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 наноэлектроники

|  |
| --- |
| УТВЕРЖДАЮ: |

Декан \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Малышев А.И.

"\_\_\_\_\_"\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2019 г.

**Рабочая программа дисциплины**

|  |
| --- |
| **Методы диагностики и анализа микро- и инаносистем** |

Уровень высшего образования

магистратура

Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и наноэлектроника

Направленность (профиль): твердотельная электроника и наноэлектроника

Форма обучения: очная

Нижний Новгород 2019 год

Набор 2019 года

**Лист актуализации**

|  |
| --- |
|  |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
| **Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году** |
|  |  |  |
| Председатель МК |  |
| \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2019 г. |
|  |  |  |
| Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена дляисполнения в 2019-2020 учебном году на заседании кафедры |
| **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** |
|  |  |  |
|  | Протокол от \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. № \_\_Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_ |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
| **Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году** |
|  |  |  |
| Председатель МК |  |
| \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_ г. |
|  |  |  |
| Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена дляисполнения в 2020-2021 учебном году на заседании кафедры |
| **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** |
|  |  |  |
|  | Протокол от \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_ |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
| **Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году** |
|  |  |  |
| Председатель МК |  |
| \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. |
|  |  |  |
| Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена дляисполнения в 2021-2022 учебном году на заседании кафедры |
| **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** |
|  |  |  |
|  | Протокол от \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. № \_\_Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_ |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
|  |
|  |  |  |
| **Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году** |
|  |  |  |
| Председатель МК |  |
| \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. |
|  |  |  |
| Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена дляисполнения в 2022-2023 учебном году на заседании кафедры |
| **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** |
|  |  |  |
|  | Протокол от \_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. № \_\_Зав. кафедрой \_\_\_\_\_\_\_ |

1. **Место и цели дисциплины в структуре ОПОП**

Дисциплина «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем» относится к обязательным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника».

«Методы диагностики и анализа микро- и наносистем» ‑ естественнонаучная дисциплина, представляющая собой раздел физики, в котором дается представление о современных аналитических методах и углубленно изучаются методы электронной спектроскопии и микроскопии, предоставляющие информацию о химическом составе и топографии микро- и наноструктурных систем. 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», «Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия» и «Кристаллография» обязательной части, формируемой участниками образовательных отношений, и иметь базовые представления о взаимодействии электрона с веществом, химическом и кристаллическом строении твердого тела, микро- и наноматериалах. Курс лекций по дисциплине читается совместно с проведением лабораторного практикума. Он предполагает большой объём самостоятельной работы по ознакомлению с применяемыми методами, подходами и приборной базой электронных спектрометров и микроскопов, а также со математическими методами обработки результатов измерений.

**Цели и задачи освоения дисциплины:**

* формирование представлений о современных методах диагностики микро- и наноматериалов твердотельной опто- и наноэлектроники;
* изучение методик проведения эксперимента путем выполнения практических лабораторных работ, основанных на исследовании современных наносистем методами электронной спектроскопии и микроскопии;
* изучение математических подходов к обработке и интерпретации электронных спектров и изображений электронной микроскопии;
* изучение приборной базы современного научно-исследовательского оборудования с демонстрацией его возможностей.
1. **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 современную и эффективную методику экспериментального исследования параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-2).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **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-2. 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-2.1. Знание методик измерений параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники различного функционального назначенияПК-2.2. Умение совершенствовать и внедрять новые методы и методики измерений параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроникиПК-2.3 Навыки использования современных методик экспериментального исследования параметров и свойств наноматериалов, наноструктур и устройств электроники и наноэлектроники  | Знать основы методов электронной спектроскопии и микроскопии, масс-спектрометрии, которые используются для исследования наноструктурированных систем и устройств наноэлектроники. Знать основы вакуумной техники.Уметь выбирать необходимый режим работы электронного спектрометра и микроскопа в зависимости от исследуемых наноматериалов и структур, применять математический аппарат для обработки спектральных данных и микроскопических изображений.Иметь навыки интерпретации электронных спектров и микроскопических изображений для исследования химического состава твердотельных наноструктур. | Вопросы по темам/разделам дисциплины.Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму. Фонд тестовых заданий |

