

**Министерство науки и высшего образования РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

---

Направление подготовки/специальность: 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Наименование образовательной программы: Твердотельная микро- и нанoeлектроника

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ**  
**ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Блок:	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
Часть образовательной программы:	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
№ дисциплины по учебному плану:	Б1.Ч.09.01.02
Трудоемкость в зачетных единицах:	3 семестр - 5;
Часов (всего) по учебному плану:	180 часов
Лекции	3 семестр - 32 часа;
Практические занятия	3 семестр - 32 часа;
Лабораторные работы	не предусмотрено учебным планом
Консультации	проводится в рамках часов аудиторных занятий
Самостоятельная работа	3 семестр - 115,7 часов;
в том числе на КП/КР	не предусмотрено учебным планом
Иная контактная работа	проводится в рамках часов аудиторных занятий
включая: Проверочная работа Контрольная работа Расчетно-графическая работа	
Промежуточная аттестация:	
Зачет с оценкой	3 семестр - 0,3 часа;

**Москва 2023**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

(должность)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Баринов А.Д.
	Идентификатор	Ra98e1318-BarinovAD-f138ec4f

(подпись)

А.Д. Баринов

(расшифровка подписи)

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной  
программы

(должность, ученая степень, ученое звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Баринов А.Д.
	Идентификатор	Ra98e1318-BarinovAD-f138ec4f

(подпись)

А.Д. Баринов

(расшифровка подписи)

Заведующий  
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Мирошникова И.Н.
	Идентификатор	Rd1db27a5-MiroshnikovaIN-70caf8c

(подпись)

И.Н.

Мирошникова

(расшифровка подписи)

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** состоит в изучении методов исследования поверхности полупроводников, а также применяемом для этого оборудовании

### Задачи дисциплины

- освоение информации о физических основах, а также средствах современных методов исследования поверхности полупроводников;
- развитие способности аргументированно выбирать информацию о методах и средствах исследования поверхности полупроводников.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ОПК-1 способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблем, определять пути их решения и оценивать эффективность сделанного выбора	ИД-1 <sub>ОПК-1</sub> Знает тенденции и перспективы развития электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники	знать: - перспективные методы исследования.
ПК-1 Способен участвовать в проектировании полупроводниковых приборов и / или интегральных схем	ИД-2 <sub>ПК-1</sub> Демонстрирует знание методов контроля производства и исследования полупроводниковых структур	знать: - физические основы и аппаратную реализацию электронных и рентгеновских методов исследования поверхности полупроводников и тонких плёнок; - проблемы физики поверхности; - физические основы и аппаратную реализацию ионных методов исследования поверхности полупроводников и тонких плёнок.  уметь: - проводить анализ и расчёт параметров для электронной и рентгеновской спектроскопий; - проводить анализ и расчёт параметров для ионной спектроскопии.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Твердотельная микро- и наноэлектроника (далее – ОПОП), направления подготовки 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, уровень образования: высшее образование - магистратура.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать Энергетическое строение атома

- знать Квантовую теорию строения атома (квантовые числа)

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания
				Контактная работа							СР			
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль	
КПР	ГК	ИККП	ТК											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Фундаментальные и прикладные проблемы физики поверхности твёрдого тела	10.0	3	2.0	-	2.0	-	-	-	-	-	6	-	<p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Фундаментальные и прикладные проблемы физики поверхности твёрдого тела"</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Фундаментальные и прикладные проблемы физики поверхности твёрдого тела"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], с. 197-229. [2], с. 11-31, 33-65</p>
1.1	Поверхность	3.0		0.5	-	0.5	-	-	-	-	-	2	-	
1.2	Вакуум	3.0		0.5	-	0.5	-	-	-	-	-	2	-	
1.3	Классификация аналитических методов исследования поверхности	4		1	-	1	-	-	-	-	-	2	-	
2	Ионная спектроскопия	64		10	-	10	-	-	-	-	-	44	-	<p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Ионная спектроскопия"</p> <p><b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> В рамках расчетного задания выполняется расчёт и построение спектра обратного рассеяния. Задание выполняется индивидуально по вариантам.</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Ионная спектроскопия"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], с. 56-60, 125-127</p>
2.1	Методы ионной спектроскопии	54		8	-	8	-	-	-	-	-	38	-	
2.2	Масс-спектроскопия вторичных ионов	10		2	-	2	-	-	-	-	-	6	-	

