую пленку. В качестве образца может выступать слой фоторезиста на поверхности кремниевой подложки или полиэтиленовая пленка. АСМ литография проводится в контактном режиме кантилевером с жесткостью 2 – 5 Н/м. АСМ литография может производиться в растровом и векторном режимах. Для растрового режима необходимо подготовить контрастный черно-белый шаблон с некоторым простым изображением в графическом формате. Для работы в векторном режиме приготовление шаблона не требуется, вектора задаются непосредственно в программе управления АСМ.

Преподаватель подводит кантилевер к поверхности образца и выполняет литографические операции в двух режимах: растровом и векторном. Затем снимаются АСМ изображения полученных наношаблонов. Студенты обрабатывают данные и включают их в отчет.