

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования\_  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Физика аморфных и нанокристаллических полупроводников

---

Уровень высшего образования

Магистратура

---

Направление подготовки / специальность

11.04.04 - Электроника и наноэлектроника

---

Направленность образовательной программы

Твердотельная электроника и наноэлектроника

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.04.01 Физика аморфных и нанокристаллических полупроводников относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-4: Готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, и способность обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач	<p>ПК-4.1: Знает тенденции и перспективы развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники</p> <p>ПК-4.2: Способен рассчитывать предельно допустимые и предельные режимы работы изделий микро- и нанoeлектроники</p> <p>ПК-4.3: Имеет навыки обоснованного выбора теоретических и экспериментальных методов исследования изделий микро- и нанoeлектроники</p>	<p>ПК-4.1:</p> <p>ПК-4.1. Знать фундаментальные основы классификации структурного беспорядка в твердых телах на примере аморфного тетраэдрического кремния и германия. Влияния неупорядоченности на энергетический спектр аморфных полупроводников. Способы модификации структурных и оптоэлектронных свойств, основные технологические способы управления макросвойствами, для приложений современной микро- и нанoeлектроники. Включая гидрогенизацию и легирование. Знать основы получения и свойства пористого кремния и других низкоразмерных структур на основе нанокремния.</p> <p>ПК-4.2:</p> <p>ПК-4.2. Уметь использовать знания о современных исследованиях в области аморфного и нанокристаллического кремния при создании новых приборов электроники.</p> <p>ПК-4.3:</p> <p>ПК-4.3. Иметь навыки</p>	Допуск к лабораторной работе Тест	Экзамен: Контрольные вопросы

		проведения технологических процессов и контроля свойств аморфных и нанокристаллических полупроводников.		
--	--	---	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>4</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>144</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>16</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>32</b>
- КСР	<b>2</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>58</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b> <b>Экзамен</b>

#### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
1. Введение	8	2	2	4	4
2. Основные методы получения аморфных и нанокристаллических полупроводников.	14	2	6	8	6
3. Электронная структура неупорядоченных полупроводников	8	2		2	6
4. Электронный транспорт в аморфных полу-проводниках	14	2	6	8	6
5. Фотоэлектрические свойства аморфных полупроводников	14	2	6	8	6
6. Оптические свойства аморфных полупро-водников	18	2	6	8	10
7. Применение аморфного и микрокристаллического кремния	12	2		2	10
8. Физические, технологические особенности микро- и нанокристаллического кремния	18	2	6	8	10

Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	144	16	32	50	58

### Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Определение неупорядоченной системы. Стеклообразные, некристаллические и аморфные твердые тела. Классификация аморфных материалов. Основные положения и терминология физики аморфных полупроводников. Полупроводниковые нанокластеры и нанокристаллы.
2. Получение пленок аморфных полупроводников. Физические, химические и физико-химические методы. Методы реактивного распыления. Методы химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ). Ионная имплантация. Особенности свойств пленок аморфных полупроводников, полученных разным способом.
3. Структура аморфных полупроводников. Случайная сетка атомов. Определяющая роль ближнего порядка. Параметры ближнего порядка. Дефекты реальных аморфных полупроводников. Структурная неоднородность. Микропоры. Примеси и неоднородности состава.
4. Электронная структура аморфных полупроводников. Локализация Андерсона. Химические связи и модели плотности состояний. Теоретические расчеты плотности локализованных состояний в аморфных полупроводниках. Электронные состояния в энергетических зонах и в щели подвижности. Методы и результаты определения ПЛС.
5. Электронный транспорт, фотоэлектрические и оптические свойства аморфных полупроводников. Основные механизмы электропереноса. Температурная зависимость прыжковой проводимости. Прыжки переменной длины. Эффект Холла, подвижность Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая подвижность и фотопроводимость.
6. Легирование аморфных полупроводников, барьеры и р-п-переходы. Особенности переноса носителей в аморфном кремнии. Оптическое поглощение. Область фундаментального поглощения. Оптическая ширина запрещенной зоны. Форма края поглощения. Край Урбаха. Переходы, индуцированные дефектами. Излучательная и безызлучательная рекомбинация в аморфных полупроводниках. Проблемы стабильности аморфного кремния. Эффект Стеблера-Вронски.
7. Применение аморфного и микрокристаллического кремния. Полевой транзистор и его возможные приложения. Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии. Применение в электрофотографии и трубках, передающих изображение. Датчики изображения. Датчики рентгеновского излучения. Сильноточные диоды. Переключатели и элементы памяти. Индуцированные светом эффекты и их применение. Многослойные интерференционные покрытия. Перспективы применения аморфных полупроводников в приборах микро- и оптоэлектроники
8. Физические, технологические особенности микро- и нанокристаллического кремния. Новые свойства и применение. Пористый кремний и массивы нанокристаллов кремния в диэлектрической матрице. Основные методы формирования. Люминесцентные свойства и электронный транспорт. Перспективные направления в применении. Светоизлучающие структуры, солнечные элементы, элементы энергонезависимой памяти.

### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Самостоятельная работа студентов включает в себя подготовку к контрольным вопросам текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины, приведенным в п. 5.

Методическое обеспечение: 1. Температурная зависимость электропроводности аморфных полупроводников Сост. А.В. Ершов, А.И. Машин // В кн.: Физика твердого тела: Лабораторный практикум. В 2 т. / Под ред. проф. А.Ф. Хохлова. Том 2. Физические свойства твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – С. 313–327.

2. Изучение колебательных свойств аморфного кремния методом ИК-спектроскопии: Практикум / Сост. А.В. Ершов, А.И. Машин, И.А. Карабанова. – Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 32 с.

3. Получение тонких пленок методом магнетронного распыления на постоянном токе / Сост. А.В. Ершов, И.А. Чучмай // В кн.: Физика твердого тела: Лабораторный практикум. В 2 т. / Под ред. проф. А.Ф. Хохлова. Том 1. Методы получения твердых тел и исследования их структуры. – М.: Высшая школа, 2001. – С. 319–337.

4. Получение пленок аморфного гидрогенизированного кремния в плазме тлеющего ВЧ-разряда / Сост. А.В. Ершов, А.И. Машин. – Н. Новгород: ННГУ, 1999. – 12 с.

## **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

### **5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

#### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе) для оценки сформированности компетенции ПК-4:**

На примере лабораторного практикума по теме: "Температурная зависимость электропроводности аморфных полупроводников".

1. Модель плотности состояний Коэна-Фрицше-Овшинского. Модели состояний по Мотту-Дэвису. Связь с реальностью.
2. Химические связи и модели плотности состояний для a-Si:H. Зарядовые состояния дефектов типа оборванной связи.
3. Делокализованные электронные состояния в энергетических зонах. Край подвижности.
4. Электронные состояния в области зонных хвостов.
5. Электронные состояния в щели подвижности.
6. Методы определения величины и профиля плотности состояний в щели подвижности a-Si:H. Подходы и трудности.
7. Влияние условий получения и термообработки пленок аморфного кремния на распределение плотности состояний в щели подвижности.
8. Основные механизмы электропереноса. Минимальная металлическая проводимость.

#### **Критерии оценивания (оценочное средство - Допуск к лабораторной работе)**

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	сдан допуск
не зачтено	не сдан допуск

### 5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ПК-4:

Укажите правильные ответы на вопросы, в **одном вопросе** правильных ответов может быть **несколько**.  
**Обведите правильные ответы.**

1. Какой энергетический уровень соответствует краю подвижности, где подвижность «испытывает» скачок на 2-3 порядка: 1)  $E_F$ ; 2)  $E_A$ ; 3)  $E_B$ ; 4)  $E_C$ ; 5)  $E_V$ .
2. 2. Какое структурное нарушение (по постулатам Мотта) ответственно за «протяженность» хвостовых состояний вглубь щели подвижности: 1) рост концентрации оборванных связей; 2) рост степени нарушения дальнего порядка; 3) рост композиционного беспорядка; 4) рост упорядочения в расположении одинаковых атомов. 3. Классификация  $\text{por-Si}$  по размерам пор включает: *микропористый, мезопористый, макропористый*, - и соответствует размеру пор, соответственно:

1)  $\leq 2$  нм, 2–50 нм,  $> 50$  нм;

2)  $> 50$  нм, 2–50 нм,  $\leq 2$  нм.

4. Классификация некристаллических полупроводников по Мотту основана на: 1) температуре стеклования; 2) параметрах структуры ближнего порядка; 3) типе связи; 4) концентрации оборванных связей.

5. «Безводородный» аморфный кремний при введении водорода меняет свои свойства, а именно: 1) становится более плотным; 2) у него уменьшается щель подвижности; 3) появляются локализованные состояния у края зоны проводимости; 4) уширяется оптическая щель; 5) пассивируются оборванные связи; 6) растет фотопроводимость; 7)увеличивается эффективность легирования бором и фосфором

6. Наиболее оптимальным методом получения  $\alpha\text{-Si:H}$  является: 1) метод испарения в среде водорода; 2) пиролитическое осаждение из силана; 3) плазмой активированное химическое осаждение из моносилана; 4) магнетронное распыление кремния в среде водорода; 5) PE CVD; 6) TE CVD; 7) Photo CVD; 8) метод ионно-лучевой аморфизации кристаллического кремния

### Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Более 60% правильных ответов
не зачтено	Менее 60% правильных ответов

### 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

#### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой

	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	<b>удовлетворительно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-4

1. Определение неупорядоченной системы. Стеклообразные, некристаллические и аморфные твердые тела. Тетраэдрические аморфные полупроводники.
2. Модели беспорядка в аморфных полупроводниках: позиционный, композиционный, топологический.
3. Классификация аморфных материалов в технологическом плане. Получение стекол.
4. Классификация аморфных материалов по структуре ближнего порядка (по Мотту).
5. Аморфный кремний: «безводородный» и гидрогенизированный, основные свойства и различия. Влияние условий получения и термообработки.
6. Метод тлеющего разряда для получения пленок аморфного кремния.
7. ХОГФ- методы получения аморфного гидрогенизированного кремния.

#### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета и дополнительные вопросы (задания), выходящие за рамки изученного объема курса и изученных алгоритмов и подходов, проявляя инициативу и творческое мышление. Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно»
отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов



Оценка	Критерии оценивания
	билета и отвечает с небольшими неточностями.
хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).
удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий, отвечая с наводящими вопросами преподавателя.
неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания
плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Забродский Андрей Георгиевич. Электронные свойства неупорядоченных систем : учеб. пособие для вузов / под общ. ред. В. И. Ильина и А. Я. Шика. - СПб. : Наука, 2000. - 72 с. : ил. - (Новые разделы физики полупроводников). - Федер. целевая программа "Гос. поддержка интеграции высш. образования и фундам. науки на 1997 - 2000 г.". - ISBN 5-02-024927-0 : 18.00., 10 экз.
2. Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович. Электронная теория неупорядоченных полупроводников : [учеб. пособие для физ. и физ.-техн. специальностей вузов]. - М. : Наука, 1981. - 384 с. : ил. - 1.00., 4 экз.
3. Мотт Невилл Френсис. Электронные процессы в некристаллических веществах : [в 2 т.]. Т. 2 / пер. с англ. под ред. Б. Т. Коломийца. - 2-е перераб. и доп. изд. - М. : Мир, 1982. - 294 с. : ил. - 2.60., 5 экз.
4. Мотт Невилл Фрэнсис. Электронные процессы в некристаллических веществах : [в 2 т.]. Т. 1 / пер. с англ. под ред. Б. Т. Коломийца. - 2-е перераб. и доп. изд. - М. : Мир, 1982. - 368 с. : ил. - 2.90., 4 экз.
5. Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля / Ищенко А.А., Фетисов Г.В., Асланов Л.А. - Москва : Физматлит, 2011., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=646934&idb=0>.
6. Шкловский Борис Ионович. Электронные свойства легированных полупроводников. - М. : Наука, 1979. - 416 с. : ил. - (Физика полупроводников и полупроводниковых приборов). - 2.40., 2 экз.

## Дополнительная литература:

1. Аморфные полупроводники / под ред. М. Бродский ; пер. с англ. под ред. А. А. Андреева, В. А. Алексеева. - М. : Мир, 1982. - 419 с. : ил. - (Проблемы прикладной физики). - ISBN 5-03-002125-6 : 4.00., 2 экз.
2. Физика гидрогенизированного аморфного кремния : [в 2 вып.]. Вып. 1. Структура, приготовление и приборы / под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски ; пер. с англ. А. И. Косарева [и др.] ; под ред. А. И. Андреева, В. А. Алексеева. - М. : Мир, 1987. - 363 с. : ил. - (Проблемы прикладной физики). - 3.60., 1 экз.
3. Физика гидрогенизированного аморфного кремния : [в 2 вып.]. Вып. 2. Электронные и колебательные свойства / под ред. Дж. Джоунопулоса, Дж. Люковски ; пер. с англ. под ред. А. А. Андреева. - М. : Мир, 1988. - 447 с. : ил. - (Проблемы прикладной физики). - 4.90., 1 экз.
4. Меден Арун. Физика и применение аморфных полупроводников / пер. с англ. С. А. Костылёва. - М. : Мир, 1991. - 670 с. : ил. - ISBN 5-03-001895-6 : 5.90., 1 экз.
5. Аморфные и поликристаллические полупроводники / под ред. В. Хейванга ; пер. с нем. М. В. Акулёнок ; под ред. Ю. Д. Чистякова. - М. : Мир, 1987. - 160 с. : ил. - 1.60., 2 экз.
6. Андриевский Р.А. Наноматериалы на металлической основе в экстремальных условиях : учебное пособие / Андриевский Р.А. - Москва : Лаборатория знаний, 2020. - 105 с. - ISBN 978-5-00101-932-9., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=808917&idb=0>.
7. Андриевский Р.А. Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы / Андриевский Р.А. - Москва : Лаборатория знаний, 2020. - 255 с. - ISBN 978-5-00101-906-0., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=736510&idb=0>.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: В качестве оборудования для выполнения лабораторных работ используется следующее: вакуумные установки для получения тонких аморфных пленок кремния или германия методами электронно-лучевого испарения и магнетронного распыления, установки ВУ-1А и Torr Int), приборные устройства для определения морфологических параметров пленок и т.п.. Для изучения электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств аморфных и нанокристаллических полупроводников используются: вакуумный криостат ЖК-78, спектрофотометр Cary-6000 и Фурье ИК- спектрометр Spectrum BX II

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 11.04.04 - Электроника и наноэлектроника.

Автор(ы): Ершов Алексей Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент.

Рецензент(ы): Бурдов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 09.01.2024, протокол № б/н.