

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
Кафедра физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники**

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ протокол
№ 13 от «30» ноября 2022 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика аморфных и нанокристаллических полупроводников

**Уровень высшего образования
магистратура**

**Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленности (профили): твердотельная электроника и нанoeлектроника**

Форма обучения: очная

Нижегород, 2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Физика аморфных и нанокристаллических полупроводников» относится к выборным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки магистров 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника».

Для усвоения данного курса необходимо изучить такие обязательные модули (дисциплины), как модуль «Общая физика», «Математика», «Теоретическая физика», дисциплины «Физика полупроводников», «Физика конденсированного состояния», а также дисциплина «Физико-химические основы технологии микро- и наноструктур». Дисциплина «Физика аморфных и нанокристаллических полупроводников» находится в логической связке с такими дисциплинами как «Квантовая теория твердого тела», «Нанофотоника», «Физика поверхности полупроводников и систем пониженной размерности», «Туннельные явления в нанофизике», «Избранные главы физики твердого тела» и другие. Всестороннее овладение данной дисциплиной является важным для системного комплексного представления о фундаментальных основах физики неупорядоченных полупроводников и знаний об основах прикладного применения аморфных полупроводников и наноразмерных полупроводниковых включений в широкозонной матрице.

Целями освоения дисциплины «Физика аморфных и нанокристаллических полупроводников» являются:

- формирование базовых знаний и навыков, необходимых для разработки и проектирования технологических и материаловедческих приемов формирования приборных микро- и наноструктур с использованием новых и традиционных некристаллических и нанокристаллических материалов на основе тетраэдрических полупроводников;
- изучение структурно-морфологических, электронных, фотоэлектрических и оптических свойств аморфных и нанокристаллических полупроводников, физико-химических основ процессов современной технологии их формирования и применения в производстве элементов и приборов микро-, нано- и оптоэлектроники;
- получение углубленного профессионального образования по физике и технике некристаллических полупроводников, обеспечивающего возможность быстрого и самостоятельного приобретения новых знаний для успешной профессиональной деятельности в области микро- и наноэлектроники.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-4. Готовность формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития физики полупроводников, электроники и наноэлектроники, а также смежных областей науки и техники, и способность обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач.

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	
ПК-4. Готовность формулировать цели	ПК-4.1. Знание тенденций и перспектив	ПК-4.1. Знать фундаментальные основы классификации структурного беспорядка в	Вопросы по темам/раз-

и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, и способность обособленно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач	<p>развития физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники</p> <p>ПК-4.2. Умение выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач.</p> <p>ПК-4.3 Умение обособленно выбирать теоретические и экспериментальные методы исследования материалов и изделий микро- и нанoeлектроники</p>	<p>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. Уметь использовать знания о современных исследованиях в области аморфного и нанокристаллического кремния при создании новых приборов электроники.</p> <p>ПК-4.3. Владеть навыками проведения технологических процессов и контроля свойств аморфных и нанокристаллических полупроводников.</p>	<p>делам дисциплины.</p> <p>Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму.</p> <p>Фонд тестовых заданий</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

3. Структура и содержание дисциплины «Физика аморфных и нанокристаллических полупроводников»

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа	32
самостоятельная работа	58 (работа в семестре) 36 (на подготовку к экзамену)
Промежуточная аттестация	3 семестр – экзамен

3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),	Всего (часы)	В том числе	
		Контактная работа, часы из них	

форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)		Занятия лекцион типа	Занятия лаборатор типа	Всего	Самостоятельная работа обучающегося, часы
Введение.	8	2	0	2	4
Основные методы получения аморфных и нанокристаллических полупроводников.	20	2	6	8	6
Электронная структура	14	2	0	2	10
Электронный транспорт в аморфных полупроводниках	20	2	6	8	10
Фотоэлектрические свойства аморфных полупроводников	20	2	6	8	10
Оптические свойства аморфных полупроводников	20	2	6	8	10
Применение аморфного и микрокристаллического кремния	14	2	0	2	12
Физические, технологические особенности микро- и нанокристаллического кремния	26	2	8	10	12
Промеж. аттестация Экзамен(3-й семестр) - 2 часа					
ИТОГО	144	16	32	48	74

Содержание разделов 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 p-n-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. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проводят в лекционной форме, в форме лабораторных занятий и в форме самостоятельной работы студентов. На лекциях студенты знакомятся с основными положениями физики и технологии аморфных и нанокристаллических полупроводников, в основном, на примере тетраэдрических кремния и германия. Программа дисциплины включает рассмотрение структурно-морфологических, электронных, фотоэлектрических и оптических свойств аморфных и нанокристаллических полупроводников, а также физико-химические основы процессов современных технологий их формирования и особенности их применения в новых приборах микро-, нано- и оптоэлектроники. Чтение лекций проводится в аудитории традиционно и с использованием медиа-демонстрации презентаций как дополнительного наглядного материала. Сложный наглядный материал презентаций предоставляется слушателям в виде распечатанных бумажных копий.

