

*Приложение к приказу первого проректора  
по учебной и научной работе*

от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

**Правительство Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный университет**

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

*(учебной дисциплины, практики и т.п.)*

*Электронно-микроскопические методы исследования полупроводников и  
наноструктур*

*Electron microscopy of semiconductors and nanostructures*

**Язык(и) обучения**

\_\_\_\_\_русский\_\_\_\_\_

Трудоёмкость (границы трудоёмкости) в зачетных единицах:   2  

Регистрационный номер рабочей программы:   003989  

Санкт-Петербург

2016

## **Раздел 1. Характеристики учебных занятий**

### **1.1. Цели и задачи учебных занятий**

Формирование у студентов представления о современных методах микроскопии, а также сопутствующих аналитических методиках и возможности использования методов микроскопии для исследования полупроводниковых материалов и наноструктур.

### **1.2. Требования к подготовленности обучающегося к освоению содержания учебных занятий (пререквизиты)**

Обучающиеся должны знать математику и физику в объеме программы бакалавриата. Для успешного освоения программы дисциплины «Электронная микроскопия полупроводников и наноструктур» студентам необходимо прослушать курс лекций «Физика дефектов в полупроводниках».

### **1.3. Перечень результатов обучения (learning outcomes)**

ОКМ-3 способен к самостоятельному освоению новых методов исследования, к изменению профиля своей профессиональной деятельности;

ОКМ-7 уметь ставить, формализовать и решать задачи, уметь системно анализировать научные проблемы, генерировать новые идеи и создавать новое знание;

ПК-3 уметь ставить задачи теоретических и (или) экспериментальных научных исследований и решать их с помощью соответствующего физико-математического аппарата, современной аппаратуры и информационных технологий;

ПК-6 профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием, приборами и установками в избранной предметной области в соответствии с профилем подготовки;

Знания о принципах и современных методиках сканирующей электронной просвечивающей электронной микроскопии;

Умение интерпретировать данные полученные методами микроскопии с использованием соответствующего математического аппарата и методов численного моделирования;

### **1.4. Перечень активных и интерактивных форм учебных занятий**

- Лекция – изложение материала преподавателем, включающее использование средств мультимедиа (30 часов).
- Консультация - ответ преподавателя на вопросы, возникшие в ходе самостоятельной подготовки студентов к экзамену (2 часа).

## **Раздел 2. Организация, структура и содержание учебных занятий**

### **2.1. Организация учебных занятий**

#### **2.1.1 Основной курс**

Трудоёмкость, объёмы учебной работы и наполняемость групп обучающихся																		
Период обучения (модуль)	Контактная работа обучающихся с преподавателем											Самостоятельная работа				Объём активных и интерактивных форм учебных занятий	Трудоёмкость	
	лекции	семинары	консультации	практические занятия	лабораторные работы	контрольные работы	коллоквиумы	текущий контроль	промежуточная аттестация	итоговая аттестация	под руководством преподавателя	в присутствии преподавателя	сам.раб. с использованием методических материалов	текущий контроль (сам.раб.)	промежуточная аттестация (сам.раб.)			итоговая аттестация (сам.раб.)
<b>ОСНОВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ</b>																		
<b>очная форма обучения</b>																		
Семестр 2	30		2					2									34	2
	1-10		1-10					1-10										
<b>ИТОГО</b>	<b>30</b>		<b>2</b>					<b>2</b>									<b>34</b>	<b>2</b>

Формы текущего контроля успеваемости, виды промежуточной и итоговой аттестации			
Период обучения (модуль)	Формы текущего контроля успеваемости	Виды промежуточной аттестации	Виды итоговой аттестации (только для программ итоговой аттестации и дополнительных образовательных программ)
<b>ОСНОВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ</b>			
<b>очная форма обучения</b>			
Семестр 1		экзамен	

## 2.2. Структура и содержание учебных занятий

**Основной курс      Основная траектория      Очная форма обучения**

Период обучения: **Семестр 1**

№ п/п	Наименование темы (раздела, части)	Вид учебных занятий	Количество часов
1	Введение. История электронной и зондовой микроскопии. Принципы формирования микроскопического изображения. Понятие изображения. Увеличение.	лекции	2

