

ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, СПИНТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ

КАФЕДРА ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

ОДОБРЕНО НТС ИНТЭЛ

Протокол № 03/3-21

от 31.08.2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
4	3	108	5	25	10		32	0	Э КР
Итого	3	108	5	25	10	0	32	0	

## **АННОТАЦИЯ**

Курс направлен на изучение основ технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, как одного из передовых и совершенных методов создания различных типов наноструктур. Вопросы создания структур затрагивают глубокую физику процесса, термодинамику и кинетику роста атомных слоев, самоорганизацию на наноуровне, современные методы получения, измерения сверхвысокого вакуума, методы экспресс – анализа.

В курсе рассматриваются вопросы создания, строения, ключевые особенности электрофизических, оптических и структурных свойств гетероструктур с пониженной размерностью, содержащих квантовые ямы, сверхрешетки, квантовые нити, квантовые точки и кольца. Дан обзор практических приложений для гетеросистем групп АЗВ5.

### **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Цель преподавания данной дисциплины состоит в:

- Ознакомлении студентов с основными закономерностями, подходами и технологиями, лежащими в основе метода создания наноструктур при помощи молекулярно-лучевой эпитаксии.

- Освоении терминологии, используемой в сфере вакуумной техники, физики процессов на поверхности.

- Усвоении студентами принципов создания и использования наноматериалов в электронике, фотонике,.

Основными задачами освоения дисциплины являются:

- Приобретение студентами объёма знаний, необходимого для самостоятельной работы, решения поставленной задачи, приобретение навыков выбора гетеросистемы, режимов роста, расчета ростовой последовательности при создании гетероструктур;

- Развитие способности ориентироваться в современных достижениях в области нанотехнологий, возможности использования современных нанотехнологий в собственных разработках;

- Приобретение студентами способности творчески мыслить и предлагать собственные решения и идеи при разработке новых наноматериалов или составляющих нанотехнологии.

### **2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО**

Дисциплина является профилирующей в цикле специальных дисциплин, формирует теоретические и практические знания по физике и технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, основам вакуумной техники, физике явлений на поверхности твердого тела. Освоение данной дисциплины базируется на изучении студентом дисциплин: Математики, Общей физики, Теории поля, Статистической физики, Физика полупроводников, Введение в современные нанотехнологии.

### **3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ**

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
разработка рабочих планов и программ проведения научных исследований и технических разработок, подготовка отдельных заданий для исполнителей	Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и нанoeлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и нанoeлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения	ПК-1 [1] - способен формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.008, 40.011	З-ПК-1[1] - Знать: современное состояние, тенденции и перспективы развития электроники, нанoeлектроники и смежных областей науки и техники. ; У-ПК-1[1] - Уметь: формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники, нанoeлектроники, физики конденсированных сред и других смежных областей науки и техники; В-ПК-1[1] - Владеть: навыками обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач в области электроники и нанoeлектроники

	электронных приборов и устройств.		
организация и проведение экспериментальных исследований, технологических и измерительных операций, необходимых для создания и изучения свойств материалов, элементной базы и приборов электроники и наноэлектроники	Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и наноэлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и наноэлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.	ПК-4 [1] - способен к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.008, 40.011	З-ПК-4[1] - Знать: современные экспериментальные методы в области физики конденсированного состояния, электроники и наноэлектроники ; У-ПК-4[1] - Уметь: проводить экспериментальные исследования в электронике и наноэлектронике с применением современных средств и методов.; В-ПК-4[1] - Владеть: компьютерными технологиями в применении к экспериментальным исследованиям в электронике и наноэлектронике
производственно-технологический			
разработка технических заданий на проектирование технологических процессов производства	Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы	ПК-1.3 [1] - Способен к выбору методов современной нанотехнологии для создания перспективных	З-ПК-1.3[1] - Знать основные методы современной нанотехнологии, используемые для создания