													[2], с. 33-65, 67-98, 99-135, 137-175
3	Электронная и рентгеновская спектроскопия	78	16	-	18	-	-	-	-	-	44	-	<b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Электронная и рентгеновская спектроскопия"
3.1	Методы электронной спектроскопии	54	12	-	12	-	-	-	-	-	30	-	<b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> В рамках расчетного задания выполняется расчёт параметров рентгеновского спектра. Задание выполняется индивидуально по вариантам.
3.2	Методы рентгеновской спектроскопии	24	4	-	6	-	-	-	-	-	14	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Электронная и рентгеновская спектроскопия"
													<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], с. 479-491 [4], с. 19-55, 107-118, 200-226
4	Перспективные методы анализа. Сравнительный анализ методов	10	4	-	2	-	-	-	-	-	4	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу
4.1	Перспективные методы анализа	10	4	-	2	-	-	-	-	-	4	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], с.119-132, 167-168 [2], с. 231-264
	Зачет с оценкой	18.0	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	17.7	
	Всего за семестр	180.0	32.0	-	32.0	-	-	-	-	0.3	98	17.7	
	Итого за семестр	180.0	32.0	-	32.0	-	-	-	-	0.3	115.7		

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПР – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

## 3.2 Краткое содержание разделов

### 1. Фундаментальные и прикладные проблемы физики поверхности твёрдого тела

#### 1.1. Поверхность

Фундаментальные и прикладные проблемы физики поверхности твёрдого тела. Поверхность как разновидность дефектов твёрдого тела. Поверхность и межфазовые границы раздела в технологии полупроводниковой электроники, создание сверхрешётки методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

#### 1.2. Вакуум

Условия возможности исследования поверхности на атомарном уровне. Сверхвысокий вакуум, загрязнения, очистка, адсорбция на поверхности.

#### 1.3. Классификация аналитических методов исследования поверхности

Классификация аналитических методов исследования поверхности и тонких плёнок.

### 2. Ионная спектроскопия

#### 2.1. Методы ионной спектроскопии

Методы ионной спектроскопии. Кинетика упругих столкновений. Спектроскопия рассеяния медленных ионов (РМИ), аппаратная реализация. Структурные эффекты в РМИ. Спектроскопия обратного рассеяния Резерфорда (РОР). Поверхностно-барьерные датчики заряженных частиц. Потери энергии лёгких ионов высоких энергий в твёрдых телах. Ширина и форма спектра энергетических потерь ионов в обратном рассеянии. Получение распределений по глубине с помощью обратного рассеяния Резерфорда (РОР). Разрешение по глубине. Распыление ионами. Выход продуктов распыления. Чувствительность метода РОР.

#### 2.2. Масс-спектроскопия вторичных ионов

Масс-спектроскопия вторичных ионов (МСВИ). Методы детектирования вторичных ионов. Избирательное распыление элементов и анализ их распределения по глубине. Уширение внутренней границы раздела и ионное перемешивание. Приборные факторы, влияющие на разрешение по глубине. Статический и динамический режим МСВИ. Количественный анализ. Ионный микроскоп. Масс-спектроскопия вторичных нейтральных частиц.

### 3. Электронная и рентгеновская спектроскопии

#### 3.1. Методы электронной спектроскопии

Методы электронной спектроскопии. Электронные спектрометры: анализаторы задерживающего потенциала (АЗП), отклоняющие электростатические анализаторы. Электронный микроанализ. Излучательные переходы. Дипольные правила отбора, вероятность излучательных переходов. Анализаторы рентгеновского излучения. Количественный анализ. Электронная Оже-спектроскопия (ЭОС). Неизлучательные переходы. Кинетическая энергия эмитированных Оже-электронов. Энергетические уровни, химические сдвиги и форма пиков. Вероятность KLL-переходов в водородоподобном атоме. Выход Оже-электронов и флюоресценция. Ширина атомных уровней и времена жизни. Аппаратурная реализация метода. Количественный анализ. Оже-электронная микроскопия. Применение ЭОС для получения профилей концентрации в структурах микроэлектроники.

