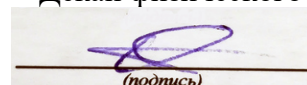


**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова**

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

**УТВЕРЖДАЮ**  
Декан физического факультета



И.С. Огнев

«23» мая 2023 г.

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

Направление подготовки  
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)  
« Интегральная электроника и нанoeлектроника »

Форма обучения  
очная

Программа одобрена  
на заседании кафедры  
от «30» марта 2023 г. протокол №8

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

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:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>		
<b>Профессиональные компетенции</b>		
ПК-5. Способен делать научно-обоснованные выводы по результатам теоретических и экспериментальных исследований, давать рекомендации по совершенствованию устройств и систем, готовить научные публикации и заявки на изобретения.	ИД_ПК-5.1. Знает принципы проведения анализа полноценности и эффективности экспериментальных исследований.  ИД_ПК-5.2. Демонстрирует умение подготавливать научные публикации на основе результатов исследований.  ИД_ПК-5.3. Имеет навыки подготовки заявок на изобретения.	<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><li>– общую методику физического эксперимента с использованием установок для исследования свойств поверхности.</li></ul>
		<b>Уметь:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– произвести выбор метода и тип прибора для получения</li></ul>

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
		<p>информации о составе и структуре поверхности объектов микро и нанoeлектроники</p> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– основными физическим принципами работы различных методов анализа и диагностики микро- и наноструктур</li> <li>– критериями и навыками выбора оптимального метода анализа для проведения исследований микро и наноструктур</li> </ul>

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

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных единиц, 72 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
			Контактная работа						Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационные испытания	самостоятельная работа	
1	Общее понятие методов диагностики и роль сверхвысокого вакуума; способы получения и контроля вакуума.	8	2					1,7	Фронтальный опрос
2	Оже электронная спектроскопия и фотоэлектронная спектроскопия	8	4			0,5		7	Фронтальный опрос
3	Просвечивающая и растровая электронная микроскопия	8	4			1		5	Фронтальный опрос
4	Вторично-ионная масс-спектрометрия	8	6		10	1		10	Фронтальный опрос
5	Методы сканирующей зондовой микроскопии	8	4		10	0,5		5	Фронтальный опрос
6	Лабораторные занятия				20				Защита отчетов по выполненным

									лабораторным работам
							0,3	28,7	Зачет
	<b>Всего</b>		<b>20</b>		<b>20</b>	<b>3</b>	<b>0,3</b>	<b>28,7</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.

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, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

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**

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  
«Физические методы исследования микро- и наноструктур»**

**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 зачету 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.

**Правила выставления оценки на зачете**

В билеты на зачет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам зачета выставляется одна из оценок: «зачтено», «не зачтено».

**Оценка «Зачтено»** выставляется студенту, который демонстрирует глубокое и полное владение содержанием материала и понятийным аппаратом курса «Физические методы исследования микро- и наноструктур»; 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.

**Оценка «Не зачтено»** 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 «Не зачтено» выставляется также студенту, который взял билет, но отвечать отказался.



## **Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Физические методы исследования микро- и наноструктур»**

### **Методические указания для студентов по освоению дисциплины**

В ходе лекций преподаватель излагает и разъясняет основные, наиболее сложные понятия темы, а также связанные с ней теоретические и практические проблемы, дает рекомендации на выполнение самостоятельной работы. В ходе лекций обучающимся рекомендуется:

- вести конспектирование учебного материала;
- обращать внимание на определения понятий, формулировки законов и их математическое выражение, положения, раскрывающие содержание тех или иных явлений и процессов, научные выводы и практические рекомендации по их применению;
- задавать преподавателю уточняющие вопросы с целью уяснения теоретических положений.

Для успешного овладения курсом необходимо посещать все лекции, так как тематический материал взаимосвязан между собой. В случаях пропуска занятия студенту необходимо самостоятельно изучить материал и ответить на контрольные вопросы по пропущенной теме во время индивидуальных консультаций. Следует помнить, что лекционный конспект является не материалом для подготовки, а скорее развернутым планом для дальнейшей самостоятельной проработки материала

Практические занятия – это одна из активных форм учебного процесса. Большая часть тем дисциплины носит практический характер, т.е. предполагает решение задач, анализ практических ситуаций. При подготовке к практическим занятиям обучающемуся необходимо освоить теоретическую основу по теме практического занятия, быть готовым к дискуссионному обсуждению.

Индивидуальное домашнее задание или контрольная работа представляют собой изложение в письменном виде результатов теоретического анализа или решение задачи по определенной теме. При необходимости проводятся консультации по разбору заданий для самостоятельной работы, которые вызвали затруднения.

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала, приобретенных практических навыков работы и проведения расчетов, в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в виде проверки выполнения заданий для внеаудиторного решения и контрольной работы.

Для самостоятельного подбора литературы в библиотеке ЯрГУ рекомендуется использовать:

**1. Личный кабинет** ([http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_login.php](http://lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_login.php)) дает возможность получения on-line доступа к списку выданной в автоматизированном режиме литературы, просмотра и копирования электронных версий изданий сотрудников университета (учеб. и метод. пособия, тексты лекций и т.д.) Для работы в «Личном кабинете» необходимо зайти на сайт Научной библиотеки ЯрГУ с любой точки, имеющей доступ в Internet, в пункт меню «Электронный каталог»; пройти процедуру авторизации, выбрав вкладку «Авторизация», и заполнить представленные поля информации.

**2. Электронная библиотека учебных материалов ЯрГУ** ([http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)) содержит более 2500 полных текстов учебных и учебно-методических материалов по основным изучаемым дисциплинам, изданных в университете. Доступ в сети университета, либо по логину/пароллю.

**3. Электронная картотека «Книгообеспеченность»** ([http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_bookreq\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_bookreq_find.php)) раскрывает учебный фонд научной библиотеки ЯрГУ, предоставляет оперативную информацию о состоянии книгообеспеченности дисциплин основной и дополнительной литературой, а также цикла

дисциплин и специальностей. Электронная картотека [«Книгообеспеченность»](#) доступна в сети университета и через Личный кабинет.