

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет
Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол № 6 от «31» мая 2023 г.

Рабочая программа дисциплины

Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия

Уровень высшего образования
бакалавриат

Направление подготовки: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль): твердотельная электроника и нанoeлектроника

Форма обучения: очная

Нижегород, 2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия» относится к обязательным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника».

«Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия» - естественнонаучная дисциплина, представляющая собой раздел физики, в котором углубленно изучается метод просвечивающей электронной микроскопии, способный предоставить информацию о структуре и составе наноструктурированных объектов с ангстремным пространственным разрешением. Для освоения данного курса необходимо изучить такие модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра как «Физика», «Физика конденсированного состояния», «Электродинамика» и «Математика» обязательной части цикла математических и естественно-научных дисциплин, «Химия» и «Кристаллография» обязательной части, формируемой участниками образовательных отношений, и иметь базовые представления о взаимодействии электрона с веществом, кристаллическом строении твердого тела, наноструктурированных материалах. Курс предполагает большой объём самостоятельной работы по ознакомлению с применяемыми методами, подходами, с приборной базой микроскопа и способами обработки результатов измерений.

Цели и задачи освоения дисциплины:

- создание представления об аналитической просвечивающей электронной микроскопии как методе диагностики современных микро- и наноматериалов твердотельной опто- и наноэлектроники;
- изучение физических основ формирования изображения;
- умение определять структуру и состав микро- и наносистем;
- изучение приборной базы современных микроскопов;
- формирование у студентов фундаментальных знаний, умений и навыков, необходимых при диагностике наноматериалов с использованием метода аналитической просвечивающей электронной микроскопии.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- Способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-4).

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ПК-4. Способен	ПК-4.1. Знает методики	Знать:	Вопросы по

аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения	измерений параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения ПК-4.2. Умеет совершенствовать и внедрять новые методы и методики измерений параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники. ПК-4.3. Владеет навыками использования различных методов и методик измерений параметров и свойств наноматериалов и наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники.	характеристики и режимы просвечивающего электронного микроскопа и эффективно использовать их в зависимости от исследуемых наноматериалов и наносистем. Уметь: аргументированно выбирать и применять на практике необходимый режим работы просвечивающего электронного микроскопа при проведении исследований, обрабатывать результаты измерений Владеть: навыками организации и проведения исследований с использованием просвечивающего электронного микроскопа.	темам/разделам дисциплины. Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму. Фонд тестовых заданий
---	---	---	---

3. Структура и содержание дисциплины «Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия»

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия лабораторного типа	32
самостоятельная работа	42 (работа в семестре) 36 (на подготовку к экзамену)
Промежуточная аттестация	7 семестр – экзамен

3.2 Содержание дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе			
		Контактная работа, часов			Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Занятия лекционного типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Введение	12	2	2	4	10
Введение в современные диагностические и аналитические методы	1,5	0,5	0	0,5	1
Введение в просвечивающую электронную микроскопию	6	1	1	2	5
Понятие структуры	4,5	0,5	1	1,5	4
2. Теория просвечивающей электронной микроскопии	44	12	8	20	12
Кинематическая теория рассеяния	10	2	2	4	2
Дифракция	5	1	1	2	2
Устройство просвечивающего электронного микроскопа	6	2	1	3	2
Образование точечных электронограмм	6	1	2	3	1
Динамическая теория рассеяния	7	3	1	4	2
Микроскопия в просвечивающем электронном микроскопе	10	3	1	4	3
3. Аппаратная база просвечивающего электронного микроскопа	40	6	10	16	10
Электронная пушка, электронная оптика	11	3	5	8	2
Вакуумная система	7	1	2	3	3
Гониометр	6	1	1	2	3
Юстировка просвечивающего электронного микроскопа	7	1	2	3	2
4. Аналитический просвечивающий электронный микроскоп	34	8	6	14	8
Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия	24	6	6	12	3
Спектроскопия характеристических потерь энергий электронов	10	2	0	2	5
5. Методы подготовки образцов	12	4	0	4	2
Самоподдерживающиеся образцы	7	3	0	3	1
Несамоподдерживающиеся образцы	5	1	0	1	1
Промежуточная аттестация (экзамен) - 2 часа					
Самостоятельная подготовка к экзамену – 36 часов					

Практические занятия (семинарские занятия /лабораторные работы) организуются, в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие

обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

3.3 Содержание разделов дисциплины

1. Введение

Введение в современные диагностические и аналитические методы

Историческая справка о полупроводниковом материаловедении. Цели и задачи диагностики структуры и состава. Обзор аналитических методов исследования. Анализ вещества и аналитическая информация. Качественный и количественный анализ. Влияние геометрии и состава на свойства вещества и на характеристики наноструктурированных систем. Стадии анализа.