1. **Структура и содержание дисциплины «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем»**

**3.1 Трудоемкость дисциплины**

|  |  |
| --- | --- |
| Общая трудоемкость | 4 ЗЕТ  |
| Часов по учебному плану | 144 |
| в том числе |  |
| аудиторные занятия (контактная работа):- занятия лекционного типа- занятия лабораторного типа  | 3232 |
| самостоятельная работа | 42 (работа в семестре)36 (на подготовку к экзамену) |
| Промежуточная аттестация  | 2 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*** | **14** | **2** | **0** | **2** | **6** |
| Сравнительные характеристики аналитических методов | 9,5 | 1,5 | 0 | 1,5 | 3 |
| Введение в спектроскопию заряженных частиц | 4,5 | 0,5 | 0 | 0,5 | 3 |
| ***2. Электронная оже-спектроскопия*** | **15** | **5** | **2** | **7** | **4** |
| Физические основы ЭОС | 3,5 | 1 | 0,5 | 1,5 | 1 |
| Интерпретация оже-спектров | 8 | 3 | 1 | 4 | 2 |
| Оборудование ЭОС | 3,5 | 1 | 0,5 | 1,5 | 1 |
| ***3. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия*** | **18** | **6** | **2** | **8** | **5** |
| Физические основы РФЭС | 3,5 | 1 | 0,5 | 1,5 | 1 |
| Интерпретация фотоэлектронных спектров | 11 | 4 | 1 | 5 | 3 |
| Оборудование РФЭС | 3,5 | 1 | 0,50 | 1,5 | 1 |
| ***4. Математическая обработка спектральных данных*** | **22** | **6** | **4** | **10** | **6** |
| ***5. Растровая электронная микроскопия*** | **12** | **4** | **2** | **6** | **4** |
| Контраст в растровой электронной микроскопии | 8,5 | 3 | 1,5 | 4,5 | 3 |
| Оборудование РЭМ | 3,5 | 1 | 0,5 | 1,5 | 1 |
| ***6. Сканирующая оже-микроскопия*** | **9** | **3** | **2** | **5** | **4** |
| ***7. Ионное профилирование состава*** | **8** | **2** | **2** | **4** | **4** |
| Источник ионов | 3 | 0,5 | 0,5 | 1 | 2 |
| Физические принципы ионного распыления | 5 | 1,5 | 1,5 | 3 | 2 |
| ***8. Высоковакуумное оборудование*** | **10** | **1** | **1** | **2** | **4** |
| Основы вакуумной техники | 5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 2 |
| Вакуумные насосы. Вакууметры | 5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 2 |
| ***9. Подготовка образцов для методов электронной спектроскопии*** | **16** | **1** | **1** | **2** | **6** |
| Общие требования к образцам | 7 | 0,5 | 0,5 | 1 | 1 |
| Методы препарирования образцов | 9 | 0,5 | 0,5 | 1 | 5 |
| ***10. Масс-спектроскопия*** | **18** | **2** | **0** | **2** | **6** |
| Вторично-ионная масс-спектроскопия | 4,5 | 0,5 | 0 | 0,5 | 2 |
| Масс-анализаторы | 9 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| Ионизация материала образца | 4,5 | 0,5 | 0 | 0,5 | 1 |
| **Промежуточная аттестация** *(экзамен)* ‑ *2 часа* |
| **Самостоятельная подготовка к экзамену** *– 45 часов* |

**3.3 Содержание разделов дисциплины**

***1. Введение в современные диагностические и аналитические методы***

*Сравнительные характеристики аналитических методов*: электронной-оже спектроскопии рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, растровой электронной микроскопии, сканирующей оже-микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, вторично-ионной масс-спектроскопии, рентгеновского микроанализа, рентгеновской дифракции, атомно-абсорбционной спектроскопии, атомно-эмиссионной спектроскопии, атомно-флуоресцентной спектроскопии, фурье-спектроскопии, спектроскопии фотолюминесценции, спектроскопии фотопроводимости, сканирующей зондовой микроскопии. Сравнение методов спектроскопии заряженных частиц с методами спектроскопии электромагнитного излучения.