	Разрешение. Контраст.		
2	<p>1. Общие вопросы электронной микроскопии</p> <p>1.1 Основные элементы устройства электронных микроскопов:</p> <p>Элементы электронной оптики. Аберрации и астигматизм. Детекторы, применяемые в электронной микроскопии. Элементы вакуумной техники.</p>	лекции	2
3	<p>1.2 Основы взаимодействия электронов с веществом:</p> <p>Рассеяние электронов в веществе. Дифракция электронов. Характеристические потери энергии электронов. Генерация плазмонов. Вторичные электроны. Характеристическое и тормозное рентгеновское излучение. Катодолюминесценция. Токи, наведенные электронным пучком в полупроводниковых материалах.</p>	лекции	2
4	<p>1.3 Подготовка материалов для исследования методами электронной микроскопии:</p> <p>Подготовка образцов для просвечивающей электронной микроскопии. Подготовка поверхности образцов для исследования методами сканирующей электронной микроскопии. Подготовка нанообъектов.</p>	лекции	2
5	<p>2. Сканирующая электронная микроскопия.</p> <p>2.1 Особенности устройства сканирующего электронного микроскопа и получения изображения:</p> <p>Общее устройство, геометрия расположения детекторов. Режимы работы электронно-оптической системы с самопересечением пучка и без самопересечения пучка. Связь элементов интерфейса управления с элементами микроскопа.</p>	лекции	2

6	<p>2.2 Формирование контраста вторичных и отраженных электронов в сканирующей электронной микроскопии:</p> <p>Морфологический контраст и контраст атомного номера. Смешанные контрасты, возникающие при использовании детектора Эверхарта-Торнли и внутрилинзового детектора вторичных электронов.</p>	лекции	2
7	<p>2.3 Особенности исследования диэлектриков в сканирующем электронном микроскопе:</p> <p>Накопление заряда на поверхности. Методы компенсации заряда: напыление покрытия, изменение ускоряющего напряжения, режим переменного остаточного давления.</p>	лекции	2
8	<p>2.4 Рентгеновский микроанализ в сканирующей электронной микроскопии:</p> <p>Методы качественного и количественного рентгеновского микроанализа. Коррекция на эффекты атомного номера, поглощения и флуоресценции в количественном анализе. Картирование распределения элементов по поверхности. Количественный анализ цветных карт элементов</p>	лекции	2
9	<p>2.5 Дифракция отраженных электронов:</p> <p>Регистрация дифракции отраженных электронов, анализ дифракционных картин, специализированное программное обеспечение. Углы Эйлера.</p>		2
10	<p>2.6 Католюминесценция и токи, наведенные электронным пучком в полупроводниках:</p> <p>Методы регистрации спектрального распределения католюминесценции полупроводников и наноструктур. Картирование в католюминесценции.</p>		2

	Методы регистрации токов, наведенных электронным пучком в полупроводниках. Анализ изображений, полученных в режиме наведенных токов.		
11	<p>3. Просвечивающая электронная микроскопия</p> <p>3.1 Особенности работы просвечивающего электронного микроскопа:</p> <p>Общее устройство. Светлопольное и темнопольное изображение, дифракционный режим. Сканирующая просвечивающая электронная микроскопия. Связь элементов интерфейса с элементами микроскопа.</p>	лекции	2
12	<p>3.2 Дифракция электронов в просвечивающей электронной микроскопии:</p> <p>Закон Брэгга. Вектор отклонения. Кинематическое приближение. Динамическое приближение. Экстинкционная длина. Дифракция электронов на наноструктурах. Дифракция на поликристаллах. Дифракция в сходящемся пучке. Кикучи-дифракция.</p>	лекции	2
13	<p>3.3 Типы контраста в просвечивающей электронной микроскопии:</p> <p>Амплитудный и фазовый контрасты. Контраст плотности и толщины. Дифракционный контраст. Z-контраст. Контраст дислокаций и дефектов упаковки.</p>	лекции	2
14	<p>3.4 Микроскопия высокого разрешения:</p> <p>Приближение фазового объекта. Передаточная функция микроскопа. Дефокус Шерцера. Информационный предел разрешения.</p>		2
15	<p>3.5 Элементный анализ в просвечивающей электронной микроскопии:</p> <p>Рентгеновский микроанализ.</p>	лекции	2

	Приближение Клифа-Лоримера и метод зета-фактора. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов.		
--	--	--	--

### Раздел 3. Обеспечение учебных занятий

#### 3.1. Методическое обеспечение

##### 3.1.1 Методические указания по освоению дисциплины

Посещение лекций. Для освоения дисциплины студенту предоставляется электронная презентация лекций в формате .pdf.

