

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Галунин Сергей Александрович  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 10.11.2023 14:29:22  
Уникальный программный ключ:  
08ef34338325bdb0ac5a47baa5472ce36cc3fc3b

Приложение к ОПОП  
«Нано- и микросистемная техника»



**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)»  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

---

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

дисциплины

**«МЕТОДЫ АНАЛИЗА МИКРО- И НАНОСИСТЕМ»**

для подготовки магистров

по направлению

28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

по программе

**«Нано- и микросистемная техника»**

Санкт-Петербург

2023

## **ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ**

Разработчики:

доцент, к.ф.-м.н. Андреева Н.В.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры МНЭ  
21.03.2022, протокол № 2/22

Рабочая программа рассмотрена и одобрена учебно-методической комиссией  
ФЭЛ, 24.03.2022, протокол № 1/22

Согласовано в ИС ИОТ

Начальник ОМОЛА Загороднюк О.В.

## **1 СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ**

Обеспечивающий факультет	ФЭЛ
Обеспечивающая кафедра	МНЭ
Общая трудоемкость (ЗЕТ)	4
Курс	2
Семестр	3

## Виды занятий

Лекции (академ. часов)	34
Практические занятия (академ. часов)	34
Иная контактная работа (академ. часов)	3
Все контактные часы (академ. часов)	71
Самостоятельная работа, включая часы на контроль (академ. часов)	73
Всего (академ. часов)	144

## **Вид промежуточной аттестации**

Экзамен (курс) 2

## **2 АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **«МЕТОДЫ АНАЛИЗА МИКРО- И НАНОСИСТЕМ»**

В лекционной части курса излагаются базовые теоретические представления о физических процессах при взаимодействии излучения (потоки электронов, ионов, электромагнитного излучения рентгеновского диапазона) с поверхностью твердого тела, основы построения и функционирования источников излучения, энерго-и масс-анализаторов, детекторов ионизирующего излучения и атомных частиц, подходы к анализу экспериментальных данных, принципы архитектуры аналитических комплексов, алгоритмы программного обеспечения (управление приборами, сбор и обработка информации). В содержание дисциплины включены специальные разделы, посвященные свойствам наноструктурированных объектов, поверхности, границ раздела. Все разделы дисциплины заканчиваются рассмотрением примеров применения современных методов диагностики для решения задач микро и наноэлектроники.

#### **SUBJECT SUMMARY**

#### **«ANALYTIC METHODS FOR MICRO-AND NANO-SYSTEMS»**

In lecture component of the discipline basic theoretical aspects of physical processes of emission (such as electron stream, ion stream, X-ray emission) interaction with solid state surface are developed. The basic aspects of formation and functioning of radiating source, energy and mass analyzers, ionizing emission detectors, and also approaches to experimental analyses, analytical sets design principles, software algorithms (device ruling, data capturing) are given. The discipline includes special sections dedicated to nanoscale objects properties, surface, interfaces. All of the discipline sections conclude with the examples of modern diagnostic methods using in micro-and nanoelectronics.

## **3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

### **3.1 Цели и задачи дисциплины**

1. Целями освоения дисциплины являются получение знаний о принципах построения аналитических комплексов, алгоритмах управления, сбора и обработки информации, о физических основах и аналитических возможностях современных методов диагностики микро- и наноструктур, о методических особенностях диагностики наноструктур при разнообразии их свойств и способов анализа, а также формирование умений корректно выбирать и обосновывать использование определенного метода диагностики для решению физико-технологических задач, навыков интерпретации результатов проведенных исследований и предложения оптимизации технологических процессов и физических моделей наноструктурированных объектов.

2. Задачами дисциплины являются:

- изучение основных явлений, возникающих при взаимодействии излучения (фотоны, электроны, ионы) с поверхностью твердого тела, получение знаний о принципах построения аналитических комплексов, алгоритмах управления, сбора и обработки информации;
- формирование умений корректно выбрать и обосновать использование определенного метода диагностики применительно к решению конкретной физико-технологической задачи; грамотно интерпретировать результаты проведенных исследований и предложить рекомендации по оптимизации технологических процессов и физических моделей наноструктурированных объектов;
- освоение навыков интерпретации результатов экспериментальных исследований наноструктурированных объектов с использованием физических методов диагностики, информацией о современных тенденциях в области аналитического приборостроения и перспективах развития методов диагностики нано-

структур.

3. Знания:

- основных явлений, возникающие при взаимодействии излучения (фотоны, электроны, ионы) с поверхностью твердого тела, получение знаний о принципах построения аналитических комплексов, алгоритмах управления, сбора и обработки информации;
- физических основ и аналитических возможностей современных методов диагностики микро-и наноструктур;
- методических особенностей диагностики наноструктур при разнообразии их свойств и способов анализа.

4. Формирование умений:

- корректно выбрать и обосновать использование определенного метода диагностики применительно к решению конкретной физико-технологической задачи;
- грамотно интерпретировать результаты проведенных исследований и предложить рекомендации по оптимизации технологических процессов и физических моделей наноструктурированных объектов.

5. Освоение навыков интерпретации результатов экспериментальных исследований наноструктурированных объектов с использованием физических методов диагностики, информацией о современных тенденциях в области аналитического приборостроения и перспективах развития методов диагностики наноструктур.

