

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ БИОМЕДИЦИНЫ  
КАФЕДРА ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И БИОФОТОНИКИ

ОДОБРЕНО НТС ИФИБ

Протокол № 3/2

от 30.08.2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**ТЕХНОЛОГИЯ РОСТА ГЕТЕРОСТРУКТУР**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 03.04.02 Физика

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
2	2	72	15	30	0	27	0	3
Итого	2	72	15	30	0	0	27	0

## **АННОТАЦИЯ**

Дисциплина является частью профессионального модуля образовательной программы. В курсе даются основные понятия материаловедения полупроводников, рассматриваются ведущие эпитаксиальные методы, представляются основные подходы к формированию многослойных гетероструктур методом МОС-гидридной эпитаксии. Описываются закономерности получения многокомпонентных твердых растворов и различные варианты технологической реализации эпитаксиальных слоев, квантовых ям и приборных гетероструктур заданной геометрии. Теоретический материал снабжается примерами решения ряда типичных технологических задач.

Дисциплина логически и содержательно-методически связана со следующими дисциплинами: физика гетероструктур, технология планарного цикла, физические основы технологии полупроводниковых лазеров, полупроводниковые лазеры, квантовые каскадные лазеры и мощные одиночные диодные лазеры.

Курс дает общие сведения по современным эпитаксиальным технологиям, необходимым при создании широкого класса полупроводниковых гетероструктур, их месту в технологической цепочке изготовления полупроводниковых лазеров различных типов и влиянию технологических параметров на выходные характеристики приборов.

Изучение курса позволит студентам решать стоящие перед ними физические и технические задачи в области создания полупроводниковых лазеров на высоком технологическом и методическом уровне.

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

В курсе даются основные понятия материаловедения полупроводников, рассматриваются ведущие эпитаксиальные методы, представляются основные подходы к формированию многослойных гетероструктур методом МОС-гидридной эпитаксии. Описываются закономерности получения многокомпонентных твердых растворов и различные варианты технологической реализации эпитаксиальных слоев, квантовых ям и приборных гетероструктур заданной геометрии. Теоретический материал снабжается примерами решения ряда типичных технологических задач.

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

Дисциплина логически и содержательно-методически связана со следующими дисциплинами: физика гетероструктур, технология планарного цикла, физические основы технологии полупроводниковых лазеров, полупроводниковые лазеры, квантовые каскадные лазеры и мощные одиночные диодные лазеры.

Курс дает общие сведения по современным эпитаксиальным технологиям, необходимым при создании широкого класса полупроводниковых гетероструктур, их месту в технологической цепочке изготовления полупроводниковых лазеров различных типов и влиянию технологических параметров на выходные характеристики приборов.

Изучение курса позволит студентам решать стоящие перед ними физические и технические задачи в области создания полупроводниковых лазеров на высоком технологическом и методическом уровне.

Овладение данной дисциплиной необходимо выпускникам для следующих областей профессиональной деятельности по исследованию и разработке:

- установок и систем в области физики конденсированного состояния вещества, фотоники, полупроводниковой квантовой электроники;
- установок и систем лазерной обработки материалов;
- методов повышения безопасности лазерных установок, материалов и технологий;
- лазерных установок и технологий, обладающих высокой эффективностью, безопасностью и защищенностью.

### 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
	проектный		
- разработка новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности - формирование целей проекта (программы), критериев и показателей достижения целей, построение структуры их взаимосвязей, выявление приоритетов решения задач с учетом всех аспектов деятельности - разрабатывать технические задания на проектирование	физические объекты и системы различного масштаба, уровня организации, физические явления и процессы, физические, инженерно-физические, биофизические технологии, методы, приборы, устройства	ПК-3 [1] - Способен разрабатывать технические задания на проектирование технологических процессов и схем производства устройств, приборов, систем и комплексов.  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.006, 40.037, 40.039	З-ПК-3[1] - знать основы проектирования технологических процессов производства устройств, приборов, систем и комплексов по профилю профессиональной деятельности ; У-ПК-3[1] - уметь проводить анализ современных технологических процессов и схем производства, перспективных материалов для производства устройств, приборов, систем и комплексов по профилю

