Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Гаврилов Сергей Александрович
Должность: И.О. Ректора
Дата подписания: 01.07.2025 11:02:40
Уникальный программный ключ:
f17218015d82e3c1457d1df9e244def505047355

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____ А.Г. Балашов
«10» декабря 2024 г.
М.П.

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«Физика и химия полупроводников»

Направление подготовки - 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»
Направленность (профиль) - «Технологии материалов микроэлектроники»

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 00FCD5F6E07DC83F809D56CE1D350ACCD1
Владелец ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ"
Действителен с 09.04.2025 по 03.07.2026

Москва 2024

## 1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

Дисциплина участвует в формировании следующей компетенции образовательной программы:

**Компетенция ПК-3** «Способен прогнозировать влияние микро- и нано- масштаба на механические, физические, химические и другие свойства веществ и материалов» **сформулирована на основе профессионального стандарта** 40.104 «Специалист по измерению параметров и модификации свойств наноматериалов и наноструктур».

**Обобщенная трудовая функция** 40.104 С [6]Совершенствование процессов измерений параметров и модификации свойств наноматериалов и наноструктур.

**Трудовая функция** 40.104 С/01.6Модернизация существующих и внедрение новых методов и оборудования для измерений параметров наноматериалов и наноструктур.

| **Подкомпетенции, формируемые в дисциплине** | **Задачи профессиональной деятельности** | **Индикаторы достижения подкомпетенций** |
|---|---|---|
| ПК-3.ФХППСпособен применять фундаментальные математические и естественно-научные знания при анализе электрофизических характеристик полупроводников. | Совершенствование процессов измерений параметров и модификации свойств наноматериалов и наноструктур. | **Знание:** статистики носителей заряда полупроводников, а также методов ее применения для оценки свойств полупроводников.<br>**Умение:** обоснованно выбирать и методы измерения и расчета электрофизических. характеристик полупроводников.<br>**Опыт деятельности:** прогнозирования вклада поверхностных свойств в свойства дисперсных систем и учета этого вклада в технологии изготовления полупроводников. |

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина входит в часть, формируемую участниками образовательных отношений Блока 1 «Дисциплины (модули)» образовательной программы.

**Входные требования к дисциплине**

Изучению дисциплины предшествует формирование компетенций в дисциплинах «Физика», «Химия», «Физическая химия», «Кристаллография», «Материалы электронной техники», «Методы исследования наноматериалов и структур».

Формируемые в процессе изучения дисциплины компетенции в дальнейшем углубляются выполнением индивидуальных заданий практики и служат основой для выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР).

## 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

| Курс | Семестр | Общая трудоёмкость (ЗЕ) | Общая трудоёмкость (часы) | Контактная работа | | | Самостоятельная работа (часы) | Промежуточная аттестация |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Лекции (часы) | Лабораторные работы (часы) | Практические занятия (часы) | | |
| 4 | 8 | 4 | 144 | 24 | 12 | 24 | 84 | ЗаО |

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

| № и наименование модуля | Контактная работа | | | Самостоятельная работа | Формы текущего контроля |
|---|---|---|---|---|---|
| | Лекции (часы) | Лабораторные работы (часы) | Практические занятия (часы) | | |
| 1. Предмет курса. Общие представления о полупроводниках и основные определения. | 2 | 2 | 2 | 8 | Тестирование<br>Защита лабораторной работы |
| 2. Особенности характера химической связи и кристаллической структуры Si и Ge. | 6 | 2 | 4 | 16 | Тестирование<br>Защита лабораторной работы |
| 3. Статистика носителей заряда в собственных полупроводниках. | 12 | 2 | 14 | 30 | Тестирование<br>Защита лабораторной работы |
| 4. Состояние атомов легирующих элементов в решетке германия и кремния. Мелкие акцепторы и доноры. | 10 | 4 | 10 | 24 | Тестирование<br>Защита индивидуального задания |