### **3.2 Место дисциплины в структуре ОПОП**

Дисциплина изучается на основе ранее освоенных дисциплин учебного плана:

1. «Производственная практика (научно-исследовательская работа)»
2. «Процессы микро-и нанотехнологии»

и обеспечивает изучение последующих дисциплин:

1. «Прикладные вопросы технологии микросистем»
2. «Производственная практика (преддипломная практика)»

### **3.3 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

В результате освоения образовательной программы обучающийся должен достичь следующие результаты обучения по дисциплине:

<b>Код компетенции/индикатора компетенции</b>	<b>Наименование компетенции/индикатора компетенции</b>
ОПК-1	Способен ставить и решать инженерные и научно-технические задачи в области нанотехнологий и микросистемной техники и новых междисциплинарных направлениях на основе естественнонаучных и математических моделей
ОПК-1.1	<i>Владеет математическим аппаратом для описания, анализа, теоретического и экспериментального исследования и моделирования процессов синтеза, диагностики и функционирования материалов и компонентовnano-и микросистемной техники</i>
ОПК-1.2	<i>Использует научный инструментарий различных областей физики для описания, анализа, теоретического и экспериментального исследования и моделирования процессов синтеза, диагностики и функционирования материалов и компонентов nano-и микросистемной техники</i>
ОПК-1.3	<i>Использует физико-химический подход для описания, анализа, теоретического и экспериментального исследования и моделирования процессов синтеза, диагностики и функционирования материалов и компонентов nano-и микросистемной техники</i>
ОПК-4	Способен выполнять исследования при решении инженерных и научно-технических задач, включая планирование и постановку сложного эксперимента, критическую оценку и интерпретацию результатов
ОПК-4.1	<i>Составляет план научно-исследовательской деятельности, включая литературный поиск, сроки и последовательность экспериментальной работы, обсуждения и анализа результатов</i>
ОПК-4.2	<i>Формирует демонстрационный материал и представляет результаты своей исследовательской деятельности на научных конференциях, во время промежуточных и итоговых аттестаций</i>

## **4 СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **4.1 Содержание разделов дисциплины**

#### **4.1.1 Наименование тем и часы на все виды нагрузки**

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование темы дисциплины</b>	<b>Лек, ач</b>	<b>Пр, ач</b>	<b>ИКР, ач</b>	<b>СР, ач</b>
1	Введение	2			1
2	Тема 1. Взаимодействие электронов с веществом	4	6		10
3	Тема 2. Тормозное излучение. Формула Крамерса. Характеристическое рентгеновское излучение	4	6		10
4	Тема 3. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердого тела	4	6		10
5	Тема 4. Методы электронно-зондовой диагностики. Вторичная электронная эмиссия	4	4		10
6	Тема 5. Рентгеновские методы анализа	4	4		10
7	Тема 6. Методы ионной спектроскопии	4	4		10
8	Тема 7. Полевые методы исследования	6	4		11
9	Заключение	2		3	1
	Итого, ач	34	34	3	73
	Из них ач на контроль	0	0	0	35
	Общая трудоемкость освоения, ач/зе			144/4	

#### **4.1.2 Содержание**

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование темы дисциплины</b>	<b>Содержание</b>
1	Введение	Краткий обзор развития физики взаимодействия излучения с поверхностью твердых тел. Основные особенности свойств наноструктурированных объектов и требования к аналитическим параметрам методов диагностики. Классификация методов диагностики материалов и структур наноэлектроники.
2	Тема 1. Взаимодействие электронов с веществом	Корпускулярно-волновой дуализм. Эксперименты Дэвиссона и Джермера. Основы квантовой теории рассеяния. Поперечное сечение Упругое рассеяние. Потенциал взаимодействия. Формула Резерфорда. Метод Монте-Карло (основные положения). Неупругое рассеяние электронов (импульсное приближение). Сечение ионизации. Плазмоны. Средняя длина свободного пробега электронов. Потери энергии.

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование темы дисциплины</b>	<b>Содержание</b>
3	Тема 2. Тормозное излучение. Формула Крамерса. Характеристическое рентгеновское излучение	Закон Мозли. Строение атома. Квантовые числа, электронные конфигурации и обозначения. Принцип Паули. Правило Хунда. Спектроскопические обозначения. LS-связь, jj-связь. Излучательные переходы, правила отбора в дипольном приближении. Обозначения и интенсивность рентгеновских линий. Поглощение рентгеновского излучения. Фотоэффект, вероятность фотоэлектронных переходов, сечение фотоионизации. Массовый и линейный коэффициент поглощения.
4	Тема 3. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердого тела	Параметры ионных пучков. Атомная масса, заряд ядра, изотопное соотношение. Упругое рассеяние ионов, кинематика рассеяния, рассеяние в центральном поле, сечение и параметр удара. Рассеяние быстрых и медленных ионов. Электронные потери энергии. Ионно-электронная эмиссия (потенциальная и кинетическая). Квазимолекулярный механизм ионизации, диаграммы Фано-Лихтенса. Ионное распыление (основные закономерности). Теория Зигмунда (основные понятия). Ядерные потери энергии (импульсное приближение). Потенциалы взаимодействия. Теория ЛШШ (основные понятия). Ионно-ионная эмиссия (основные закономерности, механизмы явления).
5	Тема 4. Методы электронно-зондовой диагностики. Вторичная электронная эмиссия	Основные закономерности и механизмы. Коэффициент вторичной электронной эмиссии, зависимость от энергии, угла падения, материала мишени, состояния поверхности. Вторичные электронные умножители, микроканальные пластины. Распределение вторичных электронов по энергиям. Истинно вторичные, неупругоотраженные и упругоотраженные электроны. Растворная электронная микроскопия (основные принципы и аналитические возможности). Механизмы формирования контраста (топологический, химический - от атомного номера Z, в поглощенных электронах, потенциальный, кристаллографический, магнитный, катодолюминесценция). Основные узлы растрового электронного микроскопа. Термоэлектронная эмиссия, уравнение Ричардсона-Дэшмана. Электронная пушка (термоэмиссионный W-катод, LaB <sub>6</sub> -катод, автоэмиссионный (полевой) катод). Система формирования зонда, развертка в растр. Детектор вторичных электронов Эверхарда-Торнли. Алгоритмы управления прибором сбора и обработка информации. Особенности анализа непроводящих образцов.