##### 3.1.2 Методическое обеспечение самостоятельной работы

Обязательная и дополнительная литература.

##### 3.1.3 Методика проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации и критерии оценивания

Промежуточная аттестация проводится в виде устного экзамена, окончательная оценка выставляется по 10-балльной системе по совокупности посещения занятий и экзамена.

За посещение лекций назначается не более 1 балла. По результатам устного экзамена назначается не более 9 баллов.

Методика оценки и система соответствия баллов:

	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
10-балльная система	0-2	3-5	6-8	9-10

**«Отлично»** - полностью освоен материал курса, результаты ответа на основные вопросы экзаменационного билета оценены максимальным числом баллов, получены исчерпывающие ответы на дополнительные вопросы.

**«Хорошо»** - материал курса освоен с несущественными пробелами, получены полные ответы на основные вопросы экзаменационного билета.

**«Удовлетворительно»** - материал курса освоен не полностью, но пробелы в знаниях не сказываются на формировании необходимых навыков, получены неполные и/или неверные ответы на половину дополнительных вопросов.

**«Неудовлетворительно»** - материал курса не освоен, либо частично освоен, но пробелы в знаниях не позволяют получить необходимые навыки. Отсутствует ответ на один из основных вопросов билета. Большая часть ответов на дополнительные вопросы неверна или отсутствует.

3.1.4 Методические материалы для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации (контрольно-измерительные материалы, оценочные средства)

### **Список билетов для проведения промежуточной аттестации**

Билет 1.

1. Принципы формирования изображения в микроскопии. Увеличение. Разрешение. Контраст.
2. Рентгеновский микроанализ в просвечивающей электронной микроскопии.

Билет 2.

1. Источники электронов.
2. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения.

Билет 3.

1. Элементы электронной оптики. Аберрации и астигматизм.
2. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов.

Билет 4.

1. Детекторы, применяемые в электронной микроскопии.
2. Дифракция Кикучи.

Билет 5.

1. Элементы вакуумной техники, используемые в электронной микроскопии.
2. Амплитудный и фазовый контрасты в просвечивающей электронной микроскопии.

Билет 6.

1. Упругое и неупругое рассеяние электронов в веществе.
2. Общее устройство просвечивающего электронного микроскопа.

Билет 7.

1. Вторичные электроны. Оже-электроны. Характеристические потери энергии электронов.
2. Устройство сканирующего электронного микроскопа.

Билет 8.

1. Подготовка материалов для исследования методами электронной микроскопии.
2. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения.

Билет 9.



1. Рентгеновский микроанализ в сканирующей электронной микроскопии.
2. Амплитудный и фазовый контрасты в просвечивающей электронной микроскопии.

## Билет 10.

1. Формирование контраста вторичных и отраженных электронов в сканирующей электронной микроскопии.
2. Дифракция электронов в просвечивающей электронной микроскопии. Кинематическая и динамическая теория.

## Билет 11.

1. Дифракция Кикучи.
2. Элементы электронной оптики. Аберрации и астигматизм.

## Билет 12.

1. Особенности исследования диэлектриков в сканирующем электронном микроскопе.
2. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов.

## Билет 13.

1. Рентгеновский микроанализ в сканирующей электронной микроскопии.
2. Дифракция электронов в просвечивающей электронной микроскопии. Кинематическая и динамическая теория.

## Билет 14.

1. Общее устройство просвечивающего электронного микроскопа.
2. Вторичные электроны. Оже-электроны. Характеристические потери энергии электронов.

## Билет 15.

1. Рентгеновский микроанализ в просвечивающей электронной микроскопии.
2. Устройство сканирующего электронного микроскопа.

## Билет 16.

1. Источники электронов.
2. Формирование контраста вторичных и отраженных электронов в сканирующей электронной микроскопии.

## Билет 17.

1. Упругое и неупругое рассеяние электронов в веществе.
2. Особенности исследования диэлектриков в сканирующем электронном микроскопе.

### 3.1.5 Методические материалы для оценки обучающимися содержания и качества учебного процесса

#### Анкета-отзыв по преподаванию дисциплины

Просим Вас заполнить анонимную анкету-отзыв по пройденному Вами курсу. Обобщенные данные анкет будут использованы для совершенствования преподавания. По каждому вопросу проставьте соответствующие оценки по шкале от 1 до 10 баллов (обведите выбранный Вами балл). В случае необходимости впишите свои комментарии.