На лабораторных занятиях студенты приобретают практические навыки работы с технологическим оборудованием и оборудованием, позволяющим контролировать необходимые параметры получения и обработки, устанавливать соответствующие параметры образцов аморфных и нанокристаллических полупроводников с применением лабораторного оборудования.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Самостоятельная работа студентов включает в себя активное изучение лекционного материала совместно с соответствующими разделами учебных пособий и описаний лабораторных работ и рекомендованной литературы, подготовку к выполнению лабораторного практикума, обработку практически полученных результатов, оформление отчетов и подготовку к экзамену. Оценочными средствами для контроля текущей успеваемости являются текущие оценки в ходе регулярной для каждой подгруппы студентов работы на лабораторных занятиях и индивидуальную оценку в процессе и по завершению выполнения цикла лабораторных работ. Итоговая аттестация проводится в форме экзамена, включающего проверку знаний теоретических основ, указанных в разделе «Содержание дисциплины» и успеваемость по итогам практического выполнения лабораторных работ.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на лабораторных занятиях. Для прохождения итоговой аттестации проводится экзамен в третьем семестре, включающий в себя теоретические вопросы по всему курсу и темам лабораторного практикума.

Лабораторный практикум включает следующие лабораторные работы:

1. Температурная зависимость электропроводности аморфных полупроводников

2. Изучение колебательных свойств аморфного кремния методом ИК-спектроскопии.
3. Получение тонких пленок аморфного кремния ионно-плазменными методами
4. Люминесценция структур с массивами нановключений кремния в диэлектрической матрице.

Контрольные (экзаменационные) вопросы для проведения промежуточной аттестации (экзамена) по итогам освоения дисциплины:

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.
8. Методы получения безводородного аморфного кремния и германия.
9. Влияние основных технологических параметров на оптоэлектронные свойства аморфного кремния.
10. Ионная имплантация как метод получения слоев аморфного кремния.
11. Структура ближнего порядка тетраэдрических аморфных и халькогенидных стеклообразных полупроводников.
12. Структура ближнего порядка. Определяющая роль ближнего порядка. Правило Иоффе-Регеля. Случайная сетка атомов.
13. Структура ближнего порядка. Краткая характеристика методов изучения структуры ближнего порядка аморфного полупроводника.
14. Кривая радиального распределения атомов и параметры ближнего порядка.
15. Моделирование структуры ближнего порядка. Непрерывная случайная сетка Полка-Будро. Определение «идеального» аморфного полупроводника.
16. Дефекты в аморфных полупроводниках. Оборванные и ненасыщенные связи. Микро- и макро дефекты.
17. Реальные аморфные полупроводники. Тонкие пленки. Микропоры и их происхождение. Нано- и микронеоднородности.
18. Реальные аморфные полупроводники. Примеси и неоднородность состава.
19. Основные моменты теории электронных состояний в аморфных полупроводниках. Теоремы корреляции Бонч-Бруевича. Постулаты Мотта для зонной диаграммы.
20. Модель Губанова. Локализация Андерсона. Критерий локализации. Радиус локализации.
21. Модель плотности состояний Коэна-Фрицше-Овшинского. Модели состояний по Мотту-Дэвису. Связь с реальностью.
22. Химические связи и модели плотности состояний для $a\text{-Si:H}$. Зарядовые состояния дефектов типа оборванной связи.
23. Делокализованные электронные состояния в энергетических зонах. Край подвижности.
24. Электронные состояния в области зонных хвостов.
25. Электронные состояния в щели подвижности.
26. Методы определения величины и профиля плотности состояний в щели подвижности $a\text{-Si:H}$. Подходы и трудности.
27. Влияние условий получения и термообработки пленок аморфного кремния на распределение плотности состояний в щели подвижности.
28. Основные механизмы электропереноса. Минимальная металлическая проводимость.
29. Температурная зависимость прыжковой проводимости.