Введение в просвечивающую электронную микроскопию. Взаимодействие электронного пучка с материалом образца. Вторичное излучение. Характеристическое и тормозное рентгеновское излучение, оже-электроны, "истинные" вторичные электроны, упруго-рассеянные электроны, дифрагированные электроны. Методы электронной микроскопии с аналитическими приставками для энергодисперсионной спектроскопии и спектроскопии характеристических потерь энергий электронов.

Понятие структуры. Функция радиального распределения. Идеальный кристалл. Газ. Жидкость. Аморфное тело. Поликристалл. Текстуры. Мозаичный кристалл. Реальный кристалл.

2. Теория просвечивающей электронной микроскопии

Кинематическая теория рассеяния. Амплитуда рассеяния. Обратное пространство. Сфера отражения. Сфера ограничения. Обратное преобразование Фурье. Дифракция на кристалле. Обратная решетка. Особенности электронографического и рентгенографического методов.

Дифракция. Интерпретация дифракции по Вульффу-Брэггу. Условие Лауэ. Атомный фактор рассеяния. Структурный фактор рассеяния. Разрешенные и запрещенные рефлексы. Построение точечных электронограмм. Электронограммы от поликристаллов. Электронограммы от текстур.

Устройство просвечивающего электронного микроскопа. Ход лучей. Режим дифракции. Режим микроскопа. Режим микродифракции. Режим сходящегося пучка. Режим нанодифракции. Светлопольное и темнопольное изображения. Сканирующий ПЭМ.

Образование точечных электронограмм. Факторы, влияющие на образование точечных электронограмм. Конечный размер кристалла, мозаичность, расхождение первичного пучка. Влияние кривизны сферы отражения. Лауэ-зоны.

Динамическая теория рассеяния. Длина экстинкции. Уравнения Хови-Уэлана. Эффект двойной дифракции. Лауэ-зоны. Кикучи-дифракция.

Микроскопия в просвечивающем электронном микроскопе. Режим микроскопа. Двухпучковое приближение. Светлопольное и темнопольное изображение. Длина экстинкции и изображение в ПЭМ. ПЭМ для клиновидной структуры и ПЭМ для структуры с изгибом. Большеугловые (кольцевые) изображения. Режим Z-контраста. Фазовый и дифракционный контраст. Методы увеличения контрастного сигнала. Эффект муара. Лоренцева микроскопия.

3. Оборудование просвечивающей электронной микроскопии

Электронная пушка, электронная оптика. Электронная пушка. Виды катодов. Работа электронной пушки. Формирование кроссовера. Электромагнитные линзы. Полусные наконечники. Аберрации электронной оптики. Визуализация изображения.

Вакуумная система. Форвакуумный роторный насос. Диффузионный насос. Турбомолекулярный насос. Ионно-геттерный насос. Титановый сублимационный насос. Давление в частях ПЭМ-колонны. Измерители давления. Шлюзовые камеры.

Гониометр. Назначение и устройство гониометра. Положение гониометра в колонне. Охлаждение, нагревание образцов. Поворотные гониометры. Держатели образцов. Материал держателей для различных режимов ПЭМ. Загрузка образца.

Юстировка просвечивающего электронного микроскопа. Юстировка электронной пушки. Напряжение смещения и температура катода. Юстировка конденсора. Настройка астигматизма конденсора. Юстировка вольтового центра объективной линзы. Коррекция астигматизма объективной линзы. Коррекция астигматизма промежуточной линзы. Юстировка проекционной линзы. Настройка фокуса объективной линзы.