### 4.1. Лекционные занятия

| № модуля дисциплины | № лекции | Объем занятий (часы) | Краткое содержание |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | Предмет курса. Общие представления о полупроводниках и основные определения. |
| 2 | 2 | 2 | Строение изолированных атомов и структура энергетических уровней в изолированных атомах Si и Ge. |
| | 3 | 2 | Структура материалов. Дальний и ближний порядок. Кристаллы. |
| | 4 | 2 | Химическая связь в кристаллах Si и Ge. $sp^3$-гибридизация.<br>Строение кристаллической решетки Si и Ge. |
| 3 | 5 | 2 | Уравнение Шредингера для кристаллов.<br>Приближения, необходимые для решения уравнения Шредингера.<br>Решение уравнения Шредингера. |
| | 6 | 2 | Понятие об эффективной массе.<br>Анализ решения уравнения Шредингера. |
| | 7 | 2 | Структура энергетических зон в Si и Ge. Прямозонные и непрямозонные полупроводники.<br>Температурная зависимость ширины запрещенной зоны. |
| | 8 | 2 | Плотность состояний и энергия Ферми свободного электронного газа.<br>Функция распределения Ферми-Дирака и ее свойства.<br>Критерий вырождения.<br>Концентрация электронов и дырок в разрешенных зонах полупроводников. |
| | 9 | 2 | Уровень Ферми в собственном полупроводнике.<br>Закон действующих масс для носителей заряда в полупроводнике.<br>Термодинамическая трактовка уровня Ферми. |
| 4 | 10 | 2 | Примеси в полупроводниках. Энергия ионизации примесей. Рекомбинационные ловушки и центры захвата.<br>Водородоподобное приближение и метод эффективных масс при определении энергии мелких примесных уровней.<br>Критерий образования примесной зоны. |
| | 11 | 2 | Уравнение электронейтральности для легированного полупроводника. Фактор вырождения примесных состояний. Степень заполнения примесных уровней. |
| | 12 | 2 | Температурные зависимости положения уровня Ферми и концентрации электронов в донорном полупроводнике. Температурная область истощения примесных уровней. |

### 4.2. Практические занятия

| № модуля дисциплины | № практического занятия | Объем занятий (часы) | Наименование занятия |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 2 | Полупроводниковое состояние вещества. |
| 2 | 2 | 2 | Строение изолированных атомов и структура энергетических уровней в изолированных атомах Si и Ge. |
| | 3 | 2 | Химическая связь в кристаллах Si и Ge. $sp^3$-гибридизация. Строение кристаллической решетки Si и Ge. |
| 3 | 4 | 2 | Решение уравнения Шредингера. |
| | 5 | 2 | Структура энергетических зон в Si и Ge. Прямозонные и непрямозонные полупроводники. |
| | 6 | 2 | Некристаллические полупроводники. Атомная структура и модели структуры энергетических зон. Механизмы переноса носителей заряда в a-Si:H. |
| | 7 | 2 | Определение плотности электронных состояний в некристаллических полупроводниках. Уровень Ферми в полупроводниках. Статистика электронов в полупроводниках. |
| | 8 | 2 | Уравнение электронейтральности. Определение распределения электронов и дырок по примесным состояниям. Температурные зависимости уровня Ферми и концентрации носителей в легированных полупроводниках. |
| 4 | 9 | 2 | Сложнолегированные полупроводники. Определение положения уровня Ферми в сложнолегированных полупроводниках. |
| | 10 | 2 | Квазихимический подход к процессу ионизации доноров и акцепторов в полупроводнике. Сложное легирование. Электронно-дырочное взаимодействие. Равновесие дефектов в полупроводниковом кристалле. |
| | 11 | 2 | Комплексообразование в решетке элементарного полупроводника. |
| | 12 | 2 | Модель образования электронейтрального комплекса. |

### 4.3. Лабораторные работы

| № модуля дисциплины | № лабораторной работы | Объем занятий (часы) | Наименование работы |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 4 | Исследование структурно-релаксационных процессов в тонких пленках некристаллических полупроводников с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии. |
| 2 | 2 | 4 | Исследование термоЭДС тонкопленочных материалов. |

| № модуля дисциплины | № лабораторной работы | Объем занятий (часы) | Наименование работы |
|---|---|---|---|
| 3 | 3 | 4 | Исследование термических свойств материалов, применяемых для создания ячеек фазовой памяти. |

### 4.4. Самостоятельная работа студентов

| № модуля дисциплины | Объем занятий (часы) | Вид СРС |
|---|---|---|
| 1-4 | 28 | Изучение теоретического материала в объеме лекций |
| 1-4 | 20 | Подготовка к лабораторной работе |
| 1-4 | 8 | Подготовка к тестированию по модулям |
| 1-4 | 22 | Выполнение индивидуального задания по анализу процессов измерений параметров и модификации свойств наноматериалов и наноструктур. |

### 4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов)

*Не предусмотрены*

## 5. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Учебно-методическое обеспечение для самостоятельной работы студентов в составе УМК дисциплины (ОРИОКС, http://orioks.miet.ru/):

**Модуль 1** «Предмет курса. Общие представления о полупроводниках и основные определения»

- ✓ Изучение теоретического материала в объеме лекций, подготовка к практическим занятиям, подготовка к лабораторным работам, подготовка к опросам по модулям осуществляется с помощью лекций к модулю №1, материалов для самостоятельной работы студентов.

**Модуль 2** «Особенности характера химической связи и кристаллической структуры Si и Ge»

- ✓ Изучение теоретического материала в объеме лекций, подготовка к практическим занятиям, подготовка к опросам по модулям осуществляется с помощью лекций к модулю №2, лабораторного практикума, материалов для самостоятельной работы студентов.