30. Прыжки переменной длины. Механизм Мотта.
31. Термо-ЭДС в аморфных полупроводниках и ее температурная зависимость. Связь с температурной зависимостью проводимости.
32. Дрейфовая подвижность носителей в аморфном кремнии.
33. Влияние примеси и дефектов типа оборванной связи на подвижность в аморфном кремнии.
34. Особенности эффекта Холла в аморфном полупроводнике.
35. Фотопроводимость пленок аморфного кремния. Влияние беспорядка. Феноменологическая модель Роуза-Фрицше.
36. Фотопроводимость пленок аморфного кремния. Влияние глубоких состояний дефектов
37. Фотопроводимость пленок аморфного кремния. Влияние легирования бором и фосфором.
38. Рекомбинация и фотолюминесценция в аморфных полупроводниках. Полосы фотолюминесценции в пленках a-Si:H.
39. Проблема легирования аморфных полупроводников. Подход Спира-ЛеКомбера к легированию аморфного кремния.
40. Легирование аморфного кремния методом ионной имплантации. Опыт нижегородской школы ионной имплантации.
41. Метастабильность свойств аморфных полупроводников.
42. Факторы и механизмы снижения стабильности оптоэлектронных свойств аморфного кремния.
43. Температурная, радиационная деградация a-Si:H. Эффект Стеблера-Вронски.
44. Оптическое поглощение в аморфном кремнии. Область фундаментального поглощения.
45. Оптическое поглощение в аморфном кремнии. Оптическая щель.
46. Форма края поглощения.
47. Край Урбаха.
48. Колебательные свойства аморфных полупроводников и их сплавов.
49. Полевой транзистор на основе аморфного кремния и его возможные приложения.
50. Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии на основе аморфного кремния. Типичные приборные структуры.
51. Фотоприемники и датчики изображения на основе аморфного кремния и его сплавов.
52. Многослойные оптические покрытия с применением аморфных полупроводников.
53. Нанокремний. Физические, физико-химические и химические методы формирования. Особенности оптоэлектронных свойств.
54. Пористый кремний. Основные методы получения. Люминесцентные свойства.
55. Пористый кремний. Электронный транспорт. Резонансное туннелирование и кулоновская блокада. Перспективные направления в применении.
56. Многослойные нанопериодические структуры с массивами нанокристаллов кремния в диэлектрической матрице. Основные методы формирования. Люминесцентные свойства.
57. Массивы нанокристаллов кремния в диэлектрической матрице. Электронный транспорт. Элементы энергонезависимой памяти.
58. Нанокремний. Перспективные направления в применении. Светоизлучающие структуры. Солнечные элементы. Элементы памяти.

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.: Высш. шк., 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.: Высш. шк., 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.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
<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 ошибки.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	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 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 владения материалом. 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

Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведен выше (раздел 2). Ниже приведена таблица образовательных дескрипторов (отличительных признаков уровней освоения компетенций).

Уровень освоения компетенции	Отличительные признаки
Начальный	<ul style="list-style-type: none"> - воспроизводит термины и основные понятия физики аморфных и нанокристаллических полупроводников; - корректно объясняет основные модели беспорядка и владеет основными представлениями об энергетическом спектре электронов в аморфных полупроводниках и влиянием размера нанокристаллов в нанокремнии; - способен сопоставлять методы технологического получения и легирования аморфных полупроводников и методах формирования нанокремния; - имеет представление об основных свойствах электропереноса в аморфных полупроводниках.
Базовый	<ul style="list-style-type: none"> - выявляет взаимосвязь между степенью неупорядоченности и вариации энергетического спектра по моделям зонных диаграмм; - знает фундаментальные основы процессов снижения плотности локализованных состояний в щели подвижности аморфного кремния применительно к созданию основных тонкопленочных приборов микроэлектроники и фотоники; - знает принципы и возможности технологий формирования нескольких вариантов нанокремния; - знает принципы выбора технологических параметров получения аморфного кремния «приборного» качества.
Высокий	<ul style="list-style-type: none"> - знает количественные параметры, материалы и особенности технологических модификационных методик направленного изменения свойств аморфных и нанокристаллических полупроводников на примере кремния или германия для применения их в приборных приложениях микроэлектроники и фотоники и современные методы контроля их свойств и параметров; - применяет законы, правила, алгоритмы, теоретические модели и др.; - формулирует выводы; - оценивает соответствие теории и эксперимента; - оценивает научную и прикладную значимость результатов.

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена (3 семестр), на котором определяются:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способности студентов использовать полученные знания для выполнения конкретных заданий.

Форма проведения экзамена – индивидуальное собеседование. Экзаменационный билет содержит два вопроса. При выставлении экзаменационной оценки учитываются результаты

сдачи студентом промежуточных отчетов по лабораторным занятиям. Контроль текущей успеваемости включают в себя текущие отчеты по лабораторным работам, обсуждение полученных данных с преподавателем. Экзаменационная оценка выставляется по принятой в ННГУ семибалльной шкале. Экзаменационные оценки «превосходно» и «отлично» – соответствуют оценке 5 (отлично) по пятибалльной шкале, оценки «очень хорошо» и «хорошо» – соответствуют оценке 4 (хорошо), оценка «удовлетворительно» – соответствует оценке 3 (удовлетворительно), оценки «неудовлетворительно» и «плохо» – соответствуют оценке 2 (неудовлетворительно).

Критерии выставления оценки при сдаче экзамена

Семибалльная шкала	Описание семибалльной шкалы	Пятибалльная шкала
5,5 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»	5 отлично
5 отлично	Отличная подготовка. Студент отвечает полностью на вопросы билета в рамках изученных алгоритмов и подходов. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.	
4,5 очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает хороший уровень знания вопросов билета и отвечает с небольшими неточностями.	4 хорошо
4 хорошо	Хорошая подготовка. Студент показывает средний уровень знания вопросов билета и отвечает на некоторые дополнительные вопросы преподавателя (в рамках билета).	
3 удовлетворительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.	3 удовлетворительно
2 неудовлетворительно	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.	2 неудовлетворительно
1 плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.	1 плохо

6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде *знаний, умений и владений* используются следующие процедуры и технологии:

- для оценивания результатов обучения в виде *знаний* используются *тестовый опрос* теоретических знаний студентов по пройденным темам лекционного курса и выполненного практикума;

- для оценивания результатов обучения в виде *умений* используются простые задания для выполнения лабораторных работ, включающих несколько вопросов в виде краткой формулировки действий (комплекса действий) для проведения необходимых технологических операций и измерений, которые следует выполнить, или описание результата, который можно считать достоверным.

- для оценивания результатов обучения в виде *владений* используются комплексные задания лабораторных работ, требующие поэтапного решения в типичной ситуации и развернутого ответа.

- для проведения *итогового контроля* сформированности компетенции используются оформление и защита отчетов по лабораторным работам.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя контрольные вопросы, содержащиеся в учебно-методических пособиях по лабораторным работам. Эти вопросы используются при допуске к выполнению экспериментальной части работ. По итогам проверки отчетов о выполнении работ заполняется контрольный лист, в котором преподаватели, проводившие лабораторные занятия выставляют отметку о выполнении. Лабораторный практикум по курсу считается пройденным, если в контрольном листе набрано необходимое число отметок о выполнении лабораторных работ.

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Типовые тестовые вопросы:

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

1. Какие из указанных систем **не относятся** к неупорядоченным системам:

- 1) жидкости;
- 2) аморфные твердые тела;
- 3) стеклообразные твердые тела;
- 4) сильнолегированные полупроводники;
- 5) поверхность кристаллического полупроводника;
- 6) полупроводниковые и металлические неупорядоченные сплавы;
- 7) таковых нет (все перечисленные в п. 1–6 относятся).

2. Для каких металлов и полупроводников верно неравенство между средней энергией системы (E) и ее изменением (ΔE) из-за неупорядоченности:

$$\Delta E \ll F_{\text{и}} \quad \Delta E \ll kT$$

Ответ: 1) для аморфных; 2) для кристаллических.

3. Классификация пористого кремния по размерам пор включает: *микропористый, мезопористый, макропористый*, - и соответствует размеру пор соответственно:

- 1) ≤ 2 нм, 2–50 нм, > 50 нм;
- 2) > 50 нм, 2–50 нм, ≤ 2 нм.

4. «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.

5. Наиболее оптимальным методом получения $a\text{-Si:H}$ является:

- 1) метод испарения в среде водорода;
- 2) пиролитическое осаждение из силана;
- 3) плазмой активированное химическое осаждение из силана;
- 4) магнетронное распыление кремния в среде водорода;
- 5) PE CVD;
- 6) TE CVD;
- 7) Photo CVD;
- 8) метод ионно-лучевой аморфизации кристаллического кремния.

6. Какому механизму проводимости соответствует температурная зависимость термоЭДС вида:

$$S = \frac{\pi^2 k^2 T}{3e} \left[\frac{d \ln \sigma(E)}{dE} \right]$$

- 1) прыжковая проводимость по состояниям в хвосте зоны проводимости;
- 2) прыжковая проводимость по состояниям в хвосте валентной зоны;
- 3) прыжковая проводимость по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми;
- 4) проводимость по распространенным состояниям в зоне проводимости.

Типовые контрольные (экзаменационные) вопросы и задания

1. Ионная имплантация как метод получения слоев аморфного кремния.
2. Полевой транзистор на основе аморфного кремния и его возможные приложения.

1. Моделирование структуры ближнего порядка. Непрерывная случайная сетка Полка-Будро. Определение «идеального» аморфного полупроводника.
2. Оптическое поглощение в аморфном кремнии. Область фундаментального поглощения.

1. Методы определения величины и профиля плотности состояний в щели подвижности а-Si:H. Подходы и трудности.
2. Влияние примеси и дефектов типа оборванной связи на подвижность в аморфном кремнии.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Физика аморфных и нанокристаллических полупроводников»:

а) Основная литература:

1. Забродский А. Г. Электронные свойства неупорядоченных систем: учеб. пособие для вузов / под общ. ред. В. И. Ильина и А. Я. Шика. - СПб. : Наука, 2000. - 72 с. - ISBN 5-02-024927-0: 18.00. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=44374&idb=0> Шифры: 537.311 - 3-12 УДК: 537.311.322(07)
2. Электронная теория неупорядоченных полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич и др. - М.: Наука, 1981. - 384 с. <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/solidstate.htm>
3. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979 <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/solidstate.htm>
4. Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля / Ищенко А.А., Фетисов Г.В., Асланов Л.А. - Москва: Физматлит, 2011. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=646934&idb=0> Ссылка на полный текст документа: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922113694.html>

б) Дополнительная литература

1. Аморфные полупроводники / под ред. М. Бродский; пер. с англ. под ред. А. А. Андреева, В. А. Алексева. - М.: Мир, 1982. - 419 с. ISBN 5-03-002125-6 : 4.00. Постоянная ссылка: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=75576&idb=0> Шифры: 537.3 - А 62 УДК: 537.311.322:539.21
2. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах: в 2-х томах. - М.: Мир, 1982. - 663 с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=370910&idb=0>
3. Физика гидрогенизированного аморфного кремния. Под ред. Дж. Джоунопулоса и Дж. Люковски: в 2-х частях. - М.: Мир, 1987. - 800 с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=83192&idb=0>
4. Меден А., Шо М. Физика и применение аморфных полупроводников. - М.: Мир, 1991. - 690 с. Постоянная ссылка: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=75585&idb=0> Шифры: 537.3 - М 42 УДК: 537.311.322:539.21

5. Аморфный кремний и родственные материалы. Под ред. Х. Фрицше. - М.: Мир, 1991.- 44 с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=75577&idb=0> Шифры: 537.3 - А 63 УДК: 537.311.322:539.21
6. Аморфные и поликристаллические полупроводники. Под ред. В. Хейванга. - М.: Мир, 1987. - 160 с. Постоянная ссылка: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=75575&idb=0> Шифры: 537.3 - А 62 УДК: 537.311.322:539.21
7. Андриевский Р.А. Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы - Москва: Лаборатория знаний, 2020. - 255 с. - ISBN 978-5-00101-906-0. Постоянная ссылка: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=736510&idb=0> УДК: [532.6+541.18+620.18+620.22+669.018]-022.532 Ссылка на полный текст документа: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785001019060.html>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

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 установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и нанoeлектроника».

Автор:

доцент кафедры физики полупроводников и оптоэлектроники
к.ф.-мат. наук, А.В. Ершов

Рецензент:

заведующий кафедрой теоретической физики, д.ф.-м.н. В.А. Бурдов

Заведующий кафедрой физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники
д.ф.-м.н. профессор Д. А. Павлов

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «17» ноября 2022 г.

Председатель Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ
к.ф.-м.н. Перов А.А.