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование темы дисциплины</b>	<b>Содержание</b>
6	Тема 5. Рентгеновские методы анализа	Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (основные принципы и аналитические возможности). Фотоэффект. Соотношение Коопмана. Рентгеновские фотоэлектронные спектры (остовные и валентные уровни, ширина линий, Оже-серии). Химические сдвиги остовных уровней. Вторичная структура спектров (рентгеновские сателлиты, мультиплетное расщепление, сателлиты «встряски» и «стряхивания», дифракция фотоэлектронов). Особенности аппаратной реализации метода РФЭС (источники рентгеновского излучения, особенности энергоанализа фотоэлектронов). Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ (основные принципы и аналитические возможности). Тормозное излучение, источники рентгеновского излучения для РСФА. Принципы качественного и количественного анализа. Приборная реализация метода РСФА (вакуумный и атмосферный вариант прибора – достоинства и недостатки).
7	Тема 6. Методы ионной спектроскопии	Рассеяние быстрых ионов (РБИ). Основные принципы метода. Потери энергии в химических соединениях, правило Брегга. Ширина спектра энергии в обратном рассеянии. Форма спектра обратного рассеяния. Принципы послойного анализа. Разрешение по глубине, страгглинг. Ионное распыление и предел чувствительности. Приборная реализация метода РБИ. Полупроводниковый (кремниевый поверхностью-барьерный) детектор ядерных частиц. Применение метода РБИ для исследования многослойных структур субмикронного диапазона. Методы, основанные на эффекте канализации ионов. Рассеяние медленных ионов (РМИ). Кинематика рассеяния медленных ионов. Факторы, определяющие поперечную локальность метода. Проблемы количественного анализа в методе РМИ. Особенности приборной реализации метода. Факторы, определяющие разрешение по энергии (массе) рассеянных ионов. Масс-спектрометрия вторичных ионов (ВИМС). Физические основы метода. Коэффициент ионно-ионной эмиссии (положительные и отрицательные вторичные ионы).
8	Тема 7. Полевые методы исследования	Автоэлектронная (полевая) эмиссия. Теория Фаулера-Нордгейма. Полевой электронный микроскоп Мюллера, физические принципы, устройство, применение. Ионизация атомов в сильных электрических полях (Оппенгеймер, Гомер). Испарение и десорбция полем (механизм явления). Полевой ионный микроскоп с атомным зондом (атомное разрешение). Сканирующая тунNELьная микроскопия. Атомно-силовая микроскопия. Теория, аппаратная реализация, возможности применения.

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование темы дисциплины</b>	<b>Содержание</b>
9	Заключение	Перспективы развития научного приборостроения (физические принципы, технологические и конструкторские разработки, программные средства). Обзор мирового рынка аналитических приборов. (сравнительные характеристики).

## 4.2 Перечень лабораторных работ

Лабораторные работы не предусмотрены.

## 4.3 Перечень практических занятий

<b>Наименование практических занятий</b>	<b>Количество ауд. часов</b>
1. Классы решаемых задач характеризации полупроводниковых наноструктур и композитов	2
2. Классы решаемых задач характеризации люминесцентных наноматериалов	2
3. Рентгеновская микроскопия. Физические принципы и приборная реализация метода	2
4. Растворная электронная микроскопия. Методы формирования контраста. Индуцированный ток	2
5. Растворная ионная микроскопия	2
6. Упругое и неупругое рассеяние электронов. Сечения рассеяния, длины свободного пробега	2
7. Оже процесс. Типы и энергии переходов. Идентификация элементов и химические сдвиги	2
8. Рентгеновское характеристическое излучение. Область генерации. Локальность анализа. Количественный анализ	2
9. Кинематика рассеяния ионов. Методы элементного и фазового анализа, основанные на исследовании рассеяния ионов	2
10. Интерпретация электронограмм	2
11. Измерение распределений электрического потенциала и напряженности поля в структурах с объемным зарядом	2
12. Емкостная спектроскопия структур с квантовыми ямами	2
13. Метод изотермической релаксации емкости	2
14. Сканирующая зондовая микроскопия сопротивления растворения	2
15. СЗМ наноразмерных p-n-переходов, БШ, МДП – структур. Особенности интерпретации данных	2
16. Принципы интерпретации спектров ЭПР	2
17. ЭПР и ОДМР нанокристаллов в твердотельных матрицах	2
Итого	34

#### **4.4 Курсовое проектирование**

Курсовая работа (проект) не предусмотрены.