**Модуль 3**«Статистика носителей заряда в собственных полупроводниках»

- ✓ Изучение теоретического материала в объеме лекций, подготовка к практическим занятиям, подготовка к лабораторным работам, подготовка к опросам по модулям осуществляется с помощью лекций к модулю №3, лабораторного практикума, материалов для самостоятельной работы студентов.

**Модуль 4** «Состояние атомов легирующих элементов в решетке германия и кремния. Мелкие акцепторы и доноры»

- ✓ Изучение теоретического материала в объеме лекций, подготовка к практическим занятиям, подготовка к опросам по модулям осуществляется с помощью лекций к модулю №4, лабораторного практикума, материалов для самостоятельной работы студентов.

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### Литература

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников : Учебник / К.В. Шалимова. - 4-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2010. - 400 с.

2. Бурбаева Н.В. Основы полупроводниковой электроники : Учеб. пособие / Н.В. Бурбаева, Т.С. Днепровская. - М. : Физматлит, 2012. - 312 с. - URL: https://e.lanbook.com/book/5261 (дата обращения: 17.12.2020). - ISBN 978-5-9221-1379-3.

3. Парменов Ю.А. Физика полупроводников : Учеб. пособие / Ю.А. Парменов; Министерство образования и науки РФ, Национальный исследовательский университет "МИЭТ". - 2-е изд., доп. и испр. - М. : МИЭТ, 2017. - 136 с.

4. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : Учеб. пособие / В.И. Старосельский; Национальный исследовательский университет "МИЭТ"; [Под ред. Ю.А. Парменова]. - М. : Юрайт, 2019. - 463 с. - (Бакалавр. Академический курс). - URL: https://urait.ru/bcode/425163 (дата обращения: 30.11.2024). - ISBN 978-5-9916-0808-4, 978-5-9692-0962-6

5. Материалы электронной техники : Лабораторный практикум: В 2-х ч. Ч. 1 / Б.Г. Будагян, А.А. Шерченков. - М. : МИЭТ, 2001. - 56 с.

6. Материалы электронной техники : Лабораторный практикум: В 3-х ч. Ч. 3 / А.А. Шерченков, Ю.И. Штерн. - М. : МИЭТ, 2004. - 88 с.

7. Горелик С.С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков / С.С. Горелик, М.Я. Дашевский. - М. : Металлургия, 1988. - 574 с.

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХБАЗ ДАННЫХ, ИНФОРМАЦИОННЫХ СПРАВОЧНЫХ СИСТЕМ

1. **eLIBRARY.RU: научная электронная библиотека**: сайт. – Москва, 2000. – URL: https://elibrary.ru(дата обращения: 11.11.2024). – Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.

2. **Российская государственная библиотека**: сайт. – Москва, 1999-2020. – URL: http://www.rsl.ru(дата обращения: 10.11.2024).

3. **GoogleScholar:** сайт. – США, 2004 - . -URLhttps://scholar.google.ru. – (дата обращения: 10.11.2024). – Режим доступа: свободный.

4. **База AmericanChemicalSociety (ACS):** Некоммерческое научное издательство. – Американское химическое общество, 2020. – URL: http://pubs.acs.org(дата обращения: 11.11.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей МИЭТ.

5. **Electrochemical Society**:Научное издательство IOP Publishing, 2020. – URL:https://iopscience.iop.org/partner/ecs(дата обращения: 29.11.2024). - Режим доступа: для авторизованных пользователей МИЭТ

6. **Springer**: сайт. – URL:http://link.springer.com (дата обращения: 29.11.2024). - Режим доступа: для авторизованных пользователей МИЭТ.

7. **SCOPUS: Библиографическая и реферативная база данных научной периодики**: сайт. – URL: www.scopus.com/ (дата обращения: 20.11.2024). - Режим доступа: для авторизованных пользователей МИЭТ.

8. **Наукометрическая база данных WebofScience**: Сайт. – Компания Clarivate, 2020. – URL: http://apps.webofknowledge.com (дата обращения: 29.11.2024). - Режим доступа: для авторизованных пользователей МИЭТ.

## 8. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В ходе реализации обучения используется **смешанное обучение** (основано на интеграции технологий традиционного и электронного обучения, замещении части традиционных учебных форм занятий формами и видами взаимодействия в электронной образовательной среде).

Освоение образовательной программы обеспечивается ресурсами электронной информационно-образовательной среды ОРИОКС (http://orioks.miet.ru).

Для взаимодействия студентов с преподавателем используются сервисы обратной связи: раздел ОРИОКС «Домашние задания», электронная почта.