<p>материалов и изделий электронной техники</p>	<p>их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и наноэлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и наноэлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.</p>	<p>приборов и элементной базы на основе полупроводниковых наноструктур.</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.006</p>	<p>полупроводниковых приборов и элементной базы; У-ПК-1.3[1] - Уметь обоснованно выбирать методы современной нанотехнологии для создания перспективных приборов и элементной базы на основе полупроводниковых наноструктур; В-ПК-1.3[1] - Владеть навыками разработки технологических маршрутов современных полупроводниковых приборов и элементной базы на основе наноструктур</p>
<p>организация и руководство процессом производства приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурных материалов</p>	<p>Материалы, компоненты, электронные приборы, устройства, установки, методы их исследования, проектирования и конструирования. Технологические процессы производства, диагностическое и технологическое оборудование, математические</p>	<p>ПК-15 [1] - способен к руководству разработкой и оптимизацией технологии производства приборов квантовой электроники и фотоники на основе наноструктурных материалов</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.002</p>	<p>3-ПК-15[1] - Знать: физико-технологических основы функционирования и производства приборов квантовой электроники и фотоники. ; У-ПК-15[1] - Уметь: разрабатывать и оптимизировать технологию производства приборов квантовой электроники и</p>

	<p>модели, алгоритмы решения типовых задач в области электроники и наноэлектроники. Современное программное и информационное обеспечение процессов моделирования и проектирования изделий электроники и наноэлектроники. Инновационные технические решения в сфере базовых постулатов проектирования, технологии изготовления и применения электронных приборов и устройств.</p>		<p>фотоники на основе наноструктурных материалов; В-ПК-15[1] - Владеть: навыками руководства разработкой и оптимизацией технологии производства приборов электроники и наноэлектроники.</p>
--	--	--	---

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практи. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>4 Семестр</i>						
1	Основные принципы молекулярно-лучевой эпитаксии	1-8	5/11/6	к.р-5 (25)	25	КИ-8	У-ПК-1.3, В-ПК-1.3, 3-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-1.3
2	Технологии	9-15	0/14/4	к.р-12	25	КИ-15	3-ПК-

	формирования конкретных гетероструктур			(25)			1, 3-ПК- 1.3, У- ПК- 1.3, В- ПК- 1.3, 3-ПК- 4, У- ПК-4, 3-ПК- 15, У- ПК- 15, В- ПК- 15
	<i>Итого за 4 Семестр</i>		5/25/10		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 4 Семестр</b>				50	Э, КР	3-ПК- 1, У- ПК-1, В- ПК-1, 3-ПК- 1.3, У- ПК- 1.3, В- ПК- 1.3, 3-ПК- 4, В- ПК-4, 3-ПК- 15, У- ПК- 1.3, В- ПК- 1.3, В- ПК-4, 3-ПК- 15,

							У-ПК-15, В-ПК-15
--	--	--	--	--	--	--	------------------

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
к.р	Контрольная работа
Э	Экзамен
КР	Курсовая работа

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Неделя	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>4 Семестр</i>	5	25	10
<b>1-8</b>	<b>Основные принципы молекулярно-лучевой эпитаксии</b>	5	11	6
1	<b>Принципы МЛЭ</b> Принципы молекулярно-лучевой эпитаксии. Ячейка Кнудсена. Термометрия и принцип автоматического регулирования температуры (методы стабилизации молекулярных потоков). Исходные материалы для эпитаксии.	Всего аудиторных часов		
		1	1	2
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Оборудование для МЛЭ</b> Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии. Получение и измерение сверхвысокого вакуума. Турбомолекулярный насос.	Всего аудиторных часов		
		1	1	2
		Онлайн		
		0	0	0
3	<b>Сверхвысоковакуумные насосы</b> Ионные насосы. Сублимационные насосы и крионасосы. Контроль состава остаточных газов. Течеискание. Многокамерные системы и перезагрузка носителя. Цикл ростового процесса.	Всего аудиторных часов		
		1	1	2
		Онлайн		
		0	0	0
4	<b>Кинетика и термодинамика роста слоёв</b> Кинетика и термодинамика эпитаксиального выращивания полупроводников. Отжиг подложек. Поверхностные реконструкции. Режимы роста: двумерный, островковый. Применение поверхностно-активационных агентов.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	<b>Формирование самоорганизующихся наноструктур</b> Эпитаксия решеточно-рассогласованных соединений. Самоорганизующиеся наноструктуры. Механизмы роста квантовых точек, квантовых нитей и квантовых колец. Измерение парциальных давлений потоков. Калибровка	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0

