

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Структурное подразделение «Радиоэлектроники и телекоммуникационных систем»

УТВЕРЖДЕНА:
на заседании кафедры
Протокол №13 от 02 июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины

«ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ»

Направление: 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника

Материалы микро- и наносистемной техники

Квалификация: Магистр

Форма обучения: очная

Документ подписан простой
электронной подписью
Составитель программы:
Строкин Николай
Александрович
Дата подписания: 01.07.2025

Документ подписан простой
электронной подписью
Утвердил: Ченский Александр
Геннадьевич
Дата подписания: 05.07.2025

Документ подписан простой
электронной подписью
Согласовал: Ниндакова Лидия
Очировна
Дата подписания: 02.07.2025

Год набора – 2025

Иркутск, 2025 г.

1 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

1.1 Дисциплина «Гетероструктурные полупроводниковые приборы» обеспечивает формирование следующих компетенций с учётом индикаторов их достижения

Код, наименование компетенции	Код индикатора компетенции
ПК-3 Способен выбирать и применять на практике методы и средства планирования и организации исследований и разработок, методы проведения экспериментов и наблюдений, обобщения и обработки информации	ПК-3.5

1.2 В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы

Код индикатора	Содержание индикатора	Результат обучения
ПК-3.5	Знать принципы работы и изготовления гетероструктурных микро- и наноэлементов. Уметь планировать исследования и эксперименты с гетероструктурами. Владеть методами проведения экспериментов с гетероструктурами, обобщения и обработки информации	Знать Знать принципы работы и изготовления гетероструктурных микро- и наноэлементов. Уметь Уметь планировать исследования и эксперименты с гетеро-структурами. Владеть Владеть методами проведения экспериментов с гетероструктурами, обобщения и обработки информации

2 Место дисциплины в структуре ООП

Изучение дисциплины «Гетероструктурные полупроводниковые приборы» базируется на результатах освоения следующих дисциплин/практик: «Компьютерные технологии в нанoeлектронике и микросистемной технике», «Процессы микро- и нанотехнологий», «Электроны, ионы и плазма в электронике и микроэлектронике»

Дисциплина является предшествующей для дисциплин/практик: «Оборудование и процессы получения микро- и наноматериалов», «Наноструктурное материаловедение», «Физико-химия наносистем и поверхностных явлений»

3 Объем дисциплины

Объем дисциплины составляет – 2 ЗЕТ

Вид учебной работы	Трудоемкость в академических часах (Один академический час соответствует 45 минутам астрономического часа)	
	Всего	Семестр № 2
Общая трудоемкость дисциплины	72	72
Аудиторные занятия, в том числе:	42	42
лекции	14	14
лабораторные работы	0	0
практические/семинарские занятия	28	28

Самостоятельная работа (в т.ч. курсовое проектирование)	30	30
Трудоемкость промежуточной аттестации	0	0
Вид промежуточной аттестации (итогового контроля по дисциплине)	Зачет	Зачет

4 Структура и содержание дисциплины

4.1 Сводные данные по содержанию дисциплины

Семестр № 2

№ п/п	Наименование раздела и темы дисциплины	Виды контактной работы						СРС		Форма текущего контроля
		Лекции		ЛР		ПЗ(СЕМ)				
		№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Полевые гетероструктурны е транзисторы и интегральные микросхемы на их основе	1	2			3, 5	11	2	10	Тест
2	Гетерополевые транзисторы	2	2			2	5			Тест
3	Гетеробиполярны е транзисторы и интегральные схемы на их основе	3	2			1	6	1	10	Тест
4	Оптоэлектронные приборы на гетероструктурах	4	4			4	6			Тест
5	Гетероструктурн ые нанопленки	5	4					3	10	Тест
	Промежуточная аттестация									Зачет
	Всего		14				28		30	

4.2 Краткое содержание разделов и тем занятий

Семестр № 2

№	Тема	