### 3.2. Методы рентгеновской спектроскопии

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Поглощение фотонов в твёрдых телах. Вероятность переходов. Фотоэлектрический эффект в приближении прямоугольной ямы. Поглощение рентгеновского излучения. Растянутая тонкая структура рентгеновского поглощения как метод исследования поверхности. Экспериментальная техника. Источники излучения. Кинетическая энергия фотоэлектронов. Энергетический спектр фотоэлектронов. Химические сдвиги фотоэлектронных пиков. Структурные эффекты в РФЭС. Количественный анализ. Примеры использования метода в технологическом контроле ИС.. Ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия (УФЭС). Источники излучения в УФЭС, использование синхротронного излучения. Использование УФЭС для излучения зонной структуры. Примеры. Спектроскопия тонкой структуры края рентгеновского поглощения.

### 4. Перспективные методы анализа. Сравнительный анализ методов

#### 4.1. Перспективные методы анализа

Перспективные методы анализа: туннельная спектроскопия, спектроскопия характеристических потерь энергии электронов, атомно-силовая микроскопия. Сравнительный анализ методов.

### 3.3. Темы практических занятий

1. Проблемы физики поверхности;
2. Ионные методы исследования;
3. Электронные и рентгеновские методы исследования;
4. Перспективные методы исследования.

### 3.4. Темы лабораторных работ

не предусмотрено

### 3.5 Консультации

#### Текущий контроль (ТК)

1. 1. Что такое оже-процесс? 2. Какие различают виды оже-переходов? Что называют переходом Костера-Кронига и суперпереходом Костера-Кронига? 3. Чем определяется энергия оже-электрона? Как она связана с энергией первичного пучка электронов? 4. Как выглядит область взаимодействия первичного пучка электронов с твёрдым телом? 5. Почему оже-электронная спектроскопия обладает поверхностной чувствительностью? 6. Почему оже-электронная спектроскопия обладает повышенной чувствительностью к лёгким элементам? 7. Какие энергии характерны для оже-электронов в ОЭС? 8. Почему принято дифференцировать спектр электронов в ОЭС? 9. Чем определяется энергетическая ширина пика в оже-спектре? Какое фундаментальное ограничение формирует минимально возможную ширину пика? 10. Почему ОЭС позволяет проводить качественный анализ элементного состава поверхности? 11. Каким образом осуществляется количественный анализ элементного состава поверхности? 12. Почему возможно проведение химического анализа состава поверхности (определение химических связей)? Что такое "химический сдвиг"? 13. Благодаря чему можно изучать энергетическую структуру валентной зоны методом ОЭС?

### 3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ

Курсовой проект/ работа не предусмотрены

### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)				Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	3	4	
<b>Знать:</b>						
перспективные методы исследования	ИД-1 <sub>ОПК-1</sub>				+	Проверочная работа/Опрос по теме "Перспективные методы исследования"
физические основы и аппаратную реализацию ионных методов исследования поверхности полупроводников и тонких плёнок	ИД-2 <sub>ПК-1</sub>		+			Контрольная работа/Контрольная работа по теме: «Ионная спектроскопия»
проблемы физики поверхности	ИД-2 <sub>ПК-1</sub>	+				Проверочная работа/Опрос по теме "Проблемы физики поверхности"
физические основы и аппаратную реализацию электронных и рентгеновских методов исследования поверхности полупроводников и тонких плёнок	ИД-2 <sub>ПК-1</sub>			+		Контрольная работа/Контрольная работа по теме: «Электронная спектроскопия»
<b>Уметь:</b>						
проводить анализ и расчёт параметров для ионной спектроскопии	ИД-2 <sub>ПК-1</sub>		+			Контрольная работа/Контрольная работа по теме: «Ионная спектроскопия» Расчетно-графическая работа/Расчётное задание по теме "Резерфордовское обратное рассеяние"
проводить анализ и расчёт параметров для электронной и рентгеновской спектроскопий	ИД-2 <sub>ПК-1</sub>			+		Контрольная работа/Контрольная работа по теме: «Электронная спектроскопия» Расчетно-графическая работа/Расчётное задание по теме "Рентгеноспектральный микроанализ"

## **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

**3 семестр**

Форма реализации:

1. Расчётное задание по теме "Рентгеноспектральный микроанализ" (Расчетно-графическая работа)

Форма реализации: Билеты (письменный опрос)

1. Контрольная работа по теме: «Ионная спектроскопия» (Контрольная работа)
2. Контрольная работа по теме: «Электронная спектроскопия» (Контрольная работа)
3. Опрос по теме "Перспективные методы исследования" (Проверочная работа)
4. Опрос по теме "Проблемы физики поверхности" (Проверочная работа)

Форма реализации: Компьютерное задание

1. Расчётное задание по теме "Резерфордовское обратное рассеяние" (Расчетно-графическая работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

*Зачет с оценкой (Семестр №3)*

В диплом выставляется оценка за 3 семестр.