*Введение в спектроскопию заряженных частиц*. Общие принципы аналитических методов электронной и ионной спектроскопии.

***2. Электронная оже-спектроскопия***

*Физические основы ЭОС*. Энергия оже-перехода. Вероятность оже-процесса. Ширина оже-пика. Глубина выхода оже-электрона. Типичный спектр вторичных электронов.

*Интерпретация оже-спектров.* Тонкая структура оже-спектров: химический сдвиг, мультиплетное расщепление, плазмонные потери. Артефакты оже-спектров. Качественный и количественный анализ. Методы эталонных образцов, факторов относительной чувствительности, градуировочной кривой.

*Оборудование ЭОС.* Сверхвысоковакуумная система. Анализатор кинетической энергии электронов типа «цилиндрическое зеркало». Полусферический анализатор энергии. Формула анализатора. Режимы работы полусферического анализатора.

***3. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия***

*Физические основы РФЭС.* Соотношение между кинетической энергией фотоэлектрона, энергией первичного ХРИ и энергией связи на электронном уровне. Ширина фотоэлектронных линий. Глубина выхода фотоэлектронов. Типичный фотоэлектронный спектр.

*Интерпретация фотоэлектронных спектров.* Тонкая структура фотоэлектронных спектров: химический сдвиг, оже-серии, мультиплетное расщепление, сателлиты встряски и стряхивания, плазмонные потери, спектр валентной зоны. Артефакты фотоэлектронных спектров: рентгеновские сателлиты и духи. Фон в спектре фотоэлектронов.

*Оборудование РФЭС.* Требования к вакуумной системе и образцам. Источник рентгеновского излучения. Устройство комбинированного Al/Mg анода.

***4. Математическая обработка спектральных данных***

Методы вычитания фона, сглаживания и дифференцирования спектра. Работа с атласами эталонных спектров. Изучение программного обеспечения обработки спектральных данных. Аппроксимация спектров функциями Гаусса и Лоренца. Методика количественного анализа химических соединений на основе спектров фотоэлектронов.

***5. Растровая электронная микроскопия***

*Контраст в РЭМ.* Взаимодействие пучка первичных электронов с материалом образца. Топографический контраст. Контраст в обратнорассеянных электронах. Вольтовый контраст. Магнитный контраст. Контраст в наведенных электронах. Каналирование.

*Оборудование РЭМ.* Виды катодов. Устройство электронной пушки. Положения кроссовера и ток электронного пучка. Принцип формирования развертки и детектирование сигнала от вторичных электронов.

***6. Сканирующая оже-микроскопия***

Объединенный метод растровой электронной микроскопии и электронной оже-спектроскопии для изучения состава в нанометровом масштабе. Принцип действия. Алгоритмы работы. Режим локальной оже-спектроскопии и режим картирования состава. Общая схема сканирующего оже-микроскопа.

***7. Ионное профилирование состава***

*Источник ионов.* Принцип работы. Работа вакуумной системы при проведении ионного травления.

*Физические принципы ионного распыления.* Взаимодействие ионного пучка с материалом образца. Разрешение по глубине при профилировании и погрешность определения глубины анализа.

***8. Высоковакуумное оборудование***

*Основы вакуумной техники.* Требования, предъявляемые к материалам и устройствам, способу изготовления и обработки, в области высоковакуумного оборудования. Виды фланцев и прокладок к ним. Применение отжига для создания сверхвысоковакуумного вакуума.

*Вакуумные насосы. Вакууметры.* Насосы для сверхвысоковакуумного оборудования: роторный форвакуумный, турбомолекулярный, диффузионный, ионно-геттерный, сублимационный. Вакууметры ионизационные, мембранно-емкостные, термопарные, тепловые.