	легирования.			
6	<b>Тройные твёрдые растворы</b> Выращивание тройных твердых растворов. Методы получения и контроля однородности параметров гетероструктур при эпитаксии.	Всего аудиторных часов		
		0	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
7	<b>Дефекты структур</b> Дефекты структуры – точечные, овалы, дислокации. Дислокации: несоответствия, прорастающие дислокации.	Всего аудиторных часов		
		0	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Приложения эпитаксиальных структур</b> Приложения эпитаксиальных структур. Буфер GaAs. Легирование GaAs. Слои AlGaAs и их легирование.	Всего аудиторных часов		
		0	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
<b>9-15</b>	<b>Технологии формирования конкретных гетероструктур</b>	0	14	4
9	<b>HEMT- транзистор</b> Модулированное легирование и подвижность двумерных электронов. HEMT- транзистор. Квантовые ямы на основе двойного гетероперехода. Выращивание сверхрешеток.	Всего аудиторных часов		
		0	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
10	<b>Гетероструктура на AlGaAs/GaAs</b> Гетероструктура на одиночном гетеропереходе AlGaAs/GaAs. Псевдоморфные (напряженные) гетероструктуры на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs, особенности выращивания и электрофизические свойства.	Всего аудиторных часов		
		0	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
11	<b>Гетероструктуры с двусторонним легированием</b> Гетероструктуры с двусторонним легированием. Дефекты и дислокации. Критическая толщина напряженных гетерослоев.	Всего аудиторных часов		
		0	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
12	<b>Изоморфные и псевдоморфные структуры</b> Изоморфные подложке InP и псевдоморфные структуры на основе тройных растворов InGaAs/InAlAs: рост и свойства.	Всего аудиторных часов		
		0	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
13	<b>Метаморфные структуры</b> Метаморфные структуры на подложках GaAs	Всего аудиторных часов		
		0	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
14	<b>Нульмерные структуры</b> Структуры с квантовыми точками, квантовыми кольцами и вискерами	Всего аудиторных часов		
		0	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
15	<b>Методы объемной и поверхностной характеристики гетероструктур</b> Методы объемной и поверхностной характеристики гетероструктур. In situ контроль. Дифракция быстрых электронов.	Всего аудиторных часов		
		0	1	2
		Онлайн		
		0	0	0
15	<b>Методы объемной и поверхностной характеристики гетероструктур</b> Оже-спектроскопия. ДРД –Рентгеновская дифрактометрия.	Всего аудиторных часов		
		0	1	2
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

#### ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>4 Семестр</i>
1 - 3	<b>Лабораторная работа №1. Сверхвысоковакуумные системы</b> Изучение принципов построения современного технологического оборудования, работающего в условиях сверхвысокого вакуума. Изучение конструкции установки молекулярно-лучевой эпитаксии
1 - 3	<b>Лабораторная работа №2. Принцип создания молекулярных потоков</b> Конструкция ячейки Кнудсена. Термометрия и принцип автоматического регулирования температуры. Конструкция заслонок. Датчик Альперта-Байярда для измерения потоков.
4 - 5	<b>Лабораторная работа №3. Вакуумная техника</b> Принципы работы и конструкции насосов, методы измерения и контроля вакуума. Конструкции форвакуумного, турбомолекулярного, ионного магниторазрядного и сублимационного насосов. Масс-спектрометрия остаточной атмосферы вакуумного объема.
10 - 12	<b>Лабораторная работа №3. Основы технологии молекулярно-лучевой эпитаксии</b> Элементы ростового процесса МЛЭ: Прогрев молекулярных источников. Измерение потоков элементов и расчет необходимого состава слоев. Элементы анализа свойств по-верхности в установке МЛЭ: Дифракция быстрых электронов на отражение. Реконструкции поверхности GaAs (100). Рост тонких пленок GaAs и НЕМТ гетероструктуры AlGaAs/GaAs
13 - 15	<b>Лабораторная работа №4. Методы исследования гетероструктур</b> Поверхностные реконструкции поверхности. In situ контроль. Дифракция быстрых электронов.

#### ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
--------	---------------------------

	<i>4 Семестр</i>
1	<b>Принципы МЛЭ</b> Принципы молекулярно-лучевой эпитаксии. Ячейка Кнудсена. Термометрия и принцип автоматического регулирования температуры (методы стабилизации молекулярных потоков). Исходные материалы для эпитаксии.
2	<b>Оборудование для МЛЭ</b> Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии. Получение и измерение сверхвысокого вакуума. Турбомолекулярный насос.
3	<b>Сверхвысоковакуумные насосы</b> Ионные насосы. Сублимационные насосы и крионасосы. Контроль состава остаточных газов. Течеискание. Многокамерные системы и перезагрузка носителя. Цикл ростового процесса.
4	<b>Кинетика и термодинамика роста слоёв</b> Кинетика и термодинамика эпитаксиального выращивания полупроводников. Отжиг подложек. Поверхностные реконструкции. Режимы роста: двумерный, островковый. Применение поверхностно-активационных агентов.
5	<b>Формирование самоорганизующихся наноструктур</b> Эпитаксия решеточно-рассогласованных соединений. Самоорганизующиеся наноструктуры. Механизмы роста квантовых точек, квантовых нитей и квантовых колец. Измерение парциальных давлений потоков. Калибровка легирования.
6	<b>Тройные твёрдые растворы</b> Выращивание тройных твердых растворов. Методы получения и контроля однородности параметров гетероструктур при эпитаксии.
7	<b>Дефекты структур</b> Дефекты структуры – точечные, овальные, дислокации. Дислокации: несоответствия, прорастающие дислокации.
8	<b>Приложения эпитаксиальных структур</b> Приложения эпитаксиальных структур. Буфер GaAs. Легирование GaAs. Слои AlGaAs и их легирование.
9	<b>НЕМТ- транзистор</b> Модулированное легирование и подвижность двумерных электронов. НЕМТ- транзистор. Квантовые ямы на основе двойного гетероперехода. Выращивание сверхрешеток.
10	<b>Гетероструктура на AlGaAs/GaAs</b> Гетероструктура на одиночном гетеропереходе AlGaAs/GaAs. Псевдоморфные (напряженные) гетероструктуры на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs, особенности выращивания и электрофизические свойства.
11	<b>Гетероструктуры с двусторонним легированием</b> Гетероструктуры с двусторонним легированием. Дефекты и дислокации. Критическая толщина напряженных гетерослоев.
12	<b>Изоморфные и псевдоморфные структуры</b>

	Изоморфные подложке InP и псевдоморфные структуры на основе тройных растворов InGaAs/InAlAs: рост и свойства.
13	<b>Метаморфные структуры</b> Метаморфные структуры на подложках GaAs
14	<b>Нульмерные структуры</b> Структуры с квантовыми точками, квантовыми кольцами и вискерами
15	<b>Методы объемной и поверхностной характеристики гетероструктур</b> Методы объемной и поверхностной характеристики гетероструктур. In situ контроль. Дифракция быстрых электронов. Оже-спектроскопия. ДРД –Рентгеновская дифрактометрия.
16	<b>Методы объемной и поверхностной характеристики гетероструктур</b> Оже-спектроскопия. ДРД –Рентгеновская дифрактометрия.

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации программы используются следующие технологии:

- лекции по курсу традиционного типа, на некоторых лекциях применяется компьютерный проектор для иллюстраций сложных устройств, систем и процессов;
- самостоятельная работа: написание курсовой работы (обзор предлагаемой темы);
- посещение лабораторий НОЦ «Нанотехнологии» НИЯУ МИФИ.

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-1	З-ПК-1	Э, КИ-8, КИ-15, к.р-5, к.р-12
	У-ПК-1	Э
	В-ПК-1	Э, КИ-8, к.р-5
ПК-1.3	З-ПК-1.3	Э, КИ-8, КИ-15, к.р-5, к.р-12
	У-ПК-1.3	КР, Э, КИ-8, КИ-15, к.р-5, к.р-12
	В-ПК-1.3	КР, Э, КИ-8, КИ-15, к.р-5, к.р-12
ПК-15	З-ПК-15	КР, Э, КИ-15, к.р-12
	У-ПК-15	КР, КИ-15, к.р-12
	В-ПК-15	КР, КИ-15, к.р-12
ПК-4	З-ПК-4	Э, КИ-15

	У-ПК-4	КИ-15, к.р-12
	В-ПК-4	КР, Э

### Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ Г 38 Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink : учебное пособие, Санкт-Петербург: Лань, 2022
2. ЭИ Л12 Лабораторный практикум "Компьютерное моделирование наноструктур" : , Москва: НИЯУ МИФИ, 2013
3. 621.38 В75 Моделирование технологии и параметров кремниевых наноразмерных транзисторных структур : учебное пособие, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 539.2 В19 Учебно-методический комплекс "Физика и технология молекулярно-лучевой эпитаксии" : , Москва: НИЯУ МИФИ, 2010
2. 620 А72 Технология наноструктур : учебное пособие для вузов, С. В. Антоненко, Москва: МИФИ, 2008