4. Аналитический просвечивающий электронный микроскоп

Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия. Принцип действия детекторов рентгеновского излучения. Работа электроники в методе энергодисперсионной спектроскопии. Разрешение по энергии, пространственное разрешение, сравнение с методом рентгеновского микроанализа. Локальный количественный анализ. Картирование содержания элементов.

Спектроскопия характеристических потерь энергий электронов. Взаимодействие первичных электронов с основными уровнями атомов. Гамма-фильтр. Омега-фильтр. Фильтрация изображений и получение карты распределения элементов. Локальный количественный анализ.

5. Методы подготовки образцов

Самоподдерживающиеся образцы. Панчер. Ультразвуковая резка. Димплер. Химическое утонение. Ионное травление. Полировка. Препарирование дисперсных образцов. Приготовление поперечного шлифа.

Несамоподдерживающиеся образцы. Сетки и мембраны. Электрополировка. Ультрамикротомия. Диспергирование. Метод реплик. Экстракция. Скалывание. Селективное химическое травление. Литографические методы.

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине "Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия" проводятся в:

- лекционной форме (студенты воспринимают теоретический материал по исследования твердотельных микро- и наносистем в различных режимах работы просвечивающего электронного микроскопа);
- форме лабораторного практикума (сдается допуск для проведения лабораторных работ, подробно разбираются практические аспекты метода просвечивающей электронной микроскопии, решаются задачи по расшифровке электронограмм от поли- и монокристаллов, проводится демонстрация возможностей аналитического просвечивающего электронного микроскопа во всех режимах, записываются данные полученные в ходе экспериментов, принимается отчет по лабораторным работам);
- форме самостоятельной работы (студенты самостоятельно изучают рекомендованные источники литературы, готовятся к сдаче допуска к лабораторным работам, решают задачи по математической обработке электронограмм, микроскопических изображений и карт распределения состава).

Лекции поддерживаются онлайн-ресурсами сети Интернет для поиска дополнительной информации на заданные темы основного раздела курса для углубленного изучения теоретического материала.

Лабораторные работы поддерживаются программным обеспечением для обработки микроскопических изображений Gwyddion (<http://gwyddion.net/>) и базы по структурным и химическим свойствам материалов (<https://www.materialsproject.org>).

В рамках лабораторного практикума выполняется 4 работы:

1. Принцип работы и устройство просвечивающего электронного микроскопа.
2. Расшифровка электронограмм от поликристаллов

3. Индицирование точечных электронограмм
4. Аналитический просвечивающий электронный микроскоп.

5. Учебно-методическое обеспечение, формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа включает в себя теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы.

Самостоятельная работа предусмотрена при освоении материала разделов 1 - 5. Она связана с теоретической подготовкой к допуску и с написанием отчетов по лабораторным работам. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и в читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, к Интернет-ресурсам.

Контроль самостоятельной работы проводится в виде тестирования.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций)

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	Не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельным и	Продemonстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания,

	я от ответа	ошибки.	все задания но не в полном объеме.	Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами	объеме, но некоторые с недочетами.	несуществе нным недочетами , выполнены все задания в полном объеме.	в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможнос ть оценить наличие навыков вследствие отказа обучающего я от ответа	При решении стандартных задач не продемонстр ированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальны й набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонс трированы базовые навыки при решении стандартны х задач с некоторым и недочетами	Продемонстр ированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продемонс трированы навыки при решении нестандарт ных задач без ошибок и недочетов.	Продемонстр ирован творческий подход к решению нестандартн ых задач

6.2 Описание шкал оценивания

При выставлении экзаменационной оценки, т.е. в ходе промежуточной аттестации, применяется семибальная шкала, которая по окончании обучения (в дипломе бакалавра) трансформируется в пятибальную. Обе шкалы привязаны к 100-бальной системе, в которой баллы набираются в ходе текущего контроля при сдаче допусков и отчетов по лабораторным работам и непосредственно на экзамене.

За одну полностью выполненную лабораторную работу начисляется максимум 10 баллов. Поскольку за семестр необходимо выполнить 4 работы, то всего за лабораторный практикум можно набрать максимально 40 баллов.

Тест содержит 20 вопросов. За каждый правильный ответ начисляется половина балла. Итого по результатам тестирования можно набрать максимально 10 баллов.