***9. Подготовка образцов для методов электронной спектроскопии***

*Общие требования к образцам.* Требования, обусловленные сверхвысоковакуумным оборудованием. Требования, определяемые методами изучения образцов.

*Методы препарирования образцов.* Предварительная подготовка образцов: механическая и ионная очистка. Подготовка образцов в вакууме: ионная и термическая обработка, скалывание. Исследования *in situ*. Процесс загрузки образца в сверхвысоковакуумный объем.

***10. Вторично-ионная масс-спектроскопия***

*Вторично-ионная масс-спектроскопия.* Взаимодействие первичных ионов с анализируемым веществом. Фокусированный ионный пучок. Аппаратная часть вторично-ионного масс-спектрометра.

*Масс-анализаторы.* Общая схема масс-спектрометра. Разрешающая способность масс-анализа, пространственное разрешение вторично-ионного масс-спектрометра. Принцип разделения ионов по массе в магнитном и электрическом полях. Времяпролетный, радиочастотный и квадрупольный масс-анализаторы. Сравнительные характеристики масс-анализаторов.

*Ионизация материала образца.* Ионизация электронным ударом. Фотоионизация. Ионизация в электрическом поле. Ионизация лазерным излучением. Ионизация ионным ударом.

1. **Образовательные технологии**

Занятия по дисциплине "Методы диагностики микро- и наносистем" проводятся в:

- лекционной форме (студенты воспринимают теоретический материал по методам исследования твердотельных микро- и наносистем);

- форме лабораторного практикума (сдается допуск для проведения лабораторных работ, подробно разбираются практические аспекты методов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, электронной оже-спектроскопии и растровой электронной микроскопии, решаются задачи по математической обработке электронных спектров и микроскопических изображений, 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 спектральных и микроскопических данных).

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 спектральных данных и микроскопических изображений: CasaXPS (<http://www.casaxps.com/>) и Gwyddion (<http://gwyddion.net/>). Онлайн ресурсы сети Интернет применяются для использования баз данных фотоэлектронных и оже-спектров (например, <https://srdata.nist.gov/xps/>), а также баз данных по структуре и химическом у состоянию материалов (например, <https://www.materialsproject.org>).

В рамках лабораторного практикума выполняется 4 работы:

1 Математическая обработка и качественный химический анализ в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

2. Локальный анализ методом сканирующей оже-микроскопии.

3. Профилирование состава твердотельных структур по глубине методами электронной спектроскопии с ионным распылением.

4. Калибровка растрового электронного микроскопа.

1. **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.

Также самостоятельная работа предусмотрена при освоении материала разделов 2 ‑ 7. Она связана с теоретической подготовкой к допуску и с написанием отчетов по лабораторным работам. Самостоятельная работа может проводиться как в домашних условиях, так и читальном зале библиотеки, в компьютерных классах, в учебных кабинетах (лабораториях) с доступом к лабораторному оборудованию, приборам, базам данных, Интернет-ресурсам.

Контроль самостоятельной работы проводится в виде тестирования.

1. **Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине**

**6.1 Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых учувствует 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 |
| Знания | 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 ошибки. | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. | Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.  |
| Умения | Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа | При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения.Имели место грубые ошибки. | Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.  | Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. | Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. | Продемонстрированы все основные умения,решены все основные задачи с отдельными несущественным недочетами, выполнены все задания в полном объеме.  | Продемонстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полномобъеме без недочетов |
| Навыки | Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа | При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.Имели место грубые ошибки. | Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами | Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами | Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. | Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов. | Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных 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) преобразуется в пятибалльную. 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.

Текущий контроль успеваемости производится путем проведения тестирования, контроля самостоятельной работы, принятия допуска к лабораторным работам, а также путем проверки протоколов измерений и отчётов по выполненным лабораторным работам.

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 30 вопросов. За каждый правильный ответ начисляется 1/3 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 максимально 25 баллов.

Итого после успешного выполнения тестов, лабораторных работ и сдачи экзаменов можно набрать максимум 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. | 5отлично |
| 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 | 4,5очень хорошо | Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями. | 4хорошо |
| 70-74 | 4хорошо | Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета). |
| 60-69 | 3удовлетворительно | Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя. | 3удовлетворительно |
| 40-59 | 2неудовлетворительно | Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания. | 2неудовлетворительно |
| <40 | 1плохо | Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией. | 1плохо |

**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 учувствует 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 | * знает диаграмму характеристик современных диагностических методов с указанием пространственного разрешения, разрешения по энергии и получаемого аналитического сигнала;
* имеет основные знания о взаимодействии электронного зонда с материалом образца и о формируемом вторичном излучении;
* знает физические основы электронной оже-спектроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии;
* знает основные методы математической обработки спектральных данных;
* понимает основные принципы работы электронной оптики;
* понимает принцип профилирования состава по глубине с использованием методов электронной спектроскопии совместно с и ионным распылением;
* знает принцип формирования контраста в растровом электронном микроскопе.
 |
| Продвинутый | * способен проводить качественный и количественный элементный анализ, используя экспериментальные спектральные данные и применяя математический аппарат для их обработки;
* разбирается в принципе и схеме работы спектрометра, умеет выбирать оптимальные режимы;
* имеет представление о видах и принципах работы детекторов вторичных электронов в методах электронной спектроскопии и микроскопии;
* знает причины возникновения и способах устранения или минимизации помех и артефактов в методах электронной спектроскопии и микроскопии;
* знает устройство и принцип работы масс-анализатора;
* имеет представление о вакуумной технике
 |
| Высокий | * владеет основами спектрального синтеза в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, умеет идентифицировать химические сдвиги с использованием атласов эталонных спектров и баз данных, владеет методами оценки погрешности химического анализа;
* умеет извлекать информацию из тонкой структуры фотоэлектронных и оже-линий;
* владеет знаниями о видах ошибок, возникающих при профилировании состава по глубине ионным распылением, понимает причины их возникновения и знает способы устранения;
* знает о режимах локальной оже-спектроскопии и картирования элементного состава в методе сканирующей оже-микроскопии, может предложить способы увеличения пространственного разрешения микроскопа;
* способен выбрать необходимый метод препарирования образцов для методов электронной спектроскопии и микроскопии;
* знает алгоритм юстировки электронного спектрометра для ЭОС и РФЭС.
 |

**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 «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем» проводится в виде экзамена, примерный список вопросов к которому приведен ниже.***

1. Сравнительные характеристики методов диагностики и анализа микро- и наносистем. Разновидности аналитического сигнала, пространственное и спектральное разрешение, чувствительность и ошибка, трудоемкость и экспрессность, пр. Влияние состава на свойства вещества и наноструктурированных материалов
2. Взаимодействие электронного пучка с поверхностью твердого тела и возникающие при этом виды аналитического сигнала. Методы диагностики, реализованные на этом взаимодействии
3. Физические основы метода электронной оже-спектроскопии. Энергия и вероятность оже-переходов, глубина анализа. Типичный спектр в ЭОС
4. Интерпретация оже-спектров. Тонкая структура и артефакты на спектрах. Методы учета спектральных артефактов и борьбы с ними
5. Качественный и количественный анализ в методе электронной оже-спектроскопии. Методы и пошаговый алгоритм количественного анализа.
6. Физические основы метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Энергия фотоэлектронов, глубина анализа. Типичный спектр в РФЭС. Соотношение на спектре между кинетической энергией фотоэлектрона, энергией первичного ХРИ и энергией связи на электронном уровне
7. Интерпретация фотоэлектронных спектров. Тонкая структура и артефакты на спектрах. Методы учета спектральных артефактов и борьбы с ними.
8. Качественный и количественный анализ в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Методы и пошаговый алгоритм количественного анализа
9. Устройство источника ХРИ в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Принцип работы комбинированного Al/Mg анода
10. Принцип действия, формулы и сравнительные характеристики анализатора типа "цилиндрическое зеркало" и полусферического анализатора кинетических энергий электронов, не включая подробное описание работы (режимы) ПСА
11. Полусферический анализатор. Принцип работы, режимы и их выбор. Оптическая система анализатора. Пространственное и энергетическое разрешение. Сохранение абсолютного и относительного разрешения по энергии
12. Математическая обработка фотоэлектронных спектров. Источники помех и искажений на спектрах и способы их устранения. Фон. Работа с атласами эталонных спектров. Аппроксимация фотоэлектронных линий математическими функциями. Критерии правильности разложения спектральных линий
13. Виды детекторов в методах электронной спектроскопии. Принцип работы блока канальных вторично-электронных умножителей с несколькими детекторами.
14. Виды контраста в методе растровой электронной микроскопии. Аналитический сигнал и применение различных режимов работы РЭМ. Математическая обработка РЭМ-изображений
15. Устройство электронной пушки. Положения кроссовера и изменение тока электронного пучка.
16. Методика подготовки образцов для методов электронной спектроскопии и микроскопии, реализованных в условиях сверхвысокого вакуума. Дополнительные методы подготовки образца в вакууме.
17. Сканирующий оже-микроскоп. Принцип работы и режимы микроскопа/спектрометра. Картирование элементного состава поверхности. Общая схема сканирующего оже-микроскопа и алгоритм его работы.
18. Послойный анализ с использованием травления ионами. Взаимодействие ионного пучка с материалом образца. Разрешение по глубине при профилировании и погрешность определения глубины анализа.
19. Устройство и принцип работы источника ионов. Работа вакуумной системы при ионном профилировании.
20. Пошаговая процедура послойного анализа с ионным профилированием в методах электронной оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Различия для двух методов. Особые условия в методе РФЭС.
21. Пошаговая процедура послойного анализа с ионным профилированием в методе сканирующей оже-микроскопии.
22. Вакуумная система электронного спектрометра/микроскопа. Виды насосов и вакууметров. Требования к материалам вакуумной камеры. Требования к образцам и процесс их загрузки. Исследования *in situ*.
23. Общие характеристики метода масс-спектроскопии. Статические и динамические масс-анализаторы. Сравнительные характеристики масс-анализаторов: разрешение по массе, чувствительность, экспрессность анализа. Интерпретация масс-спектров
24. Схема масс-спектрометра. Ионный микроскоп.
25. Источники ионов, сравнительные характеристики и применение для различных материалов.
26. Принцип работы вторично-ионного масс-спектрометра. Принцип профилирования состава в ВИМС. Изображение в ВИМС, локальный анализ состава и разрешение ВИМС.

***6.4.2 Типовые вопросы для допуска к лабораторным работам***

1. Подходы к нахождению полного момента количества движения в рамках концепции jj и LS.
2. Физические принципы, лежащие в основе методов РФЭС и ЭОС. Глубина выхода оже- и фотоэлектронов.
3. Типичный спектр в методах электронной спектроскопии. Особенности, наблюдаемые на спектрах.
4. Химический сдвиг в методах электронной спектроскопии.
5. Тонкая структура оже- и фотоэлектронных спектров. Оже-параметр.
6. Артефакты оже- и фотоэлектронных спектров.
7. Зарядка образца, методы её устранения и коррекции на спектрах.
8. Типы анализаторов энергий электронов, применяющихся в методах электронной спектроскопии. ПСА и режимы его работы.
9. Обработка и интерпретация спектров, получаемых в методах электронной спектроскопии
10. Детекторы в методах электронной спектроскопии.
11. Рентгеновские источники. Чем обусловлен выбор Mg и Al в качестве основных материалов при изготовлении анодов?
12. Монохроматизация рентгеновского излучения.
13. Спектральное разрешение в методах ЭОС и РФЭС.
14. Применения ионного травления в методах электронной спектроскопии. Принцип работы источника ионов.
15. Разрешение по глубине при послойном анализе структур методами электронной спектроскопии совместно с ионным распылением.
16. Юстировка ионного, электронного зонда и фокуса анализатора энергий электронов.
17. Электронная колонна в методе РЭМ. Электронная пушка, фокусирующая система.
18. Пространственное разрешение в методе РЭМ. Виды аберраций.
19. Взаимодействие электронного пучка с материалом образца.
20. Механизм формирования топографического контраста в РЭМ. Виды контрастов.
21. Детекторы в РЭМ.
22. Математическая обработка РЭМ-изображений.
23. Метод сканирующей оже-микроскопии. Локальный элементный анализ в СОМ.
24. Получение карты распределения в СОМ.
25. Вакуумная система для методов электронной спектроскопии и микроскопии.
26. Принцип работы вакууметра.
27. Предварительная обработка образцов перед загрузкой образцов в вакуумный объём.
28. Процесс загрузки образца в вакуумный объём.
29. СВВ комплекс Omicron Multiprobe RM. Общая схема.
30. Принцип работы спектрометра в Multiprobe RM.
31. Принцип работы РЭМ и СОМ в Multiprobe RM.

***6.4.3 Практические задания для лабораторного практикума***

Каждое задание присутствует в 4 вариантах, и, соответственно, слушатели делятся на 4 подгруппы.

***Задание 1.*** Математическая обработка и качественный химический анализ в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии

а) Подстроить гауссианы для полученных спектров с учетом химического сдвига. Учесть наличие или отсутствия дублета.

б) Определить для данных элементов по интегральной интенсивности гауссиан соотношение компонент, находящихся в соответствующих химических состояниях для данных элементов

***Задание 2.*** Локальный анализ методом сканирующей оже-микроскопии

а) Идентифицировать оже-линии в полученных спектрах и определить элементы, содержащиеся в образце.

б) По оже-линии определить в атласе коэффициенты относительной элементной чувствительности.

в) Построить профиль распределения концентраций элементов, по глубине используя метод факторов относительной чувствительности.

г) Дать описание полученному профилю распределения: описать полученные результаты, объяснить, как может влиять на профиль распределения ионное травление и поверхностная зарядка

д) Сравнить полученный результаты локального анализа в дефекте и в области между ними.

***Задание 3.*** Профилирование состава твердотельных структур по глубине методами электронной спектроскопии с ионным распылением

а) Найти каким элементам принадлежат представленные фотоэлектронные линии, используя атлас эталонных спектров.

б) Построить профиль распределения концентрации элементов по глубине структуры, измеряя интегральную интенсивность фотоэлектронных линий.

в) Провести анализ полученного профиля распределения концентрации по глубине.

***Задание 4.*** Калибровка растрового электронного микроскопа

Представлены РЭМ-изображения образца, полученные при различном ускоряющем напряжении на пушке и различном увеличении электронно-оптической системы. Величина ускоряющего напряжения на пушке влияет на увеличение. Определить реальный размер пикселя (нм) и всего РЭМ-изображения (мкм) по нескольким периодам на изображении, а также рассчитать погрешность. При определении размера пикселя необходимо убрать из рассмотрения периоды, захватывающие левый край скана, так как в этой области присутствуют нелинейные искажения, а при определении размера скана искажениями пренебречь.

***6.4.4 Примеры тестовых заданий.***

3. На ФЭ-спектре отсутствует \_\_.

а) рентгеновские духи

б) пик рассеянных электронов

в) фон

г) оже-серии

4. В ЭОС для оценки концентрации методом Peak-to-Peak спектры \_\_.

а) дифференцируют

б) интегрируют

в) моделируют

г) складывают

5. Для атомов \_\_ оже-процесс невозможен.

а) гелия

б) кислорода

в) бериллия

г) аргона

**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.
4. **Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке и на сайте физического факультета в электронном виде.

**а) основная литература:**

1 Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение [Электронный ресурс] / под ред. У. Жу, Ж. Л. Уанга ; пер. с англ. - Эл. изд. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. -582 с. <http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785996321230-SCN0001/001.html>

2 Методы структурных исследований материалов. Методы микроскопии [Электронный ресурс] : учебное пособие / Э.Ф. Вознесенский, Ф.С. Шарифуллин, И.Ш. Абдуллин. - Казань : Издательство КНИТУ, 2014. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785788215457.html>

3 Спектроскопия [Электронный ресурс] / Бёккер Ю. - М. Техносфера, 2009. <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785948362205.html>

4 Николичев Д.Е., Боряков А.В. "Локальная диагностика состава полупроводниковых наносистем методом сканирующей оже-микроскопии". Учебно-методическое пособие. – Н. Новгород, Изд-во нижегородского госуниверситета, 2001. -110 с. Фонд образовательных электронных ресурсов –рег. №405.12.05. <http://www.unn.ru/books/met_files/NikolitchevBoryakov.pdf>

5 Д.Е.Николичев , А.В.Боряков , С.И.Суродин , Р.Н.Крюков "Химический анализ твердотельных гетеронаносистем методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии". Учебно-методическое пособие. – Н. Новгород, Изд-во нижегородского госуниверситета, 2014. -73 с. Фонд образовательных электронных ресурсов –рег. №665.14.05. <http://www.unn.ru/books/met_files/esca.pdf>

**б) дополнительная литература**

1 Справочное руководство по аналитической химии и физико-химическим методам анализа [Электронный ресурс] : Учеб. пособие / И.В. Тикунова, Н.В. Дробницкая, А.И. Артеменко и др. - М. : Абрис, 2012. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785437200759.html>

2 Физические основы электронной спектроскопии заряженных поверхностей твердых тел: монография [Электронный ресурс] / Козаков А.Т. - Ростов н/Д : Изд-во ЮФУ, 2009. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785927507115.html>

3 Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч. 1. Инженерно-физические основы [Электронный ресурс] : учебное пособие / М.Х. Хабланян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. - Казань : Издательство КНИТУ, 2013. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785788214474.html>

4 К. Зигбан. Электронная спектроскопия '[под ред. И. Б. Боровского] М.:Мир, 1971. – 493 с. <http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=81907&DB=1>

2 Гайкович, К.П. Деконволюция изображений в сканирующей оже-микроскопии и в сканирующей электронной микроскопии / К.П. Гайкович, В.Ф. Дряхлушин, Д.Е. Николичев // Нано- и микросист. техника. – 2005. ‑ №5. ‑ С.30.

3 Нанохимия [Электронный ресурс] / Сергеев Г.Б. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Издательство Московского государственного университета, 2007. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785211053724.html>

**в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы**

1 Материалы лекций на сайте физического факультета ННГУ <http://phys.unn.ru/content.asp?CatId=307&ContentType=Library>

2 Программное обеспечение для обработки спектральных данных CasaXPS. Распространится свободно с ограничением функционала <http://www.casaxps.com/>

3 Программное обеспечение для обработки микроскопических изображений Gwiddion <http://gwyddion.net/>

4 Онлайн базы данных фотоэлектронных и оже-спектров <https://srdata.nist.gov/xps/>

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

1. **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.

Лабораторный практикум дисциплины «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем» обеспечен наличием уникального сверхвысоковакуумного комплекса Multiprobe RM (Omicron Nanotechnology GmbH) с электронным оже-спектрометром, рентгеновским фотоэлектронным спектрометром, растровым электронным микроскопом и системой ионного распыления для профилирования состава.

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 ФГОС ВО по направлению подготовки 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника».

Автор,

доцент кафедры

физики полупроводников, электроники и наноэлектроники

к.ф.-м.н. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Д. Е. Николичев

Рецензент:

профессор \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Е.С. Демидов

Заведующий кафедрой

физики полупроводников, электроники и наноэлектроники

д.ф.-м.н. профессор \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ протокол № \_ от « » 2019 г.,

Председатель

Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А.А. Перов