

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 наноэлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол № 4 от «14» декабря 2021 г.
Г.

Рабочая программа дисциплины
Материалы и методы нанотехнологии

Уровень высшего образования
бакалавриат

Направление подготовки: 28.03.01 Нанотехнологии и микросистемная техника
Направленность (профиль): материалы микро- и наносистемной техники

Форма обучения: очная

Нижний Новгород, 2022

1. Место и цели дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Материалы и методы нанотехнологии» относится к обязательным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника». Для усвоения данного курса необходимо изучить такие модули (дисциплины) в рамках образовательной программы бакалавра как «Физика», «Химия» базовой части цикла математических и естественно-научных дисциплин, «Физика полупроводников», «Квантовая механика», «Кристаллография» базовой части профессионального цикла, «Сканирующая зондовая микроскопия» вариативной части профессионального цикла и иметь базовые представления о свойствах полупроводников, квантово-размерных эффектах, основах технологии материалов.

Цель освоения дисциплины "Материалы и методы нанотехнологии" - сформировать представление об основных направлениях развития и предельных возможностях современных нанотехнологий, о материалах и методах получения материалов и компонентов нано- и микросистемной техники. В задачи дисциплины входит изучение основных закономерностей технологических процессов, применяемых при изготовлении наноразмерных элементов и структур, формирование навыков работы на технологическом оборудовании и представления о методах контроля параметров и свойств наноразмерных объектов.

Знания, полученные в ходе изучения дисциплины «Материалы и методы нанотехнологии», необходимы для выполнения выпускной квалификационной работы.

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

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- ПК-3. Готовность применять знания о фундаментальных основах технологических процессов получения материалов и компонентов нано- и микросистемной техники и использовать их в производстве.

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-3. Готовность применять знания о фундаментальных основах технологических процессов получения материалов нано- и микросистемной техники и использовать их в	ПК-3.1. Знает фундаментальные основы технологических процессов получения материалов нано- и микросистемной техники. ПК-3.2. Умеет проводить	Знать фундаментальные основы технологических процессов получения материалов и компонентов нано - и микросистемной техники, в том числе физико-химические принципы и методы гетероэпитаксиального наращивания полупроводниковых слоев,	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект задач и заданий к лабораторному

производстве	<p>экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства материалов nano- и микросистемной техники и использовать их в производстве</p> <p>ПК-3.2. Имеет опыт разработки методик экспериментальной проверки технологических процессов и исследования параметров наноструктурированных материалов</p>	<p>основы зонной инженерии; принципы выбора оптимальных параметров проведения технологических процессов; предельные возможности технологий, применяемых при производстве электронной компонентной базы, материалов и компонентов nano- и микросистемной техники; современные методы анализа и контроля наноструктурированных материалов и систем.</p> <p>Уметь объяснять сущность физических и химических явлений на всех этапах технологических процессов и обоснованно выбирать материалы для выращивания конкретных структур;</p> <p>Владеть навыками проведения технологических процессов и контроля свойств материалов и систем</p>	<p>практикуму.</p> <p>Фонд тестовых заданий</p>
--------------	---	--	---

Завершение формирования компетенции ПК-3 происходит при прохождении производственной практики.

3. Структура и содержание дисциплины "Материалы и методы нанотехнологии"

3.1 Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	6 ЗЕТ
Часов по учебному плану	216
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	58
- занятия семинарского типа	32
- КСРИФ	3
самостоятельная работа	87 (работа в семестре) 36 (на подготовку к экзамену)
Промежуточная аттестация	7 семестр – зачет 8 семестр – экзамен