технологических процессов и схем производства устройств, приборов, систем и комплексов			профессиональной деятельности; В-ПК-3[1] - владеть навыками составления технического задания на проектирование технологических процессов и схем производства устройств, приборов, систем и комплексов по профилю профессиональной деятельности
научно-исследовательский			
- выявление актуальных проблем и тенденций в области физики - работа с научной литературой, в том числе с использованием информационных технологий, отслеживание отечественных и зарубежных работ в исследуемой области - выбор методов, современной аппаратуры и информационных технологий для проведения исследования - проведение теоретических и экспериментальных исследований	физические объекты и системы различного масштаба, уровня организации, физические явления и процессы, физические, инженерно-физические, биофизические технологии, методы, приборы, устройства	ПК-4.1 [1] - Способен применять на практике знания лазерной физики, физики полупроводников, оптики, физических основ взаимодействия излучения с веществом для качественного и количественного описания исследуемых объектов и явлений  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.006, 40.037, 40.039	З-ПК-4.1[1] - Знать законы и принципы физики твердого тела, оптики, взаимодействия излучения с веществом, квантовой механики, лазерной физики; У-ПК-4.1[1] - Уметь формулировать, выделять, анализировать исходные данные об исследуемом объекте и явлении, исходя из законов и принципов физики твердого тела, оптики, взаимодействия излучения с веществом, квантовой механики, лазерной физики; В-ПК-4.1[1] - Владеть приемами и методами, используемыми в области физики твердого тела, оптики, взаимодействия излучения с веществом, квантовой механики, лазерной физики, для качественного и количественного описания исследуемых

<p>- выявление актуальных проблем и тенденций в области физики - работа с научной литературой, в том числе с использованием информационных технологий, отслеживание отечественных и зарубежных работ в исследуемой области - выбор методов, современной аппаратуры и информационных технологий для проведения исследования - проведение теоретических и экспериментальных исследований</p>	<p>физические объекты и системы различного масштаба, уровня организации, физические явления и процессы, физические, инженерно-физические, биофизические технологии, методы, приборы, устройства</p>	<p>ПК-4.3 [1] - Способен к созданию и расчету устройств квантовой электроники и фотоники, применению их в науке, технике, промышленности и медицине</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.037, 40.039</p>	<p>объектов и явлений 3-ПК-4.3[1] - Знать особенности расчета, разработки и конструирования устройств квантовой электроники и фотоники с учетом сферы их применения; У-ПК-4.3[1] - Уметь использовать имеющиеся знания и получать новые знания для генерации идей и подходов по созданию и расчету устройств квантовой электроники и фотоники; В-ПК-4.3[1] - Владеть навыками проведения расчета и опытно-конструкторских работ по созданию устройств квантовой электроники и фотоники, их настройки и диагностики</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/ Практ. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>2 Семестр</i>						
1	Раздел 1.	1-8	8/16/0		25	КИ-8	3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3, 3-ПК-4.1, У-ПК-

							4.1, В- ПК- 4.1, 3-ПК- 4.3, У- ПК- 4.3, В- ПК- 4.3
2	Раздел 2.	8-15	7/14/0		25	КИ-15	3-ПК- 3, У- ПК-3, В- ПК-3, 3-ПК- 4.1, У- ПК- 4.1, В- ПК- 4.1, 3-ПК- 4.3, У- ПК- 4.3, В- ПК- 4.3
	<i>Итого за 2 Семестр</i>		15/30/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 2 Семестр</b>				50	3	3-ПК- 3, У- ПК-3, В- ПК-3, 3-ПК- 4.1, У- ПК- 4.1, В- ПК- 4.1, 3-ПК- 4.3, У-