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

### **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

### **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

#### 1. Особенности курса:

Целями освоения учебной дисциплины «Физика и технология молекулярно-лучевой эпитаксии» являются:

изучение основ физики и технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, одного из передовых и совершенных методов создания различных типов полупроводниковых низкоразмерных систем. Изучение основ физики процесса: термодинамики и кинетики роста атомных слоев, самоорганизации на наноуровне, а также элементы технологии: современные методы получения, измерения сверхвысокого вакуума, методы экспресс – анализа. В курсе рассматриваются вопросы создания, строения, ключевые особенности электрофизических, оптических и структурных свойств гетероструктур с пониженной размерностью, содержащих квантовые ямы, сверхрешетки, квантовые нити, квантовые точки и кольца. Дан обзор практических приложений для гетеросистем групп АЗВ5.

Задачами освоения дисциплины являются

Основными задачами освоения дисциплины являются:

- Приобретение студентами объёма знаний, необходимого для самостоятельной работы, решения поставленной задачи, приобретение навыков выбора гетеросистемы, режимов роста, расчета ростовой последовательности при создании гетероструктур;

- Развитие способности ориентироваться в современных достижениях в области нанотехнологий, возможности использования современных нанотехнологий в собственных разработках;

- Приобретение студентами способности творчески мыслить и предлагать собственные решения и идеи при разработке новых наноматериалов или составляющих нанотехнологии.

Для успешного усвоения данной дисциплины студент должен владеть базовыми знаниями в области Физика полупроводников, Современные нанотехнологии, а также вводных дисциплин цикла СД "Введение в физику твердого тела" или "Введение в физику конденсированного состояния", желательной входной компетенцией является освоение основ курса "Физика полупроводников". Необходимо освоение базового курса английского языка.

Курс является выходным профилирующим, выходные компетенции дополняют полученные по курсам : Физика наносистем, Физика и технология приборов микро- и нанoeлектроники, Оптоэлектроника и смежных дисциплин. Также полученные знания могут понадобиться при выполнении научно–исследовательской работы студента.

## 2. Структура лекционного курса

Курс делится на два раздела и 9 тем.

В теме «Введение» изложены основные вводные понятия о процессе молекулярно-лучевой эпитаксии, его месте в сфере нанотехнологических процессах, характере организации процесса создания пленок и наноструктур «снизу-вверх» методами самосборки и самоорганизации. Разбираются основные принципы молекулярно-лучевой эпитаксии, блок-схема установки, условия проведения процесса. Проводится сравнение условий роста с другими типами эпитаксии.

Темы 2 и 3 посвящены достаточно подробному рассмотрению основ построения высоковакуумных и сверхвысокововакуумных систем, используемых в молекулярно-лучевой эпитаксии. Рассматриваемые знания являются общими для большого числа вакуумных установок, используемых в микро- и нанoeлектронной технологии и в исследовательских методиках, использующих вакуумно-чистые условия, поэтому способствуют формированию широкой компетенции, необходимой для успешной работы инженера и исследователя.

Тема 4 посвящена изучению основных кинетических и термодинамических процессов при эпитаксиальном выращивании полупроводниковых слоев и гетероструктур. Рассматриваются различные режимы роста при гомоэпитаксии. Освещаются вопросы дефектообразования в эпитаксиальных слоях.

Тема 5 рассматривает особенности эпитаксии многокомпонентных полупроводников, в т.ч. решеточно-рассогласованных соединений. Выращивание тройных твердых растворов. Методы получения и контроля однородности параметров гетероструктур при эпитаксии. Особое внимание уделяется разбору способа получения необходимого состава слоев и скорости роста, и его аппаратной реализации. В т.ч. проводится решение расчетных заданий.

Тема 6 посвящена механизмам самоорганизации наноструктур, отличных от планарных слоев. Разбираются механизмы роста на примере квантовых точек, квантовых нитей и квантовых колец.

Темы 7 и 8 освещают приложения типичных гетероструктур и гетеросистем в СВЧ электронике, с разбором основных свойств. Изложение материала выстроено на примере арсенидной гетеросистеме и последовательно рассматривает переход от одного типа гетероструктур к другому при увеличении содержания InAs в активных слоях: сначала AlGaAs/GaAs НЕМТ гетероструктуры, затем PHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs с содержанием InAs 20%, затем – изоморфные с подложкой InP, затем – более сложные метаморфные гетероструктуры с произвольным составом InAs, вплоть до 100% (в канале).