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Праттон, М. Введение в физику поверхности : пер. с англ. / М. Праттон . – Ижевск : РХД, 2000 . – 256 с. – (Науки о Земле) . - ISBN 5-939720-10-2 .;
2. Пул, Ч. Нанотехнологии : учебное пособие по направлению "Нанотехнологии" : пер. с англ. / Ч. Пул, Ф. Оуэнс . – 5-е изд., испр. и доп . – М. : Техносфера, 2010 . – 336 с. – (Мир материалов и технологий) . - ISBN 978-5-94836-239-7 .;
3. Бёккер Ю.- "Спектроскопия", Издательство: "Техносфера", Москва, 2009 - (528 с.)  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=73013](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=73013);
4. "Растровая электронная микроскопия для нанотехнологий. Методы и применение", (4-е изд.), Издательство: "Лаборатория знаний", Москва, 2021 - (601 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/166756>.

### **5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:**

1. SmathStudio;
2. Libre Office;
3. ОС Linux;

4. GNU Octave.

### 5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - [http://biblioclub.ru/index.php?page=main\\_ub\\_red](http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red)
3. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
4. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
5. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>

### 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	К-102а, Учебная аудитория	парта, стул, доска меловая, ноутбук, кондиционер, телевизор
	К-102, Учебная аудитория	парта, стул, доска меловая, ноутбук, кондиционер, телевизор
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	К-102а, Учебная аудитория	парта, стул, доска меловая, ноутбук, кондиционер, телевизор
	К-102, Учебная аудитория	парта, стул, доска меловая, ноутбук, кондиционер, телевизор
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	К-102а, Учебная аудитория	парта, стул, доска меловая, ноутбук, кондиционер, телевизор
	К-102, Учебная аудитория	парта, стул, доска меловая, ноутбук, кондиционер, телевизор
Помещения для самостоятельной работы	НТБ-302, Читальный зал отдела обслуживания учебной литературой	стул, стол письменный, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный
Помещения для консультирования	К-109/1, Кабинет сотрудников каф. "ЭиН"	кресло рабочее, рабочее место сотрудника, стол для работы с документами, стул, шкаф для документов, шкаф для одежды, стол письменный, стол для совещаний, доска меловая, компьютерная сеть с выходом в Интернет, многофункциональный центр, оборудование для экспериментов, компьютер персональный, документы, книги, учебники, пособия
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	К-115, Склад каф. "ЭиН"	стеллаж, инвентарь учебный

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Современные методы исследования поверхности полупроводников

(название дисциплины)

#### 3 семестр

#### Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Опрос по теме "Проблемы физики поверхности" (Проверочная работа)
- КМ-2 Контрольная работа по теме: «Ионная спектроскопия» (Контрольная работа)
- КМ-3 Расчётное задание по теме "Резерфордовское обратное рассеяние" (Расчетно-графическая работа)
- КМ-4 Контрольная работа по теме: «Электронная спектроскопия» (Контрольная работа)
- КМ-5 Расчётное задание по теме "Рентгеноспектральный микроанализ" (Расчетно-графическая работа)
- КМ-6 Опрос по теме "Перспективные методы исследования" (Проверочная работа)

Вид промежуточной аттестации – Зачет с оценкой.

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5	КМ-6
		Неделя КМ:	2	6	8	12	15	15
1	Фундаментальные и прикладные проблемы физики поверхности твёрдого тела							
1.1	Поверхность		+					
1.2	Вакуум		+					
1.3	Классификация аналитических методов исследования поверхности		+					
2	Ионная спектроскопия							
2.1	Методы ионной спектроскопии			+	+			
2.2	Масс-спектроскопия вторичных ионов			+	+			
3	Электронная и рентгеновская спектроскопии							
3.1	Методы электронной спектроскопии					+	+	
3.2	Методы рентгеновской спектроскопии					+	+	
4	Перспективные методы анализа. Сравнительный анализ методов							
4.1	Перспективные методы анализа							+
Вес КМ, %:			5	25	20	25	20	5