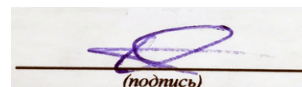


**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова**

Базовая кафедра нанотехнологий в электронике в  
ЯФ ФГБУН «Физико-технический институт» РАН

**УТВЕРЖДАЮ**

Декан физического факультета



(подпись)

И.С. Огнев

23 мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Физические методы исследования микро- и наноструктур»**

Направление подготовки  
11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Направленность (профиль)  
«Интегральная электроника и наноэлектроника»

Форма обучения  
очная

Программа одобрена  
на заседании кафедры  
от «30» марта 2023 года, протокол № 8

Программа одобрена НМК  
физического факультета  
протокол № 5 от «25 » апреля 2023 года

Ярославль

### 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Физические методы исследования микро- и наноструктур» является:

- изучение явлений взаимодействия атомных частиц и полей, лежащих в основе методов исследования химического состава, топографии, кристаллической и электронной структуры поверхности твердых тел;
- 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 ОП бакалавриата

Дисциплина физические методы исследования микро- и наноструктур относится к вариативной части профессионального цикла.

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. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП бакалавриата

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:

Код компетенции	Формулировка компетенции	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>		
<b>ОПК-7</b>	способностью учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности	<b>Знать:</b> современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности; <b>Уметь:</b> использовать основные приемы обработки и представления экспериментальных данных; <b>Владеть:</b> приемами обработки и представления экспериментальных данных.
<b>Профессиональные компетенции</b>		
<b>ПК-2</b>	Способностью аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального	<b>Знать:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– основные физические законы, лежащие в основе современных методов исследования микро- и наноструктур;</li><li>– принципы работы вторично-ионной масс-спектрометрии, растровой электронной оже-спектрометрии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, растровой электронной микроскопии, сканирующей зондовой микроскопии;</li></ul>

Код компетенции	Формулировка компетенции	Перечень планируемых результатов обучения
	назначения.	– общую методику физического эксперимента с использованием установок для исследования свойств поверхности.
		<b>Уметь:</b> – произвести выбор метода и тип прибора для получения информации о составе и структуре поверхности объектов микро и нанoeлектроники
		<b>Владеть:</b> – основными физическим принципами работы различных методов анализа и диагностики микро- и наноструктур – критериями и навыками выбора оптимального метода анализа для проведения исследований микро и наносиструктур

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единиц, 108 акад.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  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Контактная работа						
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационные испытания	самостоятельная работа	
1	Общее понятие методов диагностики и роль сверхвысокого вакуума; способы получения и контроля вакуума.	8	2		5	1		6	Фронтальный опрос
2	Оже электронная спектроскопия и фотоэлектронная спектроскопия	8	2			1		10	Фронтальный опрос
3	Просвечивающая и растровая электронная микроскопия	8	3			1		10	Фронтальный опрос
4	Вторично-ионная масс-спектрометрия	8	4		20	1		18	Фронтальный опрос
5	Методы сканирующей зондовой микроскопии	8	3		10	1		10	Фронтальный опрос

6	Лабораторные занятия				35				Защита отчетов по выполненным лабораторным работам
									Зачет
	<b>Всего</b>		<b>14</b>		<b>35</b>	<b>5</b>		<b>54</b>	

#### Содержание разделов дисциплины:

##### 1. Тема 1.

Общее понятие методов диагностики. Зондирующие пучки и частицы. Необходимость проведения диагностики и анализа микро- и наноструктур в контролируемых условиях сверхвысокого вакуума. Основные понятия техники сверхвысокого вакуума. Материалы СВВ камер и изделий. Классификация и типы насосов.

##### 2. Тема 2.

Оже электронная спектроскопия (ЭОС). Схема оже-процесса в терминах атомных уровней энергии. Основные свойства РЭОС: глубина выхода оже электронов, сечение ионизации, вероятность оже процесса, химический сдвиг. Блок-схема электронного оже-спектрометра. Энергоанализаторы и их характеристики. Детекторы оже-электронов. Виды оже-спектров и количественное определение состава образца на основании оже-спектроскопии. Типичные параметры, возможности и разрешение оже электронной спектроскопии. Физические основы и аппаратура фотоэлектронной спектроскопии.

##### 3. Тема 3.

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. Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ). Аналогия с оптическим микроскопом и де-Бройлевская длина волны электрона. Принципиальная схема получения изображения в ПЭМ.

##### 4. Тема 4.

Взаимодействие ионов с поверхностью. Распыление и вторично-ионная эмиссия (ВИЭ). Основные экспериментальные зависимости коэффициента распыления и ВИЭ. Теоретические модели распыления и 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.

##### 5. Тема 5.

###### 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. 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. 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.

##### 6. Тема 6.

Получение сверхвысокого вакуума на установке ВАМС с использованием форвакуумного, сорбционных, магниторазрядного и титанового сублимационного насосов. Снятие спектров остаточной атмосферы с помощью комплекса квадрупольного масс-спектрометра МС 7303. Получение масс-спектров вторичных ионов кремния. Исследование морфологии углеродных пленок с помощью СТМ и АСМ.