#### **4.5 Реферат**

Реферат не предусмотрен.

#### **4.6 Индивидуальное домашнее задание**

Индивидуальное домашнее задание не предусмотрено.

#### **4.7 Доклад**

Доклад не предусмотрен.

#### **4.8 Кейс**

Кейс не предусмотрен.

#### **4.9 Организация и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы**

Изучение дисциплины сопровождается самостоятельной работой студентов с рекомендованными преподавателем литературными источниками и информационными ресурсами сети Интернет.

Планирование времени для изучения дисциплины осуществляется на весь период обучения, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала. Обучающимся, в рамках внеаудиторной самостоятельной работы, необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников материал, законспектированный на лекциях. При этом на основе изучения рекомендованной литературы целесообразно составить конспект основных положений, терминов и определений, необходимых для освоения разделов учебной

дисциплины.

Особое место уделяется консультированию, как одной из форм обучения и контроля самостоятельной работы. Консультирование предполагает особым образом организованное взаимодействие между преподавателем и студентами, при этом предполагается, что консультант либо знает готовое решение, которое он может предписать консультируемому, либо он владеет способами деятельности, которые указывают путь решения проблемы.

Самостоятельное изучение студентами теоретических основ дисциплины обеспечено необходимыми учебно-методическими материалами (учебники, учебные пособия, конспект лекций и т.п.), выполненными в печатном или электронном виде.

Изучение студентами дисциплины сопровождается проведением регулярных консультаций преподавателей, обеспечивающих практические занятия по дисциплине, за счет бюджета времени, отводимого на консультации (внеаудиторные занятия, относящиеся к разделу «Самостоятельные часы для изучения дисциплины»).

Текущая СРС	Примерная трудоемкость, ач
Работа с лекционным материалом, с учебной литературой	3
Опережающая самостоятельная работа (изучение нового материала до его изложения на занятиях)	3
Самостоятельное изучение разделов дисциплины	0
Выполнение домашних заданий, домашних контрольных работ	0
Подготовка к лабораторным работам, к практическим и семинарским занятиям	16
Подготовка к контрольным работам, коллоквиумам	16
Выполнение расчетно-графических работ	0
Выполнение курсового проекта или курсовой работы	0
Поиск, изучение и презентация информации по заданной проблеме, анализ научных публикаций по заданной теме	0
Работа над междисциплинарным проектом	0
Анализ данных по заданной теме, выполнение расчетов, составление схем и моделей, на основе собранных данных	0
Подготовка к зачету, дифференциированному зачету, экзамену	35
<b>ИТОГО СРС</b>	<b>73</b>

## **5 Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

### **5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

<b>№ п/п</b>	<b>Название, библиографическое описание</b>	<b>К-во экз. в библ.</b>
<b>Основная литература</b>		
1	Микроскопия интегральных схем [Текст] / В.А. Ильин [и др.] ; под ред. В.В. Лучинина, 2009. -171 с.	60
2	Мошников, Вячеслав Алексеевич. Методы сканирующей зондовой микроскопии в микро- и наноэлектронике [Текст] : Учеб. пособие / В.А. Мошников, А.А. Федотов, А.И. Румянцева, 2003. -83 с.	неогр.
3	Новые наноматериалы. Синтез. Диагностика. Моделирование [Текст] : лаб. практикум / [О. А. Александрова [и др.], 2015. -247, [1] с.	20
<b>Дополнительная литература</b>		
1	Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии [Текст] : учеб. пособие для студентов ст. курсов вузов / В.Л. Миронов, 2004. -143 с.	7
2	Нанотехнология [Текст] : физика, процессы, диагностика, приборы / [А.В. Афанасьев [и др.] ; под ред. В.В. Лучинина, Ю.М. Таирова, 2006. -551 с.	51
3	Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника: мировые достижения -2008 год [Текст] : сб. / под ред. П.П. Мальцева, 2008. -430 с.	23
4	Экспериментальные методы исследований [Текст] : учеб. пособие для вузов по направлению подгот. бакалавров и магистров 553100 -"Техн. физика" / И.В. Золотухин [и др.], 2004. -493 с.	19

### **5.2 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», используемых при освоении дисциплины**

<b>№ п/п</b>	<b>Электронный адрес</b>
1	Materialstodayhttp://www.materialstoday.com/home.htm

### **5.3 Адрес сайта курса**

Адрес сайта курса: <https://vec.etu.ru/moodle/course/view.php?id=9082>

## **6 Критерии оценивания и оценочные материалы**

### **6.1 Критерии оценивания**

Для дисциплины «Методы анализа микро- и наносистем» предусмотрены следующие формы промежуточной аттестации: экзамен.