По итогам освоения дисциплины сдается экзамен. Экзаменационный билет содержит два вопроса. За ответ на каждый из вопросов начисляется максимум 25 баллов.

Итого после успешного выполнения тестов, лабораторных работ и сдачи экзаменов можно набрать максимально 100 баллов.

Критерии выставления оценки при сдаче экзамена

Баллы	Семибальная шкала	Описание семибальной шкалы	Пятибальная шкала
-------	-------------------	----------------------------	-------------------

90-100	5,5 Превосходно	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление.	5 отлично
80-89	5 отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.	
75-79	4,5 очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.	4 хорошо
70-74	4 хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).	
60-69	3 удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.	3 удовлетворительно
40-59	2 неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.	2 неудовлетворительно
<40	1 плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.	1 плохо

6.3 Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций

Аттестация по дисциплине проходит в виде экзамена. Оценка выставляется по результатам оценивания качества выполнения лабораторных работ, полноты объяснения алгоритмов их выполнения, написания тестов и полноты ответа на поставленные в процессе экзамена вопросы в рамках полученного экзаменационного билета.

Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень освоения компетенции	Отличительные признаки
Начальный	<ul style="list-style-type: none"> - имеет основные знания о теории дифракции электронов; - знает и умеет применять основную формулу электронографии, понимает, какие факторы влияют на точность расчетов при ее использовании; - знает правила построения и умеет расшифровывать и строить эталонные точечные электронограммы от кубических

	<p>монокристаллов;</p> <ul style="list-style-type: none"> - знает основные узлы просвечивающего электронного микроскопа, их назначения, режимов работы микроскопа, ход лучей в ПЭМ; - знает геометрию основных типов электронограмм (поликристалл, монокристалл, текстура); - Имеет понятие об обратном пространстве и сфере Эвальда. Имеет основные понятия о математическом аппарате дифракции.
Продвинутый	<ul style="list-style-type: none"> - владеет понятием об атомной, структурной амплитудах, структурном факторе. Умеет рассчитывать законы погасания для кубических кристаллов; - имеет представление об осветительной системе просвечивающего электронного микроскопа. Знает устройство просвечивающего электронного микроскопа (электронная пушка, электромагнитные линзы, апертуры, держатель образцов); - знает кинематическую теорию контраста в ПЭМ. - объясняет принцип изображения плоских дефектов кристаллического строения, дислокационной структуры, дефектов упаковки; - владеет навыками анализа дифракционных картин и идентификации исследуемых материалов.
Высокий	<ul style="list-style-type: none"> - владеет знаниями о динамической теории рассеяния; - знает методы борьбы с абберациями электронных линз; - различает и умеет выбирать режимы просвечивающего электронного микроскопа (светлопольное, темнопольное, кольцевое темнопольное, режим микродифракции, фазовый контраст, сканирующая просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия и др.); - понимает основы двух и многопучкового приближения при формировании картин высоко разрешения в просвечивающем электронном микроскопе. - обрабатывает данные рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии в просвечивающем электронном микроскопе; - расшифровывает электронограммы с кикучи-линиями, знает применение электронограмм с кикучи-линиями; - отличает методы препарирования образцов для просвечивающего электронного микроскопа, может объяснить выбор того или иного метода для минимизации паразитного вторичного излучения и увеличения аналитического сигнала; - понимает влияние состава на свойства вещества, в том числе на свойства наноструктурированных объектов;

6.4 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции

6.4.1 Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины «Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия» проводится в виде экзамена, примерный список вопросов к которому приведен ниже