## 9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

| **Наименование учебных аудиторий и помещений для самостоятельной работы** | **Оснащенность учебных аудиторий и помещений для самостоятельной работы** | **Перечень программного обеспечения** |
|---|---|---|
| Учебная аудитория № 4136 «Лаборатория микроскопии» | Компьютер, проекционная установка VIEWSONIC PRO-8500. | ОС Microsoft Windows, MS Office |
| Учебная аудитория № 4338б «Лаборатория неупорядоченных полупроводников» | Компьютеры с ПО и возможностью подключения к сети Интернет | ОС Microsoft Windows, MS Office, MatLab |

| Наименование учебных аудиторий и помещений для самостоятельной работы | Оснащенность учебных аудиторий и помещений для самостоятельной работы | Перечень программного обеспечения |
|---|---|---|
| Помещение для самостоятельной работы обучающихся | Компьютерная техника с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду МИЭТ | ОС Microsoft Windows, MS Office, Браузер |

## 10. ФОНДЫ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ СФОРМИРОВАННОСТИ КОМПЕТЕНЦИЙ/ПОДКОМПЕТЕНЦИЙ

ФОС по подкомпетенции **ПК-3.ФХПП «**Способен применять фундаментальные математические и естественно-научные знания при анализе электрофизических характеристик полупроводников**»**.

Фонд оценочных средств представлен отдельным документом и размещен в составе УМК дисциплины электронной информационной образовательной среды ОРИОКС// URL: http://orioks.miet.ru/**.**

## 11. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

### 11.1.Особенности организации процесса обучения

Дисциплина «Физика и химия полупроводников» состоит из четырех модулей. Модуль 1 дает студентам общие представления о полупроводниках, модуль 2 дает студентам сведения об особенностях характера химической связи и кристаллической структуры Si и Ge. В модуле 3 рассматривается статистика носителей заряда в собственных полупроводниках, в модуле 4 представлены сведения о состоянии атомов легирующих элементов в решетке германия и кремния.

Студенты должны осуществлять поиск дополнительной информации по темам практических занятий в научных источниках с последующим обсуждением результатов поиска с преподавателем и одногруппниками.

Приступать к лабораторным работам необходимо после изучения теоретического материала, рекомендованного преподавателем в рамках самостоятельной работы и изучения описания соответствующей лабораторной работы. Студенты получают допуск к лабораторной работе после ознакомления с описанием лабораторной работы. Для получения допуска необходимо правильно ответить на контрольные вопросы к теоретической части, приведенные в конце описания лабораторной работы.

Выполнение индивидуального задания на СРС предполагает формирование у обучающихся подкомпетенций по индикаторам умений и приобретения опыта

деятельности. Оно включает в себя изучение современных методов для исследований основных параметров функциональных материалов, используемых в энергосберегающих системах.

Контроль выполнения студентами индивидуального задания проводится на семинарах. Студенты выступают с докладом на семинаре, излагая содержание проделанной работы, анализируя различные аспекты освещаемой проблемы, происходит обсуждение информации в формате научной дискуссии.

Подготовкой материалов для промежуточной аттестации необходимо начать заниматься с первых дней семестра, не устраняться от активного участия в активных видах занятий.

Студентам рекомендуется активно посещать предусмотренные расписанием консультации с преподавателем.

### 11.2. Система контроля и оценивания

Для оценки успеваемости студентов по дисциплине используется накопительная балльная система,

Баллами оцениваются: выполнение каждого контрольного мероприятия в семестре и промежуточный контроль (в сумме - 100 баллов).

Структура и график контрольных мероприятий приведены в журнале успеваемости на ОРИОКС (http://orioks.miet.ru/ ).

При выставлении итоговой оценки используется шкала, приведенная в таблице:

| **Сумма баллов** | **Оценка** |
|---|---|
| Менее 50 | 2 |
| 50 – 69 | 3 |
| 70 – 85 | 4 |
| 86 – 100 | 5 |

**РАЗРАБОТЧИКИ:**

Профессор Института ПМТ, д.т.н., профессор_____/А.А.Шерченков /

Рабочая программа дисциплины «Физика и химия полупроводников» по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», направленности (профилю) «Технологии материалов микроэлектроники» разработана в Институте перспективных материалов и технологий и утверждена на заседании Ученого совета Института ПМТ 19 декабря 2024 года, протокол № 16

Директор Института ПМТ _____ /С.В.Дубков/

**Лист согласования**

Рабочая программа согласована с Передовой инженерной школой

Директор ПИШ _____ /А.Л.Переверзев /

Рабочая программа согласована с Центром подготовки к аккредитации и независимой оценки качества

Начальник АНОК _____/И.М.Никулина /

Рабочая программа согласована с библиотекой МИЭТ

Директор библиотеки _____/Т.П.Филиппова /