#### **Экзамен**

<b>Оценка</b>	<b>Описание</b>
Неудовлетворительно	Курс не освоен. Студент испытывает серьезные трудности при ответе на ключевые вопросы дисциплины
Удовлетворительно	Студент в целом овладел курсом, но некоторые разделы освоены на уровне определений и формулировок
Хорошо	Студент овладел курсом, но в отдельных вопросах испытывает затруднения. Умеет решать задачи
Отлично	Студент демонстрирует полное овладение курсом, способен применять полученные знания при решении конкретных задач

## **Особенности допуска**

Допуском к экзамену является:

- посещение и выполнение всех практических работ на практических занятиях;
- выполнение всех контрольных работ на положительную оценку;
- выполнение теста.

Экзамен проводится по билетам. Критерии выставления оценки на экзамене приведены выше.

## **6.2 Оценочные материалы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине**

### **Вопросы к экзамену**

<b>№ п/п</b>	<b>Описание</b>
1	Классы решаемых задач характеристики полупроводниковых наноструктур и композитов, люминесцентных наноматериалов, кластерных материалов, тонких пленок, гетероструктур и сверхрешеток, конструкционных наноматериалов. Общая характеристика задач исследования
2	Методы анализа, основанные на взаимодействии ионов средних и высоких энергий с твердым телом. Общая характеристика
3	Спектрометрия обратно рассеянных ионов высоких энергий (рассеяние Резерфорда). Кинематика упругих столкновений. Используемые геометрии рассеяния
4	Понятие сечения рассеяния. Сечение Резерфорда. Отклонения от формулы Резерфорда в области низких энергий
5	Понятие сечения рассеяния. Сечение Резерфорда. Отклонения от формулы Резерфорда в области высоких энергий. Резонансные сечения
6	Потери энергии легких ионов. Формы описания потерь энергии. Потери энергии в химических соединениях. Правило Брэгга
7	Измерение распределений элементов по глубине методом СОРИВЭ. Примеры анализа распределений: монослои элемента А на подложке элемента В; тонкие слои Ni <sub>2</sub> Si на Si; имплантированные слои
8	Качественный и количественный анализ в методе СОРИВЭ. Приборная реализация метода
9	Полупроводниковый детектор и многоканальный амплитудный анализ
10	Форма спектра обратного рассеяния Резерфорда. Примеры спектров: полубесконечный образец, тонкие пленки на полубесконечных образцах
11	Аналитические характеристики метода СОРИВЭ. Чувствительность измерений. Разрешение по глубине в геометрии $\theta = 180^\circ$ , $\theta = 90^\circ$
12	Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Параметры процесса распыления. Основные факторы, определяющие скорость распыления. Выход ионов

13	Масс-спектрометрия вторичных ионов. Физические основы и аналитические характеристики метода
14	Приборная реализация метода ВИМС. Основные типы масс-спектрометров
15	Аналитические характеристики метода
16	Избирательное (селективное) распыление элементов и анализ их распределений по глубине. Уширение границ разделов и ионное перемешивание в ВИМС
17	Масс-спектрометрия вторичных нейтральных частиц. Аналитические характеристики и приборная реализация метода. Сравнение с методом ВИМС
18	Активационные методы анализа состава вещества. Типы ядерных взаимодействий. Модель составного ядра. Законы сохранения
19	Радиоактивный распад. Схемы радиоактивного распада. Схема $\gamma$ -распада. Схема $\beta$ -распада
20	Закон радиоактивного распада. Накопление и распад радионуклидов. Нейтронное трансмутационное легирование. Активационный анализ. Мгновеннорадиационный анализ
21	Качественный и количественный активационный анализ. Оценка чувствительности измерений концентрации
22	Основные принципы электронного парамагнитного резонанса. Теорема Крамерса. Эффект Зеемана. Спиновый гамильтониан. Уровни энергии для зеемановского взаимодействия
23	Заселенности состояний и вероятности индуцированных переходов. Интенсивности линий в спектре ЭПР
24	Приборная реализация метода ЭПР. Основные аналитические характеристики
25	Сверхтонкое взаимодействие (СТВ) в парамагнитных центрах. Изотропное и анизотропное взаимодействие. Гамильтониан СТВ
26	Гамильтониан ТВ. Диполь-дипольное взаимодействие. Пример вакансационных пар, ионов с незаполненной 3d-оболочкой. Примеры спектров с тонкой структурой
27	Оптическое детектирование ЭПР. Приборная реализация метода. Отличия от классического ЭПР
28	Оптическое детектирование ЭПР. Идея метода и реализация на примере донорно-акцепторных пар в полупроводниках
29	Классическая оптическая микроскопия. Базовая конструкция оптического микроскопа, принципы построения изображения. Порядки увеличения системы, разрешающая способность
30	Разрешающая способность оптических систем. Критерий Рэлея. Глубина фокуса. Числовая апертура объектива. Аберрации. Способы увеличения разрешающей способности оптических систем

## Форма билета

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
 университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)»

---

## **ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1**

**Дисциплина МЕТОДЫ АНАЛИЗА МИКРО- И НАНОСИСТЕМ ФЭЛ**

1. Качественный и количественный активационный анализ.
2. Радиоактивный распад. Схемы радиоактивного распада. Схема  $\gamma$ - распада. Схема  $\beta$  – распада.