							ПК-4.3, В-ПК-4.3
--	--	--	--	--	--	--	---------------------

\* – 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
З	Зачет

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>2 Семестр</i>	15	30	0
<b>1-8</b>	<b>Раздел 1.</b>	8	16	0
	<b>Тема 1. Эпитаксиальные гетероструктуры в технологии полупроводниковых лазеров.</b> Введение в технологию изготовления полупроводниковых лазеров. Место и роль эпитаксии в технологическом процессе создания полупроводниковых излучателей. Требования к полупроводниковым гетероструктурам.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
	<b>Тема 2. Бинарные соединения и твердые растворы полупроводников</b> Классификация полупроводниковых соединений. Свойства полупроводников АЗВ5. Твердые растворы и их свойства. Зависимость «состав-свойство». Закон Вегарда. Согласованные твердые растворы.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
	<b>Тема 3. Примеси и точечные дефекты.</b> Точечные дефекты в полупроводниках. Глубокие и мелкие примеси. Водородоподобные примеси. Предел растворимости и насыщение легирования. Ретроградная растворимость. Диффузия примесей. Первый закон Фика. Уравнение диффузии. Частные случаи диффузии.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
	<b>Тема 4. Протяженные дефекты.</b> Виды дислокаций. Рождение, движение и аннигиляция дислокаций. Способы снижения плотности дислокаций. Критическая толщина. Упруго-напряженные и компенсированные квантовые ямы, сверхрешетки и многослойные гетероструктуры.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
<b>8-15</b>	<b>Раздел 2.</b>	7	14	0
	<b>Тема 5. Основы эпитаксии.</b> Физико-химические основы эпитаксиального роста. Встраивание атомов в кристаллическую решетку. Виды	Всего аудиторных часов		
		3	5	0
		Онлайн		

	атомной структуры поверхности. Механизмы роста. Классификация эпитаксиальных методов. Описание жидкофазной, газофазной и молекулярно-лучевой эпитаксии. Варианты практической реализации. Достоинства и недостатки.	0	0	0
	<b>Тема 6. Основные принципы МОС-гидридной эпитаксии.</b> Исходные реагенты. Конструкции реакторов: горизонтальный и вертикальный. Последовательность роста. Лимитирующая стадия. Кинетический и диффузионный режим роста.	Всего аудиторных часов		
		2	5	0
		Онлайн		
		0	0	0
	<b>Тема 7. Получение эпитаксиальных слоев и гетероструктур.</b> Закономерности скорости роста и легирования бинарных соединений. Формирование многокомпонентных твердых растворов заданного состава с требуемыми функциональными характеристиками. Особенности получения резких гетерограниц и квантовых ям. Сегрегация и обменные реакции. Организация процесса роста многослойных гетероструктур. Влияние технологии получения гетероструктур на выходные характеристики приборов на их основе. Современное состояние и перспективы развития эпитаксиальных методов.	Всего аудиторных часов		
		2	4	0
		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

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия в виде лекций и практических занятий, а также самостоятельная работа студентов, заключающаяся в повторении ранее пройденного материала и подготовке к контрольным мероприятиям, выполнении домашнего задания.

С целью формирования и развития профессиональных навыков, обучающихся в учебном процессе, широко используются технологии активного обучения, интерактивные формы проведения занятий – дискуссии, обсуждение тем для самостоятельного изучения.

Рекомендуется посещение студентами научных семинаров и конференций, проводимых в ФИАН, в НИЯУ МИФИ, а также в других московских университетах и институтах.

## 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-3	З-ПК-3	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-3	З, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-3	З, КИ-8, КИ-15
ПК-4.1	З-ПК-4.1	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-4.1	З, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-4.1	З, КИ-8, КИ-15
ПК-4.3	З-ПК-4.3	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-4.3	З, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-4.3	З, КИ-8, КИ-15

### 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
60-64			

			изложении программного материала.
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 К 89 Межфазные взаимодействия при гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов : монография, Санкт-Петербург: Лань, 2022
2. 621.38 P25 Методы получения эпитаксиальных гетерокомпозиций : учебное пособие для вузов, Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
3. ЭИ А 46 Технология полупроводниковых материалов : , Санкт-Петербург: Лань, 2022
4. 621.38 P64 Оптоэлектроника : , Э. Розеншер, Б. Винтер, Москва: Техносфера, 2006

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 621.38 P24 Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники Ч.1 , Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2010
2. 621.38 B26 Физико-технологические основы электроники : , А. А. Барыбин, В. Г. Сидоров, СПб: Лань, 2001
3. 621.38 K78 Технология материалов электронной техники : Теория процессов полупроводниковой технологии: Учебник для вузов, В. В. Крапухин, И. А. Соколов, Г. Д. Кузнецов, М.: МИСИС, 1995
4. 621.3 M75 Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры : , Под ред.Л.Ченга и К.Плога;Пер. с англ., М.: Мир, 1989
5. 537 Г68 Материаловедение полупроводников и диэлектриков : учебник для вузов, С. С. Горелик, М. Я. Дашевский, М.: МИСИС, 2003

### 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**

Комплекс дисциплины предполагает ряд основных видов работы:

- аудиторная работа в виде лекций и практических занятий,
- самостоятельная работа,
- выполнение домашнего задания,
- выполнение контрольных работ.

Перечисленные виды работы составляют целостную систему обучения, обеспечивающую разностороннюю подготовку обучающегося и призваны к приобретению новых компетенций и повышению уровня его компетентности.

Структура курса предполагает освоение каждой предлагаемой темы в несколько этапов.

Начальный этап предусматривает проведение лекционных занятий.

На последующих этапах проводятся практические занятия, на которых студенты демонстрируют знания лекционного материала, подготовленность к занятиям, выполнение домашнего задания. Также предполагается самостоятельная работа студента по предложенным темам с последующим контролем со стороны преподавателя.

На заключительном этапе работы магистрантам предлагается выполнение контрольных работ.

Текущий контроль: в течение семестра выполняются следующие контрольные мероприятия:

- выполнение домашнего задания;
- выполнение контрольных работ.

Результаты выполнения контрольных мероприятий являются основанием для допуска к промежуточному контролю по дисциплине.

Промежуточный контроль осуществляется методом проверки и оценки ответов на предложенные вопросы.

Система оценки успеваемости студента

Для оценки успеваемости студента применяется 100-балльная система, которая позволяет учитывать работу студента в течение семестра и ответ на предложенные вопросы при аттестации.

Учебная работа студента в семестре оценивается по следующим категориям: показатели посещаемости и эффективности работы на каждом занятии, результаты выполнения контрольных мероприятий.

Максимальное количество баллов, которое студент может получить в ходе аудиторной и самостоятельной работы в семестре, составляет 50 баллов.

Минимальное количество баллов, которое необходимо для допуска студента к промежуточной аттестации, составляет 30 баллов.

По итогам семестра проводится промежуточная аттестация, которая включает в себя письменный и устный ответ на предложенные вопросы.

В совокупности за промежуточную аттестацию студент может получить 50 баллов.

Итого, максимальная оценка по курсу по итогам семестра составляет 100 баллов, для аттестации по курсу необходимо набрать минимум 60 баллов.

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Комплекс дисциплины предполагает ряд основных видов работы:

- аудиторная работа в виде лекций и практических занятий,
- самостоятельная работа,
- выполнение домашнего задания,
- выполнение контрольных работ.

Перечисленные виды работы составляют целостную систему обучения, обеспечивающую разностороннюю подготовку обучающегося и призваны к приобретению новых компетенций и повышению уровня его компетентности.

Структура курса предполагает освоение каждой предлагаемой темы в несколько этапов.

Начальный этап предусматривает проведение лекционных занятий.

На последующих этапах проводятся практические занятия, на которых студенты демонстрируют знания лекционного материала, подготовленность к занятиям, выполнение домашнего задания. Также предполагается самостоятельная работа студента по предложенным темам с последующим контролем со стороны преподавателя.

На заключительном этапе работы магистрантам предлагается выполнение контрольных работ.

Текущий контроль: в течение семестра выполняются следующие контрольные мероприятия:

- выполнение домашнего задания;
- выполнение контрольных работ.

Результаты выполнения контрольных мероприятий являются основанием для допуска к промежуточному контролю по дисциплине.

Промежуточный контроль осуществляется методом проверки и оценки ответов на предложенные вопросы.

Система оценки успеваемости студента

Для оценки успеваемости студента применяется 100-балльная система, которая позволяет учитывать работу студента в течение семестра и ответ на предложенные вопросы на зачете.

Учебная работа студента в семестре оценивается по следующим категориям: показатели посещаемости и эффективности работы на каждом занятии, результаты выполнения контрольных мероприятий.

Максимальное количество баллов, которое студент может получить в ходе аудиторной и самостоятельной работы в семестре, составляет 50 баллов.

Минимальное количество баллов, которое необходимо для допуска студента к промежуточной аттестации, составляет 30 баллов.

По итогам семестра проводится промежуточная аттестация, которая включает в себя письменный и устный ответ на предложенные вопросы.

В совокупности за промежуточную аттестацию студент может получить 50 баллов.

Итого, максимальная оценка по курсу по итогам семестра составляет 100 баллов, для аттестации по курсу необходимо набрать минимум 60 баллов.

Автор(ы):

Мармалюк Александр Анатольевич, д.т.н.