Тема 9 посвящена нескольким основным методам объемной и поверхностной характеристики гетероструктур, In situ и ex situ контроля многослойных гетероструктур. Дифракция быстрых электронов. Методы объемной и поверхностной характеристики гетероструктур. Оже-спектроскопия. Рентгеновская дифрактометрия. Особое внимание необходимо уделить разбору преимуществ и недостатков каждого из методов для анализа состава и толщины, структуры и морфологии в случае наличия поверхностных или захороненных на глубине нанослоев.

### 3. Проведение семинарских занятий и выполнение самостоятельных работ

Большая часть академических часов отведена семинарским занятиям. На этих занятиях студенты решают задачи по физике полупроводников, в том числе и в интерактивной форме (обсуждение). Помимо лекционных и практических занятий курс «Физика и технология молекулярно-лучевой эпитаксии» включает в себя самостоятельную работу студентов в объеме 60 академических часов. Данное время отводится студентам для трех типов самостоятельной работы: 1) проработки и повторения пройденного материала, подготовки текущих вопросов для обсуждения на практических занятиях (семинарах), 2) подготовки к выполнению контрольных тестов по разделам курса, 3) курсовому проектированию слоевого дизайна гетероструктуры на основе одного из заданных типов. Во время работы над курсовым проектированием по выбранной теме выполняется поиск, разбор и систематизации научно-технических материалов из открытых источников. Во время самостоятельной подготовки и выполнения курсовой работы студенты учатся работать с научной литературой, в т.ч. на английском языке.

В ходе лекционных и практических занятий рассматриваются основные особенности гетероструктур и метода молекулярно-лучевой эпитаксии. При выполнении курсового проектирования приобретаются навыки систематизации научно-технической информации в том числе с обязательным источником на английском языке. Студенты проводят поиск по базам данных научных публикаций, а также базам свойств полупроводниковых материалов на электронных ресурсах с использованием сети Интернет. Осваиваются основы проектирования параметров гетероструктур,

При обсуждении тем лекционных занятий используются интерактивные формы обучения, используются презентации, видеодемонстрации. Обязательным является самостоятельная работа студентов, выполнение индивидуальных заданий, работа с литературой.

### 4. Организация контроля

Текущий контроль проводится путем выполнения тестовых заданий по 2-м контрольным тестам. 1-й Тест выполняется проводится на 6 неделе, состоит из 15 вопросов-заданий с 4-мя вариантами ответов. При ответе необходимо не только указать правильный ответ, но и написать краткое обоснование - 1-2 предложения либо формулу, поясняющие логику ответа. Такая

методика позволяет не только отследить ход мысли тестируемого, но и отсеять вероятность случайного выбора верного ответа.

Время выполнения теста - 60 мин.

Второй Тест состоит из 12 вопросов-заданий с 4-мя вариантами ответов, проводится на 10 неделе, время выполнения - 45 мин.

За каждое верно выполненное задание начисляются 1 балл. Полный балл засчитывается при наличии краткого пояснения к ответу, без такого пояснения за верно выбранный ответ начисляется 0,75 баллов. Суммарный максимальный балл по всем вопросам равен количеству вопросов в тесте и принимается за 100%.

## 5. Проведение экзамена.

Формой промежуточной аттестации по дисциплине «Физика и технология молекулярно-лучевой эпитаксии» является экзамен.

Студент получает экзаменационный билет, включающих три вопроса. На подготовку дается около 45 минут, затем происходит устный ответ, необходимые рисунки и выкладки должны быть оформлены на экзаменационном листе.

## 6. Дополнительные рекомендации.

Поскольку излагаемый материал является довольно обширным и новым, недостаточно полно отражен в каком-либо одном источнике, необходимо систематически посещать лекционные занятия. Это крайне важно для того, чтобы успешно осваивать дальнейшие дисциплины специализации, проводить самостоятельный поиск и разбор научной проблематики в области нанотехнологий.

Необходимо помнить, что задача изучения материала наиболее эффективно решается в режиме диалога, когда студенты активно разбирают материал, задают вопросы, изучают рекомендованную литературу и вспомогательные лекционные материалы.