1. Насколько Вы удовлетворены содержанием дисциплины в целом?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

2. Насколько Вы удовлетворены формами преподавания?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

3. Как Вы оцениваете качество подготовки предложенных учебно-методических материалов?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

4. Насколько Вы удовлетворены использованием преподавателями интерактивных и активных методов обучения ?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

5. Какие из тем дисциплины Вы считаете наиболее полезными, ценными с точки зрения дальнейшего обучения и/или применения в последующей практической деятельности?

6. Что бы Вы предложили изменить в методическом и содержательном плане для совершенствования преподавания данной дисциплины?

СПАСИБО!

### 3.2. Кадровое обеспечение

3.2.1 Образование и (или) квалификация преподавателей и иных лиц, допущенных к проведению учебных занятий

К чтению лекций должны привлекаться преподаватели, имеющие ученую степень и/или ученое звание в области физики, а также ведущие специалисты в области электронной микроскопии.

3.2.2 Обеспечение учебно-вспомогательным и (или) иным персоналом

Не предусмотрено.

### **3.3. Материально-техническое обеспечение**

#### **3.3.1 Характеристики аудиторий (помещений, мест) для проведения занятий**

Лекционная аудитория, оборудованная мультимедиа средствами демонстрации материала: проектор и настенный экран.

#### **3.3.2 Характеристики аудиторного оборудования, в том числе неспециализированного компьютерного оборудования и программного обеспечения общего пользования**

Для проведения занятия необходимы: проектор, ноутбук, экран.

#### **3.3.3 Характеристики специализированного оборудования**

Не предусмотрено.

#### **3.3.4 Характеристики специализированного программного обеспечения**

Не предусмотрено.

#### **3.3.5 Перечень и объёмы требуемых расходных материалов**

Фломастеры цветные, губки, бумага формата А4, канцелярские товары, картриджи принтеров, диски, флеш-накопители, в объёме, необходимом для организации и проведения занятий, по заявкам преподавателей, подаваемым в установленные сроки.

### **3.4. Информационное обеспечение**

#### **3.4.1 Список обязательной литературы**

1. Практическая электронная растровая микроскопия. Под ред. Дж. Гоулдстейна и Х. Яковица. Москва, «Мир», 1978, 656 с.
2. П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон, Д. Пэшли, М. Уэлан. Электронная микроскопия тонких кристаллов. Москва, «Мир», 1968, 574 с.
3. Г. Томас. Электронная микроскопия металлов. Прямое исследование металлов в просвечивающем электронном микроскопе : пер. с англ. Москва, Изд-во иностранной лит., 1963, 351 с.
4. Справочник по микроскопии для нанотехнологии под. ред. Н. Яо и Ч. Лин Ван. Москва, «Научный мир», 2011, 712 с.
5. Р. Хейденрайх. Основы просвечивающей электронной микроскопии. Москва, «Мир», 1966, 472 с.
6. П. Хокс. Электронная оптика и электронная микроскопия Москва, Мир, 1974, 319 с.
7. Г. Г. Владимиров. Сканирующая туннельная микроскопия: Учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург, СОЛО, 2007, 57 с.

#### **3.4.2 Список дополнительной литературы**

1. J. Goldstein, D. Newbury, D. Joy, C. Lyman, P. Echlin, E. Lifshin, L. Sawyer and J. Michael. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. Third edition. Springer, 2007, 690 p.
2. Р. Ф. Эгертон, Физические принципы электронной микроскопии. Введение в просвечивающую, растровую и аналитическую электронную микроскопию. Москва, «Техносфера», 2010, 300 с.
3. Электронно-микроскопические изображения дислокаций и дефектов упаковки под. ред. В.М. Косевича и Л.С. Палатника. Москва, «Наука», 1976, 223 с.
4. David B. Williams, C. Barry Carter. Transmission Electron Microscopy. A Textbook for Materials Science. Springer, 2009, 757p

### 3.4.3 Перечень иных информационных источников

Методическое пособие для пользователей Междисциплинарного ресурсного центра по направлению «Нанотехнологии» <http://www.nano.spbu.ru/>

#### Раздел 4. Разработчики программы

Фамилия, имя, отчество	Учёная степень	Учёное звание	Должность	Контактная информация (служебный адрес электронной почты, служебный телефон)
Петров Юрий Владимирович	к.ф.м.н.	-	доцент	<a href="mailto:y.petrov@spbu.ru">y.petrov@spbu.ru</a> +7-905-260-25-25