1. Взаимодействие электронного пучка с материалом образца. Вторичное излучение. Характеристичное и тормозное рентгеновское излучение, оже-электроны, "истинные" вторичные электроны, упруго-рассеянные электроны, дифрагированные электроны.
2. Основные закономерности и допущения кинематической теории рассеяния коротковолнового излучения на кристаллах. Математический аппарат дифракционного эксперимента. Понятие обратного пространства, обратной решетки.
3. Дифракция на кристаллах в свете обратной решетки и сферы Эвальда. Геометрическое построение дифракции. Правомочность замены сферы Эвальда плоскостью.
4. Понятие атомной, структурной амплитуд, структурного фактора. Законы погасания для кубических кристаллов.
5. Основная формула электронографии. Применение. Факторы, влияющие на точность расчетов при использовании основной формулы электронографии.
6. Геометрия основных типов электронограмм (монокристалл, текстура, поликристалл);
7. Геометрия и симметрия точечных электронограмм. Правила построения эталонных точечных электронограмм. Правила индирования точечных электронограмм.
8. Электронограммы от поликристаллов. Расшифровка электронограмм от поликристалла. Определение по электронограмме поликристалла вещества и типа решетки Браве (кубическая система).
9. Электронограммы от текстур. Закономерности расположения рефлексов на электронограммах от прямых и косых текстур.
10. Электронограммы с кичуи-линиями. Применение электронограмм с кичуи-линиями.
11. Пространственная разрешающая способность электронного микроскопа. Способы увеличения разрешающей способности ПЭМ.
12. Основные узлы просвечивающего электронного микроскопа. Назначение. Режимы работы микроскопа. Ход лучей.
13. Устройство просвечивающего электронного микроскопа. Электронная пушка. Виды катодов и их сравнительные характеристики.
14. Устройство просвечивающего электронного микроскопа. Назначение конденсора. Однолинзовый и двухлинзовый конденсор.
15. Устройство электромагнитной линзы. Аберрации электронных линз. Способы устранения аберраций.
16. Режим микродифракции в просвечивающем электронном микроскопе. Назначение селекторной диафрагмы. Порядок действий оператора для перехода в режим микродифракции.
17. Темнопольное и светлнопольное изображения. Назначение апертурной диафрагмы. Кольцевое темнопольное изображение.
18. Методы просвечивающей электронной микроскопии. Метод прямого разрешения, метод Муара, метод дифракционного контраста. Метод Z-контраста.
19. Изображение дефектов кристаллического строения в просвечивающей электронной микроскопии. Изучение дислокационной структуры, дефектов упаковки.
20. Рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия в просвечивающем электронном микроскопе. Аналитический сигнал. Артефакты на спектре. Сканирующий просвечивающий электронный микроскоп. Картирование элементного состава.
21. Спектроскопия характеристических потерь энергий электронов в просвечивающем электронном микроскопе. Аналитический сигнал. Сканирующий просвечивающий электронный микроскоп. Картирование элементного состава.
22. Методы препарирования самоподдерживающихся образцов для просвечивающего электронного микроскопа.
23. Методы препарирования несамоподдерживающихся образцов для просвечивающего электронного микроскопа.
24. Влияние состава на свойства вещества. Влияние состава на свойства наноструктурированных объектов.

25. Аналитические возможности методов электронной микроскопии и спектроскопии для диагностики структуры, состава и других свойств твердотельных структур.
26. Аналитический сигнал, шум, отношение сигнал/шум, фон. Математические методы обработки изображений, полученных в различных режимах работы аналитического просвечивающего электронного микроскопа.
27. Гониометр. Назначение и устройство гониометра. Виды гониометров.
28. Вакуумная система просвечивающего электронного микроскопа. Виды насосов, процедура подготовки образца и его загрузка.

6.4.2 Типовые вопросы для допуска к лабораторным работам

1. Дифракция на кристаллах в свете обратной решетки и сферы Эвальда. Кинематическая теория контраста в ПЭМ.
2. Основная формула электронографии. Применение. Факторы, влияющие на точность расчетов при использовании основной формулы электронографии
3. Геометрия основных типов электронограмм (монокристалл, текстура, поликристалл).
4. Расшифровка электронограмм от поликристалла. Определение по электронограмме от поликристалла структуры и типа решетки Браве для кубической системы
5. Индицирование точечных электронограмм
6. Основные узлы просвечивающего электронного микроскопа. Назначение. Режимы работы микроскопа. Ход лучей микроскопа.
7. Электронная пушка. Виды катодов, сравнительные характеристики.
8. Назначение конденсора. Однолинзовый и двухлинзовый конденсор.
9. Назначение апертурной диафрагмы. Назначение селекторной диафрагмы.
10. Темнопольное и светлопольное изображения.
11. Устройство электромагнитной линзы.
12. Аберрации электронных линз.
13. Рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия. Принцип работы детектора.
14. Рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия. Картирование элементного состава.
15. Рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия. Артефакты
16. Методы препарирования самоподдерживающихся образцов для просвечивающего электронного микроскопа.
17. Вакуумная система просвечивающего электронного микроскопа.
18. Аналитический сигнал, шум, отношение сигнал/шум, фон. Математические методы обработки аналитического сигнала в ПЭМ.