В настоящее время существует достаточно много интернет-ресурсов в области нанотехнологий, но они зачастую носят научно-популярный или фрагментарный характер. Поэтому для изучения дисциплины рекомендованы дополнительная литература и тематические подборки и обзорные статьи. Полезно сопровождать работу над лекционными материалами и поиском в интернете, это разовьет навыки предметного поиска источников и анализ научно-технической литературы.

# 10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

## 1. Особенности курса:

Целями освоения учебной дисциплины «Физика и технология молекулярно-лучевой эпитаксии» являются:

изучение основ физики и технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, одного из передовых и совершенных методов создания различных типов полупроводниковых низкоразмерных систем. Изучение основ физики процесса: термодинамики и кинетики роста атомных слоев, самоорганизации на наноуровне, а также элементы технологии: современные методы получения, измерения сверхвысокого вакуума, методы экспресс – анализа. В курсе

рассматриваются вопросы создания, строения, ключевые особенности электрофизических, оптических и структурных свойств гетероструктур с пониженной размерностью, содержащих квантовые ямы, сверхрешетки, квантовые нити, квантовые точки и кольца. Дан обзор практических приложений для гетеросистем групп АЗВ5.

Задачами освоения дисциплины являются

Основными задачами освоения дисциплины являются:

- Приобретение студентами объёма знаний, необходимого для самостоятельной работы, решения поставленной задачи, приобретение навыков выбора гетеросистемы, режимов роста, расчета ростовой последовательности при создании гетероструктур;

- Развитие способности ориентироваться в современных достижениях в области нанотехнологий, возможности использования современных нанотехнологий в собственных разработках;

- Приобретение студентами способности творчески мыслить и предлагать собственные решения и идеи при разработке новых наноматериалов или составляющих нанотехнологии.

Для успешного усвоения данной дисциплины студент должен владеть базовыми знаниями в области Физика полупроводников, Современные нанотехнологии, а также вводных дисциплин цикла СД "Введение в физику твердого тела" или "Введение в физику конденсированного состояния", желательной входной компетенцией является освоение основ курса "Физика полупроводников". Необходимо освоение базового курса английского языка.

Курс является выходным профилирующим, выходные компетенции дополняют полученные по курсам : Физика наносистем, Физика и технология приборов микро- и нанoeлектроники, Оптоэлектроника и смежных дисциплин. Также полученные знания могут понадобиться при выполнении научно–исследовательской работы студента.

## 2. Структура лекционного курса

Курс делится на два раздела и 9 тем.

В теме «Введение» изложены основные вводные понятия о процессе молекулярно-лучевой эпитаксии, его месте в сфере нанотехнологических процессах, характере организации процесса создания пленок и наноструктур «снизу-вверх» методами самосборки и самоорганизации. Разбираются основные принципы молекулярно-лучевой эпитаксии, блок-схема установки, условия проведения процесса. Проводится сравнение условий роста с другими типами эпитаксии.

Темы 2 и 3 посвящены достаточно подробному рассмотрению основ построения высоковакуумных и сверхвысоковакуумных систем, используемых в молекулярно-лучевой эпитаксии. Рассматриваемые знания являются общими для большого числа вакуумных установок, используемых в микро- и нанoeлектронной технологии и в исследовательских методиках, использующих вакуумно-чистые условия, поэтому способствуют формированию широкой компетенции, необходимой для успешной работы инженера и исследователя.

Тема 4 посвящена изучению основных кинетических и термодинамических процессов при эпитаксиальном выращивании полупроводниковых слоев и гетероструктур. Рассматриваются различные режимы роста при гомоэпитаксии. Освещаются вопросы дефектообразования в эпитаксиальных слоях.

Тема 5 рассматривает особенности эпитаксии многокомпонентных полупроводников, в т.ч. решеточно-рассогласованных соединений. Выращивание тройных твердых растворов. Методы получения и контроля однородности параметров гетероструктур при эпитаксии.

Особое внимание уделяется разбору способа получения необходимого состава слоев и скорости роста, и его аппаратурной реализации. В т.ч. проводится решение расчетных заданий.

Тема 6 посвящена механизмам самоорганизации наноструктур, отличных от планарных слоев. Разбираются механизмы роста на примере квантовых точек, квантовых нитей и квантовых колец.