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой

**В.В. Лучинин**

**Образцы задач (заданий) для контрольных (проверочных) работ**

**Примерные вопросы контрольных работ для рассмотрения на практических занятиях:**

1. Классы решаемых задач характеристики полупроводниковых наноструктур и композитов.
2. Классы решаемых задач характеристики люминесцентных наноматериалов.
3. Оптическая микроскопия. Разрешающая способность оптических систем. Критерий Рэлея.
4. Числовая апертура объектива. Аберрации. Способы увеличения разрешающей способности оптических систем.
5. Кинематика рассеяния ионов. Методы элементного и фазового анализа, основанные на исследовании рассеяния ионов.
6. Формы описания потерь энергии. Потери энергии в химических соединениях. Правило Брэгга.
7. Измерение распределений элементов по глубине методом СОРИВЭ.

Примеры анализа распределений.

8. Форма спектра обратного рассеяния Резерфорда. Примеры спектров.
9. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Параметры процесса распыления.
10. Уширение границ разделов и ионное перемешивание в ВИМС.
11. Масс-спектрометрия вторичных нейтральных частиц. Аналитические характеристики и приборная реализация метода.
12. Заселенности состояний и вероятности индуцированных переходов. Интенсивности линий в спектре. Приборная реализация метода ЭПР.
13. Гамильтониан СТВ. Сверхтонкая структура спектров ЭПР. Примеры СТС (вакансия в кремнии).
14. Диполь-дипольное взаимодействие. Пример вакансационных пар, ионов с незаполненной 3d-оболочкой. Примеры спектров с тонкой структурой.
15. Качественный и количественный активационный анализ. Оценка чувствительности измерений концентрации.
16. Принципы интерпретации спектров ЭПР.
17. ЭПР и ОДМР нанокристаллов в твердотельных матрицах.

### **Тест**

#### **Вариант 1.**

№	Вопрос	Варианты ответа	Проверяемые знания
1	Критерием отклонения от формулы Резерфорда для сечения рассеяния в области высоких энергий является следующее условие:	<p>расстояние наибольшего сближения налетающей частицы сравнимо с радиусом ядра атома, на котором происходит рассеяние;</p> <p>расстояние наибольшего сближения налетающей частицы меньше радиуса К-оболочки атома, на котором происходит рассеяние;</p> <p>атомный номер налетающей частицы много больше атомного номера элемента мишени.</p>	Рассмотрение ограничений модели Резерфорда в СОРИВЭ-методе анализа состава структур МНСТ
2	Процесс рассеяния ионов высокой энергии считается упругим, если:	<p>энергия рассеянного иона равна энергии падающего;</p> <p>энергия падающей частицы делится между атомом мишени и рассеянной частицей в соответствии с их массами;</p> <p>энергия падающей частицы</p>	Принципы методов анализа микро- и наносистем, основанных на взаимодействии ионов средних и высоких энергий с твердым телом

		уменьшается за счет электронных возбуждений.	
3	Метод спектроскопии обратнорассеянных ионов высоких энергий (обратное рассеяние Резерфорда) является:	сильно разрушающим; слабо разрушающим неразрушающим	Спектроскопия обратнорассеянных ионов высоких энергий, как метод анализа состава структур МНСТ
4	Метод качественного активационного анализа основан на измерении:	интенсивности потока частиц или $\gamma$ -квантов при радиоактивном распаде активированного образца; углового распределения частиц или $\gamma$ -квантов при радиоактивном распаде активированного образца; энергии частиц или $\gamma$ -квантов при радиоактивном распаде активированного образца.	Ядерно-физические методы анализа микро- и наносистем
5	Для достижения максимальной чувствительности в методе активационного анализа необходимо обеспечить следующие требования к облучению и моменту времени измерения образца:	время облучения стремится к нулю, время остывания – к бесконечности; время облучения стремится к бесконечности, время остывания – к нулю; время облучения равно времени остывания.	Ядерно-физические методы анализа микро- и наносистем
6	В спектрометрах электронного парамагнитного резонанса технически реализуются следующие условия проведения измерений	магнитное поле изменяется, частота СВЧ-генератора постоянна; магнитное поле постоянно, частота СВЧ-генератора изменяется; магнитное поле и частота СВЧ-генератора изменяются;	Приборная реализация метода электронного парамагнитного резонанса
7	Тонкая структура спектров ЭПР обусловлена:	взаимодействием спинов электрона и ядра; взаимодействием спинов двух или более электронов; взаимодействием спинов двух ядер.	Интерпретация спектров ЭПР материалов МНСТ
8	В ЭПР линии резонансного поглощения наблюдаются в том случае, если:	нижний уровень Зеемана населен больше, чем верхний; населенности верхнего и нижнего уровней Зеемана	Радиоспектроскопические методы анализа материалов МНСТ

		равны; населенность нижнего уровня Зеемана меньше, чем верхнего.	
9	В соответствии с теоремой Крамерса спиновое вырождение энергетического уровня с нечетным числом электронов может быть снято:	электрическим полем; магнитным полем; спиновое вырождение не снимается ни при каких внешних воздействиях.	Радиоспектроскопические методы анализа материалов МНСТ
10	Пространственное разрешение ближнепольного оптического микроскопа:	определяется критерием Рэлея; ограничивается дифракцией света; определяется размерами диафрагмы оптического зонда и расстоянием между зондом и анализируемой поверхностью.	Методы измерений геометрических размеров наночастиц и наноструктур

## Вариант 2.

№	Вопрос	Варианты ответа	Проверяемые знания
1	Масс-спектрометрия вторичных ионов:	является разрушающим методом анализа состава; является неразрушающим методом анализа состава; является методом анализа структуры поверхности.	Принципы методов анализа микро- и наносистем, основанных на взаимодействии ионов средних и высоких энергий с твердым телом.
2	Энергия упруго рассеянного иона в методе спектроскопии обратного рассеяния Резерфорда определяется:	величиной кинематического фактора; величиной сечения торможения; величиной сечения Резерфорда.	Спектроскопия обратно-рассеянных ионов высоких энергий
3	Electron Microprobe Analysis (EMA) – это:	Рентгенофлюoresцентный анализ Рентгеноспектральный микроанализ	Названия основных методов анализа состава и структуры на английском языке

		Дифракция быстрых электронов	
4	Потери энергии быстрых ионов в соединении $A_{\text{III}}B_2$ определяются:	плотностью вещества; суперпозицией сечений торможения в соответствии с правилом Брэгга; Сечениями упругого рассеяния атомов, входящих в соединение	СОРИВЭ – метод анализа структур МНСТ
5	Информация о распределении анализируемого методом СОРИВЭ элемента по глубине от поверхности образца содержится в:	изменении энергии первичной частицы за счет процесса неупругого рассеяния; изменении энергии первичной частицы за счет процесса упругого рассеяния; продуктах распыления образца при облучении ионами высоких энергий.	Методы измерения концентрационных профилей элементов в структурах МНСТ
6	Чувствительность метода ЭПР применительно к анализу парамагнитных примесей в полупроводниках:	выше, чем в методе СОРИВЭ для этих же примесей; ниже, чем в методе СОРИВЭ для этих же примесей; чувствительности методов соизмеримы.	Радиоспектроскопические методы анализа материалов МНСТ в сравнении с другими методами
7	Анализ угловых зависимостей фактора спектроскопического расщепления ( $g$ -фактора) парамагнитного примесного центра, измеряемого методом ЭПР, позволяет определить:	глубину залегания энергетического уровня центра в запрещенной зоне полупроводника; вид примеси; группу локальной симметрии центра.	Радиоспектроскопические методы анализа материалов МНСТ. Связь симметрии кристалла со свойствами локальных центров.
8	Измерения спектров ЭПР в полупроводниках проводят при низких температурах для того, чтобы:	полупроводник увеличил свое сопротивление; увеличить населенность нижних уровней Зеемана парамагнитных центров и, тем самым, увеличить чувствительность измерений; уменьшить тепловые шумы при измерениях.	Радиоспектроскопические методы анализа материалов МНСТ. Выбор условий эксперимента.
9	Для достижения максимальной чувствительности в методе ак-	время облучения стремится к нулю, время остывания – к бесконечности; время облучения стремится	Ядерно-физические методы анализа микро- и наносистем

	тивационного анализа необходимо обеспечить следующие требования к облучению и моменту времени измерения образца:	к бесконечности, время остывания – к нулю; время облучения равно времени остывания.	
10	Оптическая микроскопия в сравнении с растровой электронной микроскопией характеризуется:	большой глубиной фокуса; меньшей глубиной фокуса; оба метода одинаковы по этому параметру.	Методы измерений геометрических размеров наночастиц и наноструктур. Сопоставление.

### Вариант 3.

№	Вопрос	Варианты ответа	Проверяемые знания
1	Методы анализа состава, основанные на взаимодействии с твердым телом ионов средних энергий являются:	разрушающими; неразрушающими; частично разрушающими.	Методы измерения состава структур электроники и МНСТ
2	В спектрометрии обратно рассеянных ионов высоких энергий (рассеянии Резерфорда) изучают:	масса рассеянных частиц; кинетическая энергия рассеянных частиц; атомный номер.	Методы измерения состава структур МНСТ

	да) измеряемым параметром является:		
3	Сечение рассеяния Резерфорда:	увеличивается с ростом кинетической энергии налетающей частицы; не зависит от кинетической энергии налетающей частицы; <b>обратно пропорционально квадрату кинетической энергии налетающей частицы.</b>	Методы измерения состава структур МНСТ
4	Закон радиоактивного распада описывает:	кинетику накопления радиоактивных ядер; <b>кинетику уменьшения концентрации радиоактивных ядер;</b> кинетику изменения концентрации стабильных изотопов.	Активационные методы анализа состава вещества.
5	Период полураспада определяется как время, необходимое для того, чтобы число радиоактивных ядер уменьшилось:	в «e» раз; в «л» раз; <b>в 2 раза.</b>	Ядерно-физические методы анализа микро- и наносистем
6	Пространственное разрешение метода спектроскопии обратного рассеяния ионов высоких энергий является более высоким:	для геометрии рассеяния, близкой к 90° по отношению к нормали к образцу; для геометрии рассеяния, близкой к 180° по отношению к нормали к образцу; разрешение не зависит от угла регистрации.	Методы измерения концентрационных профилей элементов в структурах МНСТ
7	Переходы электронов между энергетическими уровнями в электронном парамагнитном резонансе:	индуцируются электрической компонентой поля СВЧ; <b>индуцируются магнитной компонентой поля СВЧ;</b> являются спонтанными.	Радиоспектральные методы анализа материалов микро- и наносистем
8	Сверхтонкая структура спектров электронного парамагнитного резонанса обусловлена:	<b>взаимодействием спиновых моментов электрона и ядра;</b> взаимодействием спиновых моментов электронов; спин-орбитальным взаимодействием.	Интерпретация спектров в методе ЭПР
9	Оптическое детекти-	поглощения СВЧ-энергии в	Метод оптического детекти-

	рование магнитного резонанса производится по изменению:	момент резонанса; интенсивности или поляризации люминесценции образца в момент резонанса; изменению резонансной частоты.	рования МР в диагностике МНСТ
10	Пространственное разрешение оптической микроскопии зависит:	от длины волн света, в котором наблюдается объект; от интенсивности света, падающего на объект; от угла падения света на объект.	Методы измерений геометрических размеров наночастиц и наноструктур

Весь комплект контрольно-измерительных материалов для проверки сформированности компетенции (индикатора компетенции) размещен в закрытой части по адресу, указанному в п. 5.3

### **6.3 График текущего контроля успеваемости**

<b>Неделя</b>	<b>Темы занятий</b>	<b>Вид контроля</b>
1	Введение	Контрольная работа
2	Тема 1. Взаимодействие электронов с веществом	
3	Тема 2. Тормозное излучение. Формула Крамерса. Характеристическое рентгеновское излучение	
4		
5		
6	Тема 3. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердого тела	Контрольная работа
7		
8	Тема 4. Методы электронно-зондовой диагностики. Вторичная электронная эмиссия	
9		
10		
11		Контрольная работа
12	Тема 5. Рентгеновские методы анализа	Контрольная работа
13	Тема 6. Методы ионной спектроскопии	
14		
15		
16	Тема 7. Полевые методы исследования	Тест
17	Заключение	

### **6.4 Методика текущего контроля**

#### **на лекционных занятиях**

Текущий контроль включает в себя контроль посещаемости (не менее **80** % занятий), по результатам которого студент получает допуск на экзамен.

#### **на практических (семинарских) занятиях**

Текущий контроль включает в себя:

- контроль посещаемости (не менее **80** % занятий), по результатам которого студент получает допуск на экзамен;
- выполнение 3 контрольных работ (на 5, 11,15 неделях), включающих письменные ответы на два вопроса билета, которые оцениваются по 4-балльной шкале по следующим критериям:

«отлично» - вопрос раскрыт полностью, задача решена правильно

«хорошо» - вопрос раскрыт не полностью, задача решена частично

«удовлетворительно» - в ответе на вопрос имеются существенные ошибки; задача не решена или решена неправильно, ход решения правильный

«неудовлетворительно» - отсутствует ответ на вопрос или содержание ответа не совпадает с поставленным вопросом, задача не решена, ход решения неправильный

Оценки за контрольные работы учитываются в итоговой оценке экзамена.

- тестирование (на 17 неделе) по вопросам для проверки степени сформированности компетенций (3 варианта тестов по 10 вопросов в каждом с тремя вариантами ответов).

выполнение тестовых заданий оценивается по следующим критериям:

«отлично» – правильные ответы даны на 9 и более вопросов;

«хорошо» – правильные ответы даны на 7-8 вопросов;

«удовлетворительно» – правильные ответы даны на 5-6 вопросов;

«неудовлетворительно» – менее 5 правильных ответов.

В ходе проведения семинарских и практических занятий целесообразно привлечение студентов к как можно более активному участию в дискуссиях, решении задач, обсуждениях и т. д. При этом активность студентов также может учитываться преподавателем, как один из способов текущего контроля на практических занятиях.

### **самостоятельной работы студентов**

Контроль самостоятельной работы студентов осуществляется на лекционных и практических занятиях студентов по методикам, описанным выше.

## **7 Описание информационных технологий и материально-технической базы**

<b>Тип занятий</b>	<b>Тип помещения</b>	<b>Требования к помещению</b>	<b>Требования к программному обеспечению</b>
Лекция	Лекционная аудитория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, маркерная доска	
Практические занятия	Аудитория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, маркерная доска	
Самостоятельная работа	Помещение для самостоятельной работы	Оснащено компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета.	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше

## **8 Адаптация рабочей программы для лиц с ОВЗ**

Адаптированная программа разрабатывается при наличии заявления со стороны обучающегося (родителей, законных представителей) и медицинских показаний (рекомендациями психолого-медико-педагогической комиссии). Для инвалидов адаптированная образовательная программа разрабатывается в соответствии с индивидуальной программой реабилитации.

## **ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ**

<b>№ п/п</b>	<b>Дата</b>	<b>Изменение</b>	<b>Дата и номер протокола заседания УМК</b>	<b>Автор</b>	<b>Начальник ОМОЛА</b>
1	01.03.2023	Программа актуальна, изменения не требуются.	01.03.2023, протокол № 1	доцент, к.ф.-м.н., Н.В. Ан- дреева	