3.2. Содержание дисциплины

№ п/п	Раздел Дисциплины	С е м е с т р	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	Занятия лабораторного типа	Всего	
1	Введение	7	3	2			2	1
2	Классификация и свойства наноматериалов	7	20	4		8	12	8
3	Полупроводниковые материалы	7	4	2			2	2
4	Твердые растворы. Свойства твердых растворов на основе АЗВ5 Основы зонной инженерии	7	10	6			6	4
5	Понятие эпитаксии. Эпитаксиальные методы	7	28	6		12	18	10
6	Основные представления общей теории образования фаз	7	16	6		4	10	6
7	Механизмы эпитаксии	7	18	2		8	10	8
8	Гетеропереходы. Структуры на основе гетеропереходов	7	8	4			4	4
	Промежуточная аттестация - зачёт, 1 час							
9	Технология двумерных гетероэпитаксиальных полупроводниковых систем	8	10	4			4	6
10	Самоорганизация квантовых точек, нитей и нанотрубок	8	14	6			6	8
11	Функциональные и конструкционные материалы	8	10	4			4	6
12	Методы нанолитографии	8	10	4			4	6
13	Методы туннельно-зондовой нанотехнологии	8	10	4			4	6
14	Нелитографические методы создания периодических наноструктур	8	8	2			2	6

15	Методы получения нанокompозитных материалов	8	8	2			2	6
	Промежуточная аттестация - экзамен 2 часа							
	Самостоятельная подготовка к экзамену – 36 часов							

Содержание разделов дисциплины

1. Введение

Цели и задачи НТ. Основные понятия и определения. Физические и технологические проблемы и ограничения микроминиатюризации полупроводниковых устройств. Понятие мезоскопического размера. Физические эффекты, возникающие при уменьшении размеров до нанометровых. Технологические ограничения микроминиатюризации.

2. Классификация и свойства наноматериалов

Классификация веществ и материалов по размеру частиц и размерности. Наноструктурные элементы вещества: атомы, молекулы, фуллерены, нанотрубки, кластеры. Квантовые точки – искусственные молекулы. Свойства наноматериалов: механические, теплофизические, физико-химические, электрофизические, оптические.

Углеродные нанотрубки, технология изготовления и свойства. Перспективы использования. Полевой транзистор на нанотрубках.

3. Полупроводниковые материалы и структуры на их основе.

Полупроводниковые материалы для нанотехнологий. Кремний и его модификации (кремний на изоляторе, пористый кремний). Сравнительный анализ Si, Ge, GaAs.

4. Твердые растворы. Основы зонной инженерии

Наиболее распространенные системы полупроводниковых материалов на основе твердых растворов A^3B^5 . Трех- и четырехкомпонентные твердые растворы на основе полупроводников A^3B^5 . Правило Вегарда. Основы зонной инженерии. Пример зонной инженерии для четырехкомпонентного твердого раствора InGaAsP.

Нитриды и их характеристика. Проблема подложек и выращивание буферных слоев. Твердые растворы на основе нитридов.

5. Понятие эпитаксии. Эпитаксиальные методы

Гомо- и гетероэпитаксия. Физическое осаждение из паровой фазы. Получение аморфных, поликристаллических и монокристаллических пленок. Молекулярно-лучевая эпитаксия элементарных полупроводников и полупроводников на основе соединений A^3B^5 , осаждение пленок диэлектриков и металлов.

Химическое осаждение из газовой фазы: основные закономерности и методика. Эпитаксия из металлоорганических соединений и летучих неорганических гидридов. Наиболее распространенные системы веществ - источников компонент полупроводниковых материалов и твердых растворов. МОС-гидридная эпитаксия полупроводников на основе соединений A^3B^5 .

6. Основные представления общей теории образования фаз.

Понятие критического зародыша. Термодинамическая теория зародышеобразования. Молекулярно-кинетическая теория зародышеобразования. Теория И. М. Лифшица – В. В. Слезова.

7. Механизмы эпитаксии

Механизмы гетероэпитаксиального роста: Франка-ван-дер-Мерве, Фольмера-Вебера, Странского-Крастанова. Зависимость начальных механизмов эпитаксии от рассогласования решеток подложки и слоя.

8. Гетеропереходы. Структуры на основе гетеропереходов

Гетеропереходы и их классификация. Общие принципы создания гетеропереходов. Оценки разрывов зон. Структуры на основе гетеропереходов. Двойные гетероструктуры (ДГС). Понятие электронного и оптического ограничения. Понятие сверхинжекции.

9. Технология двумерных гетероэпитаксиальных полупроводниковых систем

Гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ). Гетероструктуры с двумерным электронным газом: структуры с одиночным гетеропереходом. Квантово-размерные гетероструктуры для полупроводниковых лазеров. Сверхрешетки квантовых ям. Классификация сверхрешеток. Приборные применения полупроводниковых сверхрешеток и квантовых ям.

Псевдоморфный рост. Упруго-напряженные и решеточно-согласованные КЯ. Принципы выбора полупроводниковых материалов.

Модулированное и селективное (дельта-) легирование. Гетероструктуры с высокой плотностью двумерного электронного газа. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ-транзисторы).

Технология изготовления металлических и полупроводниковых наноточек, нанонитей литографическими методами

10. Самоорганизация квантовых точек, нитей и трехмерных структур, имеющих радиальную симметрию (нанотрубки)

Типы наноструктур, выращиваемых с использованием эффектов самоорганизации. Упорядоченные массивы трехмерных когерентно-напряженных островков в гетероэпитаксиальных рассогласованных системах. Самоорганизованный рост по механизму Странского-Крастанова. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов. Инжекционные лазеры на вертикально связанных квантовых точках.

Структуры на микроскопически упорядоченных фасетированных поверхностях. Периодические структуры плоских доменов (например, островков монослойной высоты). Структуры с периодической модуляцией состава в эпитаксиальных пленках твердых растворов полупроводников.

Преобразование планарных напряженных гетероструктур и сверхрешеток в трехмерные, имеющие радиальную симметрию (3D-наноструктуры, нанотрубки). Перспективы изготовления электронных приборов с применением нанотрубок.

11. Функциональные и конструкционные материалы

Пленки поверхностно-активных веществ. Структура ПАВ на примере молекулы стеариновой кислоты. Пленки Ленгмюра-Блоджетт, метод получения и свойства.

12. Методы нанолитографии

Уменьшение размеров элементов методами традиционной планарной технологии за счет разработки, создания и применения экстремальных ультрафиолетовых источников излучения со сверхкороткой длиной волны (13,5 нм) при процессах литографии. Источники экстремального ультрафиолета. Лазерное излучение: взаимодействие с поверхностью и применение в НТ. Лазерная абляция. Многослойные брэгговские зеркала. Резисты на основе неорганических материалов. ДВУФ-нанолитограф.

Электронная, ионная и рентгеновская литографии. Применение «линзы Кумахова» для нанолитографии. Маски и резисты для разных типов литографии. Сравнительный анализ перспектив ультрафиолетовой, электронной, ионной и рентгеновской литографий.

Новые литографические методы. Нанопечатная литография. Лазерная интерференционная литография. Иммерсионная литография.

13. Методы туннельно-зондовой нанотехнологии

Физические основы зондовой нанотехнологии. Классификация методов зондовой нанотехнологии.

Контактное формирование нанорельефа поверхности. Требования к зондам. Бесконтактное электростатическое формирование нанорельефа поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии.

Локальная глубинная модификация полупроводниковых подложек. Условия локальной глубинной модификации полупроводниковых подложек. Оценка порогового напряжения, глубины залегания области модификации.

Полевое испарение проводящих материалов с нанометровым разрешением. Оценка размытия проводящих дорожек. Основы управления массопереносом. Режим формирования острия зонда. Электрохимический массоперенос. Условия для электрохимического массопереноса. Массоперенос из газовой фазы.

Локальное анодное окисление металлов и полупроводников. Основы теории локального анодного окисления металлов и полупроводников в слое адсорбата молекул воздуха. Влияние влажности воздуха.

14. Нелитографические методы создания периодических наноструктур

Самоорганизующиеся упорядоченные пористые материалы. Упорядоченные пористые материалы в технологии фотонных кристаллов. Использование темплатных методов.

15. Методы получения нанокompозитных материалов

Золь-гель технологии; интеркаляция полимеров и наночастиц в слоистые структуры; сочетание процессов полимеризации и формирования наноразмерных частиц. Формирование структур на основе коллоидных растворов.

4. Образовательные технологии

Занятия по дисциплине проходят в лекционной форме и в форме лабораторных практикумов, позволяющих формировать у студентов навыки работы с технологическим оборудованием и оборудованием, позволяющим контролировать выращенные структуры по составу, размерам, степени упорядоченности. При чтении лекций используются учебные презентации в формате MSO PowerPoint.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины.

Самостоятельная работа включает в себя теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы, подготовку к лабораторным работам, обработку полученных на лабораторных занятиях результатов, оформление отчетов и подготовку к экзамену.

Оценочные средства для контроля текущей успеваемости включают в себя устный опрос на лабораторных занятиях. Для прохождения итоговой аттестации проводится зачёт

по темам, изученным в 7-м семестре, и экзамен в 8-м семестре, включающий в себя теоретические вопросы по всему курсу и темам лабораторного практикума.

Перечень лабораторных работ:

1. Изучение основ гетероэпитаксиального роста при молекулярно-лучевой эпитаксии. Эпитаксиальное наращивание сернистого свинца на сколах кристаллов NaCl.
2. Изучение основ гетероэпитаксиального роста при молекулярно-лучевой эпитаксии. Эпитаксиальное наращивание слоев кремния на сапфире.
3. Аллотропные состояния углерода: нанотрубки и графен. Технологии выращивания. Исследование структуры.
4. Сканирующая зондовая литография.

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

1. Цели и задачи современной нанотехнологии. Физические и технологические проблемы и ограничения микроминиатюризации полупроводниковых устройств. Понятие мезоскопического размера.
2. Классификация веществ и материалов по размеру частиц и размерности. Свойства нанобъектов и методы получения наноразмерных материалов.
3. Углеродные нанотрубки, технология изготовления и свойства. Перспективы использования. Полевой транзистор на нанотрубках.
4. Пленки поверхностно-активных веществ. Структура ПАВ на примере молекулы стеариновой кислоты. Пленки Ленгмюра-Блоджетт, метод получения и свойства.
5. Полупроводниковые материалы для нанотехнологий. Кремний и его модификации (кремний на изоляторе, пористый кремний). Сравнительный анализ Si, Ge, A^3B^5 .
6. Наиболее распространенные системы полупроводниковых материалов на основе твердых растворов A^3B^5 . Трех- и четырехкомпонентные твердые растворы на основе полупроводников A^3B^5 . Правило Вегарда.
7. Зонная инженерия. Пример зонной инженерии для четырехкомпонентного твердого раствора InGaAsP.
8. Нитриды и их характеристика. Проблема подложек и выращивание буферных слоев. Твердые растворы на основе нитридов.
9. Гетеропереходы и их классификация. Общие принципы создания гетеропереходов. Оценки разрывов зон. Правило корреляции анионов.
10. Гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ). Псевдоморфный рост. Упруго-напряженные и решеточно-согласованные КЯ.
11. Квантово-размерные гетероструктуры для полупроводниковых лазеров. Характеристика и назначение слоев в гетероструктуре.
12. Классификация сверхрешеток. Критерии выбора материалов. Технология выращивания. Приборные применения полупроводниковых сверхрешеток и квантовых ям.
13. Технология изготовления металлических и полупроводниковых наноточек, нанонитей литографическими методами.
14. Модуляционное и селективное легирование полупроводниковых материалов. Подвижность носителей в системах с селективным легированием. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ-транзисторы).
15. Основные представления общей теории образования фаз. Понятие критического зародыша. Термодинамическая теория зародышеобразования.
16. Основные представления общей теории образования фаз. Молекулярно-кинетическая теория зародышеобразования.

17. Понятие эпитаксии. Механизмы эпитаксии и их характеристики. Основы теории самоорганизованного роста квантовых точек (механизм Странского-Крастанова).
18. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Принципиальные элементы установки МЛЭ. Модель роста соединений A^3B^5 .
19. Метод МОС-гидридной эпитаксии. Схема и составляющие ростовой установки. Источники компонент полупроводниковых материалов и твердых растворов.
20. Типы наноструктур, выращиваемых с использованием эффектов самоорганизации: упорядоченные массивы трехмерных когерентно напряженных островков в гетероэпитаксиальных рассогласованных системах.
21. Трехмерные массивы когерентно-напряженных островков. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов. Инжекционные лазеры на вертикально связанных квантовых точках.
22. Типы наноструктур, выращиваемых с использованием эффектов самоорганизации: структуры на микроскопически упорядоченных фасетированных поверхностях.
23. Типы наноструктур, выращиваемых с использованием эффектов самоорганизации: периодические структуры плоских доменов (например, островков монослойной высоты).
24. Типы наноструктур, выращиваемых с использованием эффектов самоорганизации: структуры с периодической модуляцией состава в эпитаксиальных пленках твердых растворов полупроводников.
25. Преобразование планарных напряженных гетероструктур и сверхрешеток в трехмерные, имеющие радиальную симметрию (3D-наноструктуры, нанотрубки).
26. Метод молекулярного насаивания и атомно-слоевой эпитаксии.
27. Формирование коллоидных структур на основе коллоидных растворов. Золь-гель технология.
28. Ионно-лучевой метод формирования полупроводниковых нановключений в диэлектриках.
29. Литографические методы формирования наноструктур. Сравнительный анализ перспектив электронной, ионной, ультрафиолетовой и рентгеновской литографий.
30. Литография с использованием крайнего ультрафиолета. Многослойная брэгговская оптика. ДВУФ-нанолитограф.
31. Рентгеновская литография. Оптика Кумахова.
32. Ионная и электронно-лучевая литография.
33. Лазерная интерференционная литография. Интерференционная иммерсионная литография. Нанопечатная литография.
34. Физические основы зондовой нанотехнологии. Классификация методов зондовой нанотехнологии.
35. Контактное формирование нанорельефа поверхности. Требования к зондам. Бесконтактное электростатическое формирование нанорельефа поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии.
36. Локальная глубинная модификация полупроводниковых подложек. Условия локальной глубинной модификации полупроводниковых подложек. Оценка порогового напряжения, глубины залегания области модификации.
37. Локальное анодное окисление металлов и полупроводников. Основы теории локального анодного окисления металлов и полупроводников в слое адсорбата молекул воздуха. Влияние влажности воздуха.

Дополнительные экзаменационные вопросы:

1. Атомная структура поверхностного слоя.
2. Что такое поверхностная энергия.
3. Что такое ПАВ? Что такое амфифильные вещества? Что такое коллоидные растворы?
4. Какими свойствами обладают ленточные пленки?

5. Твердые растворы, их классификация. Закон Вегарда.
6. Гетеропереходы и их классификация. Общие принципы создания гетеропереходов. Правило анионов. Оценки разрывов зон.
7. Условия наблюдения квантовых размерных эффектов.
8. Проблема границ раздела в технологии полупроводниковых гетеропереходов. Физические и технологические ограничения получения резких гетерограниц.
9. Влияние диффузии и сегрегации на резкость границ раздела. Технологические методы повышения резкости гетерограниц.
10. Модуляционное и δ -легирование полупроводниковых материалов. Модулированные сверхрешетки и их применение.
11. С помощью модулированного легирования можно повышать подвижность двумерных электронов не только в одиночных ГС, но и в КЯ. Однако при этом получают значения подвижности меньше. Почему?
12. Что такое гетеропереход? Какие приборы нанoeлектроники реализованы на гетероструктурах.
13. Понятие гомогенного и гетерогенного зародышеобразования. Понятие критического зародыша. Размер критического зародыша. Как он зависит от пересыщения. Работа образования критического зародыша при гомогенном и гетерогенном зародышеобразовании.
14. Скорость зародышеобразования. Как зависит от пересыщения скорость присоединения частиц к зародышу при гомогенном и гетерогенном зародышеобразовании.
15. Атомистическая модель зародышеобразования. Число частиц в критическом зародыше. Скорость зародышеобразования.
16. Понятие эпитаксии. Гетеро – и гомоэпитаксия. Принцип выбора материалов.
17. Характеристика основных физических процессов при выращивании тонких пленок.
18. Процессы при взаимодействии подложки и газовой фазы. Адсорбция. Коэффициент аккомодации. Поверхностная диффузия.
19. Условия выращивания пленок. Роль температуры, пересыщения, примесей.
20. Механизмы эпитаксии. Понятие псевдоморфного роста. Условия псевдоморфности эпитаксиального слоя.
21. Общая характеристика методов получения тонких пленок. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии. Особенности сублимационной МЛЭ. Метод МОС-гидридной эпитаксии.
22. Особенности физической и химической адсорбции.
23. Различия методов МЛЭ и ГФЭ.
24. В чем сущность процесса атомно-слоевой эпитаксии?
25. Основные особенности метода молекулярного напыления по сравнению с методом МЛЭ.
26. МЛЭ. Чем определяется выбор оптимальной температуры процесса?
27. ГФЭ. Что такое газ – носитель? Какие к нему предъявляются требования?
28. Что такое сурфактант? Для каких целей используется?
29. Какой эпитаксиальный слой называется когерентным?
30. Равновесная фазовая диаграмма гетероэпитаксиальной системы с рассогласованием решеток, показывающая возможные механизмы эпитаксии в зависимости от рассогласования решеток и количества осажденного материала.
31. Зависимость энергии когерентно-напряженных островков (в расчете на 1 атом) от размера островка для случая разреженных островков. Зависимость от управляющего параметра. Физический смысл управляющего параметра.
32. Разрешающая способность литографических методов. Проблемы литографии, возникающие с уменьшением длины волны излучения.
33. Рентгеновская литография (РЛ). Источники рентгеновских лучей. Формирование изображения. Маски для РЛ.

34. Электронно-лучевая литография (ЭЛ). Формирование электронного луча. Факторы, влияющие на разрешающую способность.
35. Лазерное излучение: взаимодействие с поверхностью и применение в НТ. Лазерная абляция.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

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

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности 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, 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 отдельным и несущественным недочетом, 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	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые	Имеется минимальный набор навыков для	Продemonстрированы базовые навыки при	Продemonстрированы базовые навыки при решении	Продemonстрированы навыки при решении	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных

	ть оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	навыки. Имели место грубые ошибки.	решения стандартных задач с некоторыми недочетами	решении стандартных задач с некоторым и недочетами	стандартных задач без ошибок и недочетов.	нестандартных задач без ошибок и недочетов.	ых задач
--	---	---	---	--	---	---	----------

Перечень компетенций выпускников образовательной программы, в формировании которых участвует дисциплина, с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений) приведён 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 технологии полупроводниковых материалов; - корректно объясняет суть технологических процессов; - способен сопоставлять структурные характеристики и физические свойства полупроводниковых материалов....
Базовый	<ul style="list-style-type: none"> - выявляет взаимосвязь между структурой и свойствами; - применяет законы, правила, алгоритмы, теоретические модели и пр.; - знает фундаментальные основы процессов получения и функционирования материалов, компонентов и устройств электроники и нанoeлектроники; - знает предельные возможности технологий, применяемых при производстве электронной компонентной базы, материалов и компонентов электроники и нанoeлектроники; - знает принципы выбора материалов для проведения технологических процессов.
Высокий	<ul style="list-style-type: none"> - знает современные технологические методы формирования наноструктурированных материалов и современные методы контроля и диагностики их свойств; - формулирует выводы; - оценивает соответствие теории и эксперимента; - оценивает научную и прикладную значимость результатов...

6.2. Описание шкал оценивания

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета (7 семестр) и экзамена (8 семестр), на которых определяются:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;

- способности студентов использовать полученные знания для выполнения конкретных заданий.

Зачет проводится по итогам выполнения лабораторных работ и знания теоретических разделов дисциплины, запланированных для изучения в осеннем семестре. Результаты оформляются в виде отчетов по лабораторным работам.

Критерии выставления оценки при сдаче зачета:

Зачтено	Выполнены все задания лабораторной работы. Отчеты оформлены правильно, полно и аккуратно. Представлены все необходимые рисунки, схемы и графики. Оформление графиков полностью соответствует общепринятым требованиям. Могут присутствовать незначительные недочёты, которые студент после замечания преподавателя способен исправить самостоятельно. Студент отвечает полностью на вопросы зачета, показывая удовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. При ответе на дополнительные вопросы допускаются незначительные неточности.
Не зачтено	Не выполнены отчеты по лабораторным работам, одно или более заданий лабораторных работ. Отчеты выполнены с ошибками, не все рисунки и схемы представлены. Оформление графиков не соответствует общепринятым требованиям. Требования к оформлению отчетов не соблюдены. Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий.

При выставлении экзаменационной оценки применяется семибальная шкала, которая по окончании обучения (в дипломе бакалавра) трансформируется в пятибальную. По итогам освоения дисциплины сдается экзамен. Экзаменационный билет содержит два вопроса.

Критерии выставления оценки при сдаче экзамена

Семибальная шкала	Описание семибальной шкалы	Пятибальная 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 удовлетво рительно	Удовлетворительная подготовка. Студент показывает удовлетворительное знание вопросов билета и знание базовых понятий отвечая с наводящими вопросами преподавателя.	3 удовлетво рительно
2 неудовлет ворительн о	Студент показывает неудовлетворительное знание основ курса и базовых понятий. Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания.	2 неудовлет ворительн о
1 плохо	Подготовка совершенно недостаточна. Последующая пересдача возможна только с комиссией.	1 плохо

6.3. 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 фронтальный опрос на лабораторных работах;
- 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 отчётов 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 4 отметки о выполнении лабораторных работ.

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

Типовые вопросы для фронтальных опросов:

1. Что такое поверхностная энергия.
2. Проблема границ раздела в технологии полупроводниковых гетеропереходов.
3. Физические и технологические ограничения получения резких гетерограниц.
4. Влияние диффузии и сегрегации на резкость границ раздела.
5. Понятие гомогенного и гетерогенного зародышеобразования.
6. Понятие зародыша критического размера. Зависимость размера критического зародыша от пересыщения.
7. Работа образования критического зародыша при гомогенном и гетерогенном зародышеобразовании.
8. Скорость зародышеобразования. Как зависит от пересыщения скорость присоединения частиц к зародышу при гомогенном и гетерогенном зародышеобразовании.
9. Атомистическая модель зародышеобразования. Число частиц в критическом зародыше. Скорость зародышеобразования.
10. Понятие эпитаксии. Гетеро – и гомоэпитаксия.
11. Что такое температура эпитаксии.
12. Принцип выбора материалов для эпитаксиального выращивания классических гетероструктур.
13. Принцип выбора материалов для эпитаксиального выращивания гетероструктур с квантовыми ямами.
14. Принцип выбора материалов для эпитаксиального выращивания гетероструктур с кантовыми точками.
15. Характеристика основных физических процессов при эпитаксии.
16. Процессы при взаимодействии подложки и газовой фазы. Адсорбция. Поверхностная диффузия.
17. Условия выращивания эпитаксиальных слоев. Роль температуры, пересыщения, примесей.
18. Механизмы эпитаксии. Понятие псевдоморфного роста.
19. Общая характеристика методов получения тонких пленок. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии.
20. Назовите особенности сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии.
21. Метод МОС-гидридной эпитаксии.
22. Различия методов молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии.
23. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Чем определяется выбор оптимальной температуры процесса?
24. Газофазная эпитаксия. Что такое газ – носитель? Какие к нему предъявляются требования?
25. Какой эпитаксиальный слой называется когерентным?

Типовые задания для лабораторных работ:

1. Осуществите эксперимент по выращиванию сплошного эпитаксиального слоя PbS на NaCl. Технологические параметры задает преподаватель.
2. Подготовьте полученные слои для изучения их в электронном микроскопе.

3. Получите электронограммы и электронные микрофотографии выращенного слоя (оптимальное увеличение выбирается опытным путем). По характеру электронограмм убедитесь, что растут монокристаллические слои PbS. Определите направление их роста.
4. Сделайте вывод относительно механизма роста слоев PbS на NaCl. Для этого проанализируйте полученные электронограммы, приведенные в описании микрофотографии и значения энергии диссоциации двухатомных молекул, данные в таблице 1.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины Материалы и методы нанотехнологии

а) основная литература:

1. Шик А.Я. Физика низкоразмерных систем / А.Я. Шик, Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков - СПб.: Наука, 2001. - 160 с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=44367&idb=0>.
2. Щука А. А. Нанoeлектроника. / А.А. Щука. - М.: Физматкнига. 2007. - 464 с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=788533&idb=0>
3. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры/ Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг //ФТП. Т.32. №4. с. 385. 1998. <http://journals.ioffe.ru/articles/34295/>.
4. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур/ Ж.И. Алферов //ФТП. - 1998.- Т.32, №1.- с.3-18. <http://journals.ioffe.ru/articles/34218>.
5. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике / В.К. Неволин. - Издание 2-е, исправленное. - М.: Техносфера, 2014. - 176с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=645388&idb=0>
6. Драгунов В.П., Неизвестный В.А., Гридчин В.А. Нанoeлектроника. В 2 ч.: Учеб. пособие. - 3-е изд., исп. и доп.- М.: Издательство Юрайт, 2017.- 285+235 с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=784317&idb=0>

б) дополнительная литература:

1. Наноматериалы и нанотехнологии / Пряхин Е. И., Вологжанина С. А., Петкова А. П., Ганзуленко О. Ю. - 2-е изд., стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 372 с. - ISBN 978-5-8114-9299-2. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=782740&idb=0>
2. Нанотехнологии в электронике. Вып. 2. /Под ред. Ю.А. Чаплыгина. - М: Техносфера, 2013. - 688 с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=645430&idb=0>
3. Лозовский В. Н. Нанотехнологии в электронике. Введение в специальность: учебное пособие / Лозовский В. Н., Лозовский С. В. - 2-е изд., стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2019. - 332 с. - ISBN 978-5-8114-3986-7. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=777994&idb=0>
4. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. / А. И. Гусев. - 2-е изд., исправленное - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 416 с. Постоянная ссылка на документ: <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=634721&idb=0>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. Научная электронная библиотека (электронная библиотека периодических изданий - доступ через компьютеры, подключенные к сети ННГУ): <https://elibrary.ru/defaultx.asp>.
2. Электронная база данных по свойствам полупроводниковых материалов: <http://www.matprop.ru>.
3. Электронная база данных по физическим, химическим и структурным свойствам веществ и соединений (доступ через компьютеры, подключенные к сети ННГУ): <http://www.springermaterials.com>.

Учебно-методическое обеспечение дисциплины «Материалы и методы нанотехнологии» обусловлено наличием необходимого количества учебников в библиотеке и на сайте ННГУ в электронном виде.

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.

При выполнении лабораторных работ используются лаборатории кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники и соответствующее оборудование:

Технологическая лаборатория:

Вакуумные установки для эпитаксиального наращивания марки ВУП-4

Электроннографическая лаборатория:

Электроннограф ЭМР – 102

Лаборатория электронной микроскопии:

Просвечивающие электронные микроскопы ЭМВ – 100ЛМ

и лаборатории Научно-образовательного центра "Физика твердотельных наноструктур" и соответствующее оборудование:

Лаборатория электронной микроскопии:

Высокорастворяющий просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100F

Лаборатория Сканирующей зондовой микроскопии

Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator.

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 28.03.01 "Нанотехнологии и микросистемная техника".

Автор: к.ф.-м. н., доцент кафедры физики полупроводников, электроники и нанoeлектроники С. М. Планкина

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

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

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета
ННГУ, протокол б/н от «14» декабря 2021 г.

Председатель Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ А.А. Перов