Темы 7 и 8 освещают приложения типичных гетероструктур и гетеросистем в СВЧ электронике, с разбором основных свойств. Изложение материала выстроено на примере арсенидной гетеросистеме и последовательно рассматривает переход от одного типа гетероструктур к другому при увеличении содержания InAs в активных слоях: сначала AlGaAs/GaAs НЕМТ гетероструктуры, затем PHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs с содержанием InAs 20%, затем – изоморфные с подложкой InP, затем – более сложные метаморфные гетероструктуры с произвольным составом InAs, вплоть до 100% (в канале).

Тема 9 посвящена нескольким основным методам объемной и поверхностной характеризации гетероструктур, *In situ* и *ex situ* контроля многослойных гетероструктур. Дифракция быстрых электронов. Методы объемной и поверхностной характеризации гетероструктур. Оже-спектроскопия. Рентгеновская дифрактометрия. Особое внимание необходимо уделить разбору преимуществ и недостатков каждого из методов для анализа состава и толщины, структуры и морфологии в случае наличия поверхностных или захороненных на глубине нанослоев.

### 3. Проведение семинарских занятий и выполнение самостоятельных работ

Большая часть академических часов отведена семинарским занятиям. На этих занятиях студенты решают задачи по физике полупроводников, в том числе и в интерактивной форме (обсуждение). Помимо лекционных и семинарских занятий курс «Физика полупроводников» включает в себя самостоятельную работу студентов. Помимо лекционных и практических занятий курс «Физика и технология молекулярно-лучевой эпитаксии» включает в себя самостоятельную работу студентов в объеме 60 академических часов. Данное время отводится студентам для трех типов самостоятельной работы: 1) проработки и повторения пройденного материала, подготовки текущих вопросов для обсуждения на практических занятиях (семинарах), 2) подготовки к выполнению контрольных тестов по разделам курса, 3) курсовому проектированию слоевого дизайна гетероструктуры на основе одного из заданных типов. Во время работы над курсовым проектированием по выбранной теме выполняется поиск, разбор и систематизации научно-технических материалов из открытых источников. Во время самостоятельной подготовки и выполнения курсовой работы студенты учатся работать с научной литературой, в т.ч. на английском языке.

В ходе лекционных и практических занятий рассматриваются основные особенности гетероструктур и метода молекулярно-лучевой эпитаксии. При выполнении курсового проектирования приобретаются навыки систематизации научно-технической информации в том числе с обязательным источником на английском языке. Студенты проводят поиск по базам данных научных публикаций, а также базам свойств полупроводниковых материалов на электронных ресурсах с использованием сети Интернет. Осваиваются основы проектирования параметров гетероструктур,

При обсуждении тем лекционных занятий используются интерактивные формы обучения, используются презентации, видеодемонстрации. Обязательным является самостоятельная работа студентов, выполнение индивидуальных заданий, работа с литературой.

#### 4. Организация контроля

Текущий контроль проводится путем выполнения тестовых заданий по 2-м контрольным тестам. 1-й Тест выполняется проводится на 6 неделе, состоит из 15 вопросов- заданий с 4-мя вариантами ответов. При ответе необходимо не только указать правильный ответ, но и написать краткое обоснование - 1-2 предложения либо формулу, поясняющие логику ответа. Такая методика позволяет не только отследить ход мысли тестируемого, но и отсеять вероятность случайного выбора верного ответа.

Время выполнения теста - 60 мин.

Второй Тест состоит из 12 вопросов- заданий с 4-мя вариантами ответов, проводится на 10 неделе, время выполнения - 45 мин.

За каждое верно выполненное задание начисляются 1 балл. Полный балл засчитывается при наличии краткого пояснения к ответу, без такого пояснения за верно выбранный ответ начисляется 0,75 баллов. Суммарный максимальный балл по всем вопросам равен количеству вопросов в тесте и принимается за 100%.

#### 5. Проведение экзамена.

Формой промежуточной аттестации по дисциплине «Физика и технология молекулярно-лучевой эпитаксии» является экзамен.

Студент получает экзаменационный билет, включающих три вопроса. На подготовку дается около 45 минут, затем происходит устный ответ, необходимые рисунки и выкладки должны быть оформлены на экзаменационном листе.

Автор(ы):

Васильевский Иван Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент

Рецензент(ы):

Галиев Г.Б. Зав. лабораторией 101 ФГБУН Институт СВЧ полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН