

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике
В ЯФ ФГБУН ФТИАН им. К.А. Валиева РАН

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета

(подпись) И.С. Огнев
«20» мая 2021 г.

Рабочая программа дисциплины
«Методы анализа поверхности»

Направление подготовки
11.04.04 Электроника и наноэлектроника

Направление (профиль)
« Интегральная электроника и наноэлектроника »

Форма обучения
очная

Программа одобрена
на заседании кафедры
от «24» апреля 2021 г. протокол №9

Программа одобрена НМК
физического факультета
протокол №5 от «13» мая 2021 г.

Ярославль

1. Цели освоения дисциплины Методы анализа поверхности:

- знакомство с основными методами диагностики поверхности твердых тел, изучение методов исследования химического состава и структуры поверхности компонентов микро- и наноэлектроники;
- практическое ознакомление с работой установок вторичной ионной масс-спектрометрии, растровой оже-электронной спектроскопии, растровой электронной микроскопии необходимых для дальнейшей самостоятельной работы.

2. Место дисциплины в структуре ООП магистратуры

Дисциплина методы анализа поверхности относится к вариативной части профессионального цикла (М 2.2.3) Изучается после прохождения дисциплин математического и естественнонаучного цикла, а также после освоения основных дисциплин профессионального цикла. При изучении широко используются знания, умения и практические навыки указанных дисциплин.

3. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
Профессиональные компетенции		
ПК-3. Готов осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени.	ИД_ПК-3.1. Демонстрирует знание принципов планирования и автоматизации проведения эксперимента.	Знать: <ul style="list-style-type: none">• основные физические законы, лежащие в основе современных методов исследования поверхности твердых тел,• принципы и режимы работы вторично-ионного масс-спектрометра (ВИМС), растрового электронного оже-спектрометра, растрового электронного микроскопа, метода Резерфордского обратного рассеяния (РОР);• общую методику физического эксперимента с использованием установок для исследования свойств поверхности.
	ИД_ПК-3.1. Умеет разрабатывать требования к средствам проведения эксперимента, контроля и диагностики.	
ПК-4. Способен к организации и проведению	ИД_ПК-3.1. Обладает навыками тестирования и диагностики изделий микро- и наноэлектроники.	Уметь: уметь произвести выбор метода и тип прибора для получения информации о составе и структуре поверхности объектов микро и наноэлектроники.
	ИД_ПК-4.1. Знает способы организации и проведения	

экспериментальных исследований с применением современных средств и методов.	<p>экспериментальных исследований.</p> <p>ИД_ПК-4.2. Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования.</p> <p>ИД_ПК-4.3. Демонстрирует навыки проведения исследований с применением современных средств и методов.</p>	<p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> методами расшифровки масс-спектров, спектров РОР и оже-спектров, приемами проведения количественного анализа химического состава поверхности.
---	--	--

4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины **Методы анализа поверхности** составляет **4** зачетные единицы, **144** часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости
			Контактная работа						Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационные испытания	самостоятельная работа	
1	Введение в физику поверхности. Техника получения сверхвысокого вакуума Классификация методов анализа поверхности.	11	1					2	Фронтальный опрос
2	Растровая электронная микроскопия и сканирующая зондовая микроскопия.	11	4		4	1		20	Фронтальный опрос
3	Растровая электронная оже-спектроскопия и	11	4		3	1		20	Фронтальный опрос

	фотоэлектронная спектроскопия.								
4	Вторично-ионная масс-спектрометрия	11	5		10	2		20	Фронтальный опрос
5	Метод Резерфордского обратного рассеяния	11	3			1		10	Фронтальный опрос
6	Лабораторные занятия				17				Защита отчетов по выполненным лабораторным работам
							0,5	33,5	Экзамен
	Всего		17		17	4	0,5	105,5	

Содержание разделов дисциплины

Раздел 1

Особенности структуры поверхности. Вакуумная техника и способы очистки поверхности. Методы изучения морфологии поверхности (РЭМ, СТМ, АСМ и др.) Методы изучения состава поверхности (ВИМС, РЭОС, ЭСХА, РОР)

Раздел 2

Взаимодействие электронного пучка с поверхностью. Упругое и неупругое рассеяние. Область взаимодействия. Экспериментальные зависимости коэффициентов вторичной электронной эмиссии и отраженных электронов. Формирование изображения в растровом электронном микроскопе: формирование и характеристики первичного электронного пучка; сканирование; увеличение; глубина фокуса. Детекторы отраженных и вторичных электронов. Типы контрастов. Физические основы СЗМ. Аппаратура СЗМ.

Раздел 3

Физические основы методы РЭОС. Оже-эффект; глубина выхода оже-электронов; сечение ионизации; химический сдвиг. Уширение линий в оже-спектрах твердого тела. Блок-схема оже-спектрометра. Энергоанализаторы и их характеристики. Детекторы оже-электронов. Послойный анализ. Количественный анализ: метод эталонов, использование коэффициентов относительной чувствительности. Физические основы и аппаратура фотоэлектронной спектроскопии.

Раздел 4

Взаимодействие ионов с поверхностью. Распыление. Основные экспериментальные зависимости коэффициента распыления и распределения распыленных частиц. Теоретические модели распыления. Компьютерное моделирование распыления. Вторичная ионная эмиссия (ВИЭ). Основные экспериментальные зависимости коэффициента ВИЭ. Теоретические модели (ВИЭ). Блок-схема вторично-ионного масс-спектрометра. Ионные пушки, система формирования первичного пучка, масс-анализаторы, детекторы вторичных ионов. Магнитные, квадрупольные и времяпролетные ВИМС: сравнение их возможностей. Статический и динамический ВИМС-анализ. Возможности проведения количественного анализа. Вторично-атомные масс-анализаторы и их возможности. Способы постионизации распыленных нейтральных частиц.

Раздел 5

Упругое взаимодействие ускоренных ионов с поверхностью. Опыты Резерфорда, сечение взаимодействия ионов с атомами поверхности. Количественный и послойный анализ поверхности. Программы обработки спектров РОР. Блок-схема установки РОР. Ускорители Ван дер Ваальсовского и тандемного типа. Детекторы рассеянных ионов.

Раздел 6

Изучение проведения работ и методик измерений на установках РЭМ, РЭОС, магнитного и времяпролетного ВИМС, РОР.

5. Образовательные технологии

Практическая реализация концепции проблемного обучения, которое представляет собой систему методов и средств обучения, направленных на моделирование реального творческого процесса путем создания проблемной ситуации и управления поиском решения проблемы. Усвоение новых знаний при этом происходит как самостоятельное открытие их студентами с помощью преподавателя. Использование образовательных Интернет-ресурсов.

6. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

В процессе осуществления образовательного процесса используются:

Windows Pro 7 RUS

Microsoft Office Std 2013

Microsoft Imagine Premium Electronic Software Delivery (1 year) (Visual Studio Enterprise)

– для поиска учебной литературы библиотеки ЯрГУ – Автоматизированная библиотечная информационная система "БУКИ-NEXT" (АБИС "Буки-Next").

7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

1. Д. Вудраф, Т. Делчар Современные методы исследования поверхности М. Мир 1989 568 с.
2. А. Зандерна Методы анализа поверхности М. Мир 1979 582 с.
3. Л. Фелдман, Д. Майер Основы анализа поверхности и тонких пленок М. Мир 1989 344 с.

б) дополнительная литература:

1. Т.Л. Алфорд, Л.К. Фелдман, Д.В. Майер Фундаментальные основы анализа нанопленок М. Научный мир 2012 392 с.
2. Никитенков Н.Н. Основы анализа поверхности твердых тел методами атомной физики [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.Н. Никитенков. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 203 с. — 978-5-4387-0349-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34691.html>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

1. Федеральный портал «Информика» <http://www.informika.ru/> и его проекты
2. Сайт ЦКП «Диагностика микро и наноструктур» <http://www.nano.yar.ru>
Использование специализированного программного обеспечения не требуется

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Аудиторный фонд физического факультета. Мультимедийный проектор. Оборудование Центра коллективного пользования «Диагностика микро- и наноструктур» Компьютерные классы с доступом в Интернет. Библиотека университета.

Автор:

Профессор базовой кафедры
нанотехнологий в электронике, д.ф.-м.н.
должность, ученая степень

подпись

В.И. Бачурин
И.О. Фамилия

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
«Методы анализа поверхности»**

**Фонд оценочных средств
для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания и иные материалы,
используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

Вопросы к экзамену в 11 семестре.

1. Особенности структуры поверхности. Поверхностные свойства: движение электронов, движение атомов, адсорбция атомов и молекул.
2. Вакуумная техника и способы очистки поверхности.
3. Классификация методов анализа поверхности.
4. Взаимодействие электронного пучка с поверхностью. Упругое и неупругое рассеяние. Формула Бете. Область взаимодействия.
5. Экспериментальные зависимости коэффициентов вторичной электронной эмиссии и отраженных электронов.
6. Формирование изображения в растровом электронном микроскопе: формирование и характеристики первичного электронного пучка; сканирование; увеличение; глубина фокуса.
7. Детекторы отраженных и вторичных электронов. Типы контрастов. Стратегия получения изображения в растровом электронном микроскопе.
8. Физические принципы работы сканирующего туннельного микроскопа. Устройство СТМ, режимы работы СТМ.
9. Физические основы метода растровой электронной оже-спектроскопии. Оже-эффект; глубина выхода оже-электронов; сечение ионизации; химический сдвиг. Уширение линий в оже-спектрах твердого тела.
10. Блок-схема оже-спектрометра. Энергоанализаторы и их характеристики (АЦЗ, ПСА). Детекторы электронов.
11. Послойный анализ. Количественный анализ: метод эталонов, использование коэффициентов относительной чувствительности.
12. Физические основы фотоэлектронной спектроскопии. Блок-схема фотоэлектронных спектрометров.
13. Распыление. Основные экспериментальные зависимости коэффициента распыления и распределения распыленных частиц.
14. Теоретические модели распыления. Режим прямого выбивания, каскадный механизм П. Зигмунда, режим тепловых пиков.
15. Компьютерное моделирование распыления. Метод Монте-Карло и метода молекулярной динамики.
16. Вторичная ионная эмиссия (ВИЭ). Основные экспериментальные зависимости коэффициента ВИЭ.
17. Теоретические модели (ВИЭ). Термодинамическая модель, кинетическая модель, электронно-обменные модели.
18. Блок-схема вторично-ионного масс-спектрометра. Ионные пушки, система формирования первичного пучка, масс-анализаторы, детекторы вторичных ионов.
19. Магнитные, квадрупольные и времяпролетные ВИМС: сравнение их возможностей. Статический и динамический ВИМС-анализ. Возможности проведения количественного

анализа.

20. Способы пост-ионизации распыленных нейтральных частиц. Вторично-атомные масс-анализаторы и их возможности.
21. Физические основы метода Резерфордского обратного рассеяния. Сечение взаимодействия ионов и атомов поверхности, количественный и послойный анализ.
22. Блок-схема установки РОР. Ускорители первичных пучков. Детекторы рассеянных ионов.

Правила выставления оценки на экзамене.

В экзаменационный билет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

Оценка «Отлично» выставляется студенту, который демонстрирует глубокое и полное владение содержанием материала и понятийным аппаратом методов анализа поверхности; осуществляет межпредметные связи; умеет связывать теорию с практикой. Студент дает развернутые, полные и четкие ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, соблюдает логическую последовательность при изложении материала. Грамотно использует терминологию физических основ электроники.

Оценка «Хорошо» выставляется студенту, ответ которого на экзамене в целом соответствует указанным выше критериям, но отличается меньшей обстоятельностью, глубиной, обоснованностью и полнотой. В ответе имеют место отдельные неточности (несущественные ошибки), которые исправляются самим студентом после дополнительных и (или) уточняющих вопросов экзаменатора.

Оценка «Удовлетворительно» выставляется студенту, который дает недостаточно полные и последовательные ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, но при этом демонстрирует умение выделить существенные и несущественные признаки и установить причинно-следственные связи. Ответы излагаются в терминах физических основ электроники, но при этом допускаются ошибки в определении и раскрытии некоторых основных понятий, формулировке положений, которые студент затрудняется исправить самостоятельно. При аргументации ответа студент не обосновывает свои суждения. На часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Неудовлетворительно» выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов студента. На основную часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Неудовлетворительно» выставляется также студенту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.

Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Методы анализа поверхности»

Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Методы анализа поверхности» являются лекции. Особое внимание на лекциях отводится изучению основных методов анализа поверхности, экспериментальные установки которых имеются в Ярославском филиале Физико-технологического института им. К. А. Валиева РАН.

Одной из главных целей освоения дисциплины ставится формирование широкого профессионального кругозора и усвоения основных методов анализа поверхности и тонкопленочных структур. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на лабораторных занятиях, консультациях, из учебной литературы. Большое количество вопросов на лекциях способствуют установлению более тесного взаимного понимания в системе преподаватель – группа.

Курс продолжается один семестр, итоговым контрольным мероприятием является экзамен. Для получения допуска к экзамену необходимо своевременное и полное выполнение лабораторных работ. Это обстоятельство не указывает на необходимость выполнения лабораторных работ в высоком темпе. Напротив, практика показывает, что поспешное выполнение лабораторных измерений является причиной повторного выполнения лабораторной работы. Безопасность проведения работ должна быть в приоритете перед любыми факторами, требующими ускоренного проведения измерений.

Экзамен является двухуровневым – минимум – для претендующих на оценку «удовлетворительно» представляет собой набор из определенного количества вопросов, на которые нужно ответить кратко с итоговым результатом не менее 90% успешно выполненных заданий. Претендующие на более высокие оценки после прохождения минимума сдают классический устный экзамен по билетам.