6.4.3 Практические задания для лабораторного практикума

1. Оформление в виде отчета ответов на контрольные вопросы пп. 3.2.2 (после проведения собеседования при ответе на индивидуальные вопросы).
2. Индивидуально для каждого студента. Определение по электронограмме от поликристалла структуры и типа решетки Браве для кубической системы.
3. Индивидуально для каждого студента. Индицирование точечных электронограмм.
4. Получение профиля и карты распределения содержания атомов на поперечном срезе твердотельной наноструктуры. Конспектирование действий оператора и написание отчета по лабораторной работе.

6.4.4 Примеры тестовых заданий.

7. Электронограммы от аморфного материала представляют собой ____.
- а) упорядоченный набор точек
 - б) набор дуг
 - в) набор пар параллельных линий, симметричных относительно узла (000)
 - г) гало
8. К режимам работы просвечивающего электронного микроскопа относится режим ____.
- а) микродифракции
 - б) нанодифракции
 - в) сходящегося пучка
 - г) все перечисленные

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

1. Ефремова Н.Ф. Подходы к оцениванию компетенций в высшем образовании. Учеб. пособие. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов. 2010. 216 с.
2. Положение о фонде оценочных средств, утверждённое приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 г. № 247-ОД.
3. Положение о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского [Электронный ресурс]: <http://www.qa.unn.ru/files/quality/procedure/polozhenie-21-05-08.pdf>.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке и на сайте физического факультета в электронном виде.

а) основная литература:

1. Б.К. Вайнштейн. Структурная электронография. М.:Изд-во академии наук СССР, 1956. – 314 с.Праттон М. Введение в физику поверхности. - Ижевск, 2000. - 256 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=79594&idb=0>
2. Е.В.Чупрунов, А.Ф.Хохлов, М.А.Фаддеев. Основы кристаллографии. М. 2006 г. -500 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=59410&idb=0>
3. Д. Брандон, У. Каплан. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.:Техносфера, 2004. – 384 с.
<http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=410236&idb=0>

б) дополнительная литература

1. П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон, Д. Пэшли, М. Уэлан. Электронная микроскопия тонких кристаллов. М.:Мир, 1968. – 574 с.
2. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур //ФТП.-1998.- Т.32, №1.- с.3-18. <http://journals.ioffe.ru/ftp/> - доступ с компьютеров ННГУ.
3. Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч. 1. Инженерно-физические основы [Электронный ресурс]: учебное пособие / М.Х. Хаблянян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. - Казань: Издательство КНИТУ, 2013. - 232 с.
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785788214474.html>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. Открытый проект Materials Project <https://www.materialsproject.org/>.

2. Программное обеспечение для обработки микроскопических изображений (Gwyddion) и Gwyddion <http://gwyddion.net/>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

При выполнении лабораторных работ используются лаборатории и оборудование:

- 1) кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники: лаборатория электронной микроскопии - просвечивающий электронный микроскоп ЭМВ – 100ЛМ
- 2) научно-образовательного центра "Физика твердотельных наноструктур": лаборатория электронной микроскопии: - высокоразрешающий просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100F с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max, система прецизионного ионного травления Gatan PIPS®, устройство для создания полусферических углублений Gatan Dimple Grider Model 656, устройство для ультразвуковой резки Gatan Tuned Piezo Cutting Tool.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.03.04 – «Электроника и нанoeлектроника».

Автор:

доцент кафедры

физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

к.ф.-м.н. Д. Е. Николичев

Рецензент:

заведующий кафедрой

теоретической физики

д.ф.-м.н. профессор В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой

физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники

д.ф.-м.н. профессор Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «20» мая 2023 г.

Председатель

Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ А.А. Перов