ИНСТИТУТ МАГИСТРАТУРЫ

КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Утверждено на заседании кафедры  
  
протокол №\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

от «\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2014 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И АНАЛИЗА МИКРО- И НАНОСИСТЕМ

|  |  |
| --- | --- |
| Направление подготовки (специальность) | 14.04.02 Ядерные физика и технологии |
| Профиль подготовки (при его наличии) |  |
| Наименование образовательной программы (специализация) | Фемтосекундная лазерная физика и технологии |
| Квалификация (степень) выпускника | Магистр |
| Форма обучения | очная |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Семестр** | **Интерактив** | **Трудоемкость, кред.** | **Общий объем курса, час.** | **Лекции, час.** | **Практич. занятия, час.** | **Лаборат. работы, час.** | **СРС, час.** | **КСР, час.** | **Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП** |
| 3 |  | 4 | 144 | 8 | 56 | 0 | 44 | 0 | Э |
| ИТОГО | 56 | 4 | 144 | 8 | 56 | 0 | 44 | 0 |  |

Группа: М03-87

Аннотация

1. Цели освоения учебной дисциплины

Через изложение физической сущности элементарных взаимодействий электронов и фотонов и атомов с поверхностью, микро- и наносистемами излагаются основные локальные методы анализа компонентного состава, топографии и электронной структуры микро и наноструктур в условиях сверхвысокого вакуума. Это позволит будущим специалистам в области нанотехнологии использовать необходимые знания и наиболее адекватные современные методики при квалифицированном исследовании и создании наноструктур для различных научно-технических задач.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО

Данная дисциплина программы логически и содержательно-методически связана со следующими предшествующими дисциплинами: общая физика, теория поля, квантовая механика, физическая оптика, теория колебаний, атомная и молекулярная спектроскопия, физика твердого тела, физика газового разряда, разделы математики: дифференциальное и интегральное исчисления, теория рядов, уравнения математической физики, теория вероятностей. Освоение данной дисциплины имеет, во-первых, самостоятельное значение и, во-вторых, является основой для усвоения следующих специальных курсов по: Физика поверхности, Применение оптической спектроскопии для исследования наноструктур, Лазерные микро и нанотехнологии и др.

3. КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ/ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ И КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА ПО ЗАВЕРШЕНИИ ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ПК-4, ПСК-3, ПСК-11

В результате освоения дисциплины студент должен:

Знать:

З1. Общее понятие методов диагностики. Зондирующие пучки и частицы. Переизлученные образцом частицы. Необходимость проведения диагностики и анализа микро и наноструктур в контролируемых условиях сверхвысокого вакуума

З2. Основы понятия молекулярно–кинетической теории газа. Адсорбция газа на поверхности твердого тела и ее роль в вакуумной технике. Уравнение течения газа Режимы течения газов, основное уравнение вакуумной техники

З3. Принципы работы и классификация вакуумных насосов

З4. Принципы работы, особенности и диапазоны измерения вакуумметров

З5. Конструкция и принцип работы, блок-схема Масс-спектрометров (МС), интерпретация МС -спектров

З6. Масс-спектрометрия вторичных ионов

З7. Оже-процесс и оже-микроскопия

З8. Просвечивающий электронный микроскоп

З9. Растровый электронный микроскоп

З10. Метод фотоэлектронной спектроскопии: ФЭС(УР) (ARPES).

З11. Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)

З12. Различные режимы работы СТМ. Методика сканирующей туннельной спектроскопии (СТС)

З13. Атомно-силовой микроскоп

Уметь:

У1. Выбирать подходящую чистоту окружающих условий (степень вакуума) и систему откачки для проведения исследований микро- и наносистем

У2. Оценивать погрешность величины, которую необходимо измерить, при использовании различных методов анализа микро- и наносистем

У3. Уметь оценивать усилия и затраты на проведения различных методов исследований микро- и наносистем

Владеть:

В1. Основными физическими принципами, используемыми для достижения СВВ вакуума и получения чистых поверхностей

В2. Основными физическим принципами работы различных методов анализа и диагностики и анализа микро- и наносистем

В3. Критериями и навыками выбора оптимального метода анализа для проведения исследований микро и наносистем

4. Структура и содержание учебной дисциплины

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№ п.п** | **Наименование раздела учебной дисциплины** | **Недели** | **Лекции, час.** | **Практ. занятия/ семинары, час.** | **Лабораторные работы, час.** | **Обязат. текущий контроль (форма\*, неделя)** | **Аттестация раздела (форма\*, неделя)** | **Максимальный балл за раздел\*\*** |
|  | *3 семестр* |  |  |  |  |  |  |  |
| 1 | Общее понятие методов диагностики и роль сверхвысокого вакуума; способы получения и контроля вакуума. | 1-5 | 2 | 20 | 0 | Т-5 | КИ, 5 | 14 |
| 2 | Оже электронная спектроскопия, фотоэлектронная спектроскопия, просвечивающая и растровая электронная микроскопия. | 6-11 | 3 | 19 | 0 | Т-11 | КИ, 11 | 18 |
| 3 | Методы сканирующей зондовой микроскопии. | 12-16 | 3 | 11 | 0 | Т-16 | КИ, 16 | 18 |
|  | *Итого за 3 семестр* |  | 8 | 56 | 0 |  |  | 50 |
|  | **Контрольные мероприятия после 3 семестра** |  |  |  |  |  | Э | 50 |

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

КИ Контроль по итогам

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Недели** | **Темы занятий / Содержание** | **Лек., час.** | **Пр./сем., час.** | **Лаб., час.** |
|  | *3 семестр* | 8 | 56 | 0 |
| 1 | **Тема 1** Общее понятие методов диагностики. Зондирующие пучки и частицы. Переизлученные образцом частицы. Необходимость проведения диагностики и анализа микро и наноструктур в контролируемых условиях сверхвысокого вакуума |  | 4 |  |
| 2 | **Тема 2.** Основные понятия техники сверхвысокого вакуума. Основы понятия молекулярно–кинетической теории газа. Адсорбция газа на поверхности твердого тела и ее роль в вакуумной технике. Уравнение течения газа. Режимы течения газа. Основное уравнение вакуумной техники. Материалы СВВ камер и изделий. | 1 | 3 |  |
| 3 - 4 | **Тема 3.** Классификация и типы насосов. Важнейшие характеристики насосов. Некоторые типичные виды насосов, часто используемых в настоящее время. Принципы работы некоторых видов современных вакуумметров. Принципы построения СВВ камер для создания и анализа микро и наноструктур. |  | 8 |  |
| 5 - 6 | **Тема 4** Масс-спектрометрия и основные виды масс-спектрометров. Принципы работы магнитного, времяпролетного, квадрупольного и монополярного масс-спектрометров. Приборы для регистрации электронов, ионов и фотонов - ВЭУ и ФЭУ. Интерпретация масс-спектрометров с учетом относительной интенсивности линий чистых газов. Общие представления о методах течеискания. Электронная пушка. Источник ионов. Ионная пушка и основы электростатической электронной оптики. Принцип и техника масс-спектрометрии вторичных ионов. Послойный анализ микро и наносистем. | 1 | 7 |  |
| 7 - 8 | **Тема 5.** Оже электронная спектроскопия (ЭОС). Схема оже-процесса в терминах атомных уровней энергии. Типы анализаторов электронов: «цилиндрическое зеркало», полусферический, 127°-ный секторный цилиндрический. Глубина и площадь анализа при оже-спектроскопии. Универсальная кривая длины пробега электронов от энергии в материалах. Блок-схема электронного оже-спектрометра. Изменение чувствительности ОЭС сигнала в зависимости от химического элемента. Виды оже-спектров и количественное определение состава образца на основании оже-спектроскопии. Типичные параметры, возможности и разрешение оже электронной спектроскопии. Сканирующий ОЭС анализатор в комбинации с ионной пушкой. Послойный оже-анализ. Аппаратная реализация оже-спектроскопии в СВВ установке на примере спектрометра “OPC-200” и “OPC-103” фирмы “RIBER” (Франция). Преимущества электронной оже-спектроскопии. | 2 | 6 |  |
| 9 | **Тема 6.** Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ). Аналогия с оптическим микроскопом и Де Бройлевская длина волны электрона. Виток с током и магнитная электронная оптика. Принципиальная схема получения изображения в ПЭМ. Система виброизоляции. Пространственное разрешение ПЭМ. Накальные и холодные эмиттеры электронов в ПЭМ. Требования к образцам ПЭМ и держатели образцов. Специальные методы подготовки образцов для ПЭМ. Взаимодействие высокоэнергетичных электронов с образцом в ПЭМ. Особенности работы на реальном ПЭМ. Пример ПЭМ изображений. Режим электронографии – дифракции электронов высокой энергии в ПЭМ. |  | 4 |  |
| 10 | **Тема 7.** Растровый электронный микроскоп (РЭМ). Блок-схема и увеличение в РЭМ. Особенности образцов для РЭМ исследований. Типы сигналов, регистрируемых в РЭМ: вторичные электроны, обратно рассеянные электроны (оже-спектроскопия), ток образца, характеристическое рентгеновское излучение, катодолюминесценция, прошедшие через образец электроны. Разрешение в РЭМ. Карты распределения элементов на образце. Эффекты затенения при наклонном падении пучка. Сравнение особенностей ПЭМ и СЭМ. |  | 2 |  |
| 11 - 12 | **Тема 8.** Фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ФЭСУР). Законы сохранения и диаграмма электронных уровней энергии. Блок-схема эксперимента по фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. Аппаратная реализация спектроскопии на примере спектрометра SES200 фирмы “Scienta” (Швеция). Понятие о поверхностных состояниях электронов. Примеры дисперсионных зависимостей энергии поверхностных электронов от волнового вектора E(k||) на поверхности меди Cu(111), полученных методом ФЭСУР. Сравнение методов анализа: ФЭСУР и ЭОС. | 1 | 7 |  |
| 13 - 14 | **Тема 9.** Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и сканирующая туннельная спектроскопия (СТС). Принципиальная схема СТМ. Энергетическая диаграмма туннельного контакта иглы и образца Природа туннельного тока и его простейшая формула. Пространственное разрешение СТМ. Чувствительность туннельного тока к локальной плотности электронов образца. Схема сканера и виброизоляция СТМ. Пьезокерамическая трубка - универсальный сканирующий элемент. Обратная связь для стабилизации туннельного тока. Влияние формы иглы на получаемое СТМ изображение. Иглы для СТМ. Сканер реального СТМ “GPI-300”. Примеры атомарного разрешения на металлах и полупроводниках в СТМ “GPI-300”. | 2 | 6 |  |
| 15 | **Тема 10.** Различные режимы работы СТМ. Сканирующая туннельная спектроскопия (СТС). СТМ литография. Цифровое и аппаратное дифференцирование (с помощью синхронного детектора) I=f(Utun) Параметры спектроскопии на СТМ “GPI-300”. Криогенные СТМ. | 1 | 3 |  |
| 16 | **Тема 11.** Атомно-силовой микроскоп (АСМ). Принципиальная схема АСМ. Детекторы отклонения кантилевера АСМ. Сила взаимодействия зонда с образцом. Контактная и бесконтактная мода и другие режимы работы АСМ. Регистрация латеральной силы. Кантилеверы для АСМ. Пространственное разрешение СТМ. Спектроскопия в АСМ. Различные примеры АСМ изображений. Примеры реальных АСМ. Сравнение АСМ и СТМ. |  | 2 |  |

ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

|  |  |
| --- | --- |
| **Недели** | **Темы занятий / Содержание** |
|  | *3 семестр* |
| 1 | **Тема 1** Общее понятие методов диагностики. Зондирующие пучки и частицы. Переизлученные образцом частицы. Необходимость проведения диагностики и анализа микро и наноструктур в контролируемых условиях сверхвысокого вакуума |
| 2 | **Тема 2** Основные понятия техники сверхвысокого вакуума. Основы понятия молекулярно–кинетической теории газа. Адсорбция газа на поверхности твердого тела и ее роль в вакуумной технике. Уравнение течения газа. Режимы течения газа. Основное уравнение вакуумной техники. Материалы СВВ камер и изделий. |
| 3 - 4 | **Тема3** Классификация и типы насосов. Важнейшие характеристики насосов. Некоторые типичные виды насосов, часто используемых в настоящее время. Принципы работы некоторых видов современных вакуумметров. Принципы построения СВВ камер для создания и анализа микро и наноструктур. |
| 5 - 6 | **Тема 4** Масс-спектрометрия и основные виды масс-спектрометров. Принципы работы магнитного, времяпролетного, квадрупольного и монополярного масс-спектрометров. Приборы для регистрации электронов, ионов и фотонов - ВЭУ и ФЭУ. Интерпретация масс-спектрометров с учетом относительной интенсивности линий чистых газов. Общие представления о методах течеискания. Электронная пушка. Источник ионов. Ионная пушка и основы электростатической электронной оптики. Принцип и техника масс-спектрометрии вторичных ионов. Послойный анализ микро и наносистем. |
| 7 - 8 | **Тема 5** Оже электронная спектроскопия (ЭОС). Схема оже-процесса в терминах атомных уровней энергии. Типы анализаторов электронов: «цилиндрическое зеркало», полусферический, 127°-ный секторный цилиндрический. Глубина и площадь анализа при оже-спектроскопии. Универсальная кривая длины пробега электронов от энергии в материалах. Блок-схема электронного оже-спектрометра. Изменение чувствительности ОЭС сигнала в зависимости от химического элемента. Виды оже-спектров и количественное определение состава образца на основании оже-спектроскопии. Типичные параметры, возможности и разрешение оже электронной спектроскопии. Сканирующий ОЭС анализатор в комбинации с ионной пушкой. Послойный оже-анализ. Аппаратная реализация оже-спектроскопии в СВВ установке на примере спектрометра “OPC-200” и “OPC-103” фирмы “RIBER” (Франция). Преимущества электронной оже-спектроскопии. |
| 9 | **Тема 6.** Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ). Аналогия с оптическим микроскопом и Де Бройлевская длина волны электрона. Виток с током и магнитная электронная оптика. Принципиальная схема получения изображения в ПЭМ. Система виброизоляции. Пространственное разрешение ПЭМ. Накальные и холодные эмиттеры электронов в ПЭМ. Требования к образцам ПЭМ и держатели образцов. Специальные методы подготовки образцов для ПЭМ. Взаимодействие высокоэнергетичных электронов с образцом в ПЭМ. Особенности работы на реальном ПЭМ. Пример ПЭМ изображений. Режим электронографии – дифракции электронов высокой энергии в ПЭМ. |
| 10 | **Тема 7** Растровый электронный микроскоп (РЭМ). Блок-схема и увеличение в РЭМ. Особенности образцов для РЭМ исследований. Типы сигналов, регистрируемых в РЭМ: вторичные электроны, обратно рассеянные электроны (оже-спектроскопия), ток образца, характеристическое рентгеновское излучение, катодолюминесценция, прошедшие через образец электроны. Разрешение в РЭМ. Карты распределения элементов на образце. Эффекты затенения при наклонном падении пучка. Сравнение особенностей ПЭМ и СЭМ. |
| 11 - 12 | **Тема 8** Фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ФЭСУР). Законы сохранения и диаграмма электронных уровней энергии. Блок-схема эксперимента по фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. Аппаратная реализация спектроскопии на примере спектрометра SES200 фирмы “Scienta” (Швеция). Понятие о поверхностных состояниях электронов. Примеры дисперсионных зависимостей энергии поверхностных электронов от волнового вектора E(k||) на поверхности меди Cu(111), полученных методом ФЭСУР. Сравнение методов анализа: ФЭСУР и ЭОС. |
| 13 - 14 | **Тема 9** Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и сканирующая туннельная спектроскопия (СТС). Принципиальная схема СТМ. Энергетическая диаграмма туннельного контакта иглы и образца Природа туннельного тока и его простейшая формула. Пространственное разрешение СТМ. Чувствительность туннельного тока к локальной плотности электронов образца. Схема сканера и виброизоляция СТМ. Пьезокерамическая трубка - универсальный сканирующий элемент. Обратная связь для стабилизации туннельного тока. Влияние формы иглы на получаемое СТМ изображение. Иглы для СТМ. Сканер реального СТМ “GPI-300”. Примеры атомарного разрешения на металлах и полупроводниках в СТМ “GPI-300”. |
| 15 | **Тема 10** Различные режимы работы СТМ. Сканирующая туннельная спектроскопия (СТС). СТМ литография. Цифровое и аппаратное дифференцирование (с помощью синхронного детектора) I=f(Utun) Параметры спектроскопии на СТМ “GPI-300”. Криогенные СТМ. |
| 16 | **Тема 11** Атомно-силовой микроскоп (АСМ). Принципиальная схема АСМ. Детекторы отклонения кантилевера АСМ. Сила взаимодействия зонда с образцом. Контактная и бесконтактная мода и другие режимы работы АСМ. Регистрация латеральной силы. Кантилеверы для АСМ. Пространственное разрешение СТМ. Спектроскопия в АСМ. Различные примеры АСМ изображений. Примеры реальных АСМ. Сравнение АСМ и СТМ. |

5. Образовательные технологии

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия в виде лекций и семинаров, а также самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашнего задания, подготовке к семинарам, повторения ранее пройденного материала.

6. ТРЕБОВАНИЯ К ФОНДУ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ В РАМКАХ РЕАЛИЗУЕМОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Курс "Методы диагностики и анализа микро- и наносистем" рассчитан на один семестр, преподается в 3-м семестре магистратуры и разделен на три раздела:

1. Общее понятие методов диагностики и роль сверхвысокого вакуума; способы получения и контроля вакуума

2. Электронная оже-спектроскопия, фотоэлектронная спектроскопия, просвечивающая и растровая электронная микроскопия

3. Методы сканирующей зондовой микроскопии

По завершении каждого раздела студентам будет предложено пройти Обязательный Текущий Контроль (ОТК), проводимый в виде теста.

По результатам ответов на вопросы теста студентам начисляются баллы.

Максимальное количество баллов, которые возможно набрать по окончанию первого, второго и третьего разделов - 14, 18 и 18 соответственно.

Тестовые задания приведены в Фонде Оценочных Средств по данной дисциплине, являющимся неотъемлемой частью учебно-методического комплекса учебной дисциплины «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем»

На решение тестовых заданий студенту отводится 10 минут.

Если студент не набирает 50% баллов по результатам теста, то задание считается незасчитанным и у студента образуется долг, который должен быть закрыт в течение семестра или на зачетной неделе.

Таким образом, к экзамену студент может максимально набрать 50 баллов.

Экзамен проводится в виде ответов на вопросы экзаменационного билета. Максимальное время подготовки ответа - 1 час.

Экзаменационные вопросы и билеты приведены в Фонде Оценочных Средств по данной дисциплине, являющимся неотъемлемой частью учебно-методического комплекса учебной дисциплины «Методы диагностики и анализа микро- и наносистем»

По результатам экзамена студент может получить максимально 50 баллов.

Баллы, полученные за экзамен суммируются с баллами, полученными по результатам Обязательного Текущего Контроля.

Итого, максимальное количество баллов, которые может получить студент по данной дисциплине составляет 100.

Итоговая оценка промежуточного контроля по дисциплине определяется на основании набранных баллов по следующей таблице:

Отлично (A) - 90-100 баллов

Хорошо (D, C, B) - 70-89 баллов

Удовлетворительно (E, D) - 60-69 баллов

Неудовлетворительно (F) - менее 60 баллов

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

а) ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ Ф50 Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела : учебное пособие для вузов, В. И. Троян [и др.], Москва: МИФИ, 2008

2. 620 Б87 Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля : учебное пособие для вузов, Д. Брандон, У. Каплан, Москва: Техносфера, 2006

б) ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

в) ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

Специальное программное обеспечение не требуется

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС НИЯУ МИФИ по направлению подготовки (специальности) 14.04.02 Ядерные физика и технологии.

Авторы:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Юров Владимир Юрьевич д.ф.-м.н. | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  (подпись) |

Рецензент(ы):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  (подпись) |