## **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.

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

**Академическая лекция** (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов.

**Лабораторное занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

На лабораторных занятиях студенты выполняют экспериментальные работы поставленные под руководством (контролем) преподавателя. Знакомятся с экспериментальными установками, проводят эксперименты, обрабатывают полученные результаты, оформляют в виде отчета и защищают их.

**Консультации** – групповые занятия, являющиеся одной из форм контроля самостоятельной работы студентов. На консультациях по просьбе студентов рассматриваются наиболее сложные моменты при освоении материала дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы студентов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы, обсуждаются результаты решения заданий, выполненных студентами самостоятельно.

## **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:

– для формирования текстовых и графических материалов промежуточной и текущей аттестации – программы Microsoft Office, графический редактор Inkscape;

– 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. 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>

**б) дополнительная литература:**

3. Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко Кремний – материал нанoeлектроники Москва «Техносфера» 2006, 352 с.

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

Федеральный портал «Информика» <http://www.informika.ru/> и его проекты

Сайт ЦКП «Диагностика микро и наноструктур» <http://www.nano.yar.ru>

Использование специализированного программного обеспечения не требуется

**8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

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

Автор:

Профессор кафедры нанотехнологий в электронике, д.ф.-м.н., доцент.

В.И. Бачурин

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Физические методы исследования микро- и наноструктур»**

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

**Вопросы к экзамену в 8 семестре**

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

**2. Перечень компетенций, этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкалы оценивания**

## 2.1 Шкала оценивания сформированности компетенций и ее описание

Оценивание уровня сформированности компетенций в процессе освоения дисциплины осуществляется по следующей трехуровневой шкале:

**Пороговый уровень** - предполагает отражение тех ожидаемых результатов, которые определяют минимальный набор знаний и (или) умений и (или) навыков, полученных студентом в результате освоения дисциплины. Пороговый уровень является обязательным уровнем для студента к моменту завершения им освоения данной дисциплины.

**Продвинутый уровень** - предполагает способность студента использовать знания, умения, навыки и (или) опыт деятельности, полученные при освоении дисциплины, для решения профессиональных задач. Продвинутый уровень превосходит пороговый уровень по нескольким существенным признакам.

**Высокий уровень** - предполагает способность студента использовать потенциал интегрированных знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, полученных при освоении дисциплины, для творческого решения профессиональных задач и самостоятельного поиска новых подходов в их решении путем комбинирования и использования известных способов решения применительно к конкретным условиям. Высокий уровень превосходит пороговый уровень по всем существенным признакам.



**Методические рекомендации преподавателю  
по процедуре оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности,  
характеризующих этапы формирования компетенций**

Целью процедуры оценивания является определение степени овладения студентом ожидаемыми результатами обучения (знаниями, умениями, навыками и (или) опытом деятельности).

Процедура оценивания степени овладения студентом ожидаемыми результатами обучения осуществляется с помощью методических материалов, представленных в разделе «Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций»

**3.1 Критерии оценивания степени овладения знаниями, умениями, навыками и (или) опытом деятельности, определяющие уровни сформированности компетенций**

**Пороговый уровень** (общие характеристики):

- владение основным объемом знаний по программе дисциплины;
- знание основной терминологии данной области знаний, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы без существенных ошибок;
- владение инструментарием дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках рабочей программы дисциплины;
- усвоение основной литературы, рекомендованной рабочей программой дисциплины;
- знание базовых теорий, концепций и направлений по изучаемой дисциплине;
- самостоятельная работа на лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, достаточный уровень культуры исполнения заданий.

**Продвинутый уровень** (общие характеристики):

- достаточно полные и систематизированные знания в объёме программы дисциплины;
- использование основной терминологии данной области знаний, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно решать сложные задачи (проблемы) в рамках рабочей программы дисциплины;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной рабочей программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

**Высокий уровень** (общие характеристики):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам дисциплины;
- точное использование терминологии данной области знаний, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- безупречное владение инструментарием дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;

- способность самостоятельно и творчески решать сложные задачи (проблемы) в рамках рабочей программы дисциплины;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной рабочей программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- активная самостоятельная работа на лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

### **3.2 Описание процедуры выставления оценки**

В зависимости от уровня сформированности каждой компетенции по окончании освоения дисциплины студенту выставляется оценка. Для дисциплин, изучаемых в течение нескольких семестров, оценка может выставляться не только по окончании ее освоения, но и в промежуточных семестрах. Вид оценки, («зачтено», «незачтено») определяется рабочей программой дисциплины в соответствии с учебным планом.

Оценка «зачет» выставляется студенту, у которого каждая компетенция (полностью или частично формируемая данной дисциплиной) сформирована не ниже, чем на пороговом уровне.

Оценка «незачтено» выставляется студенту, у которого хотя бы одна компетенция (полностью или частично формируемая данной дисциплиной) сформирована ниже, чем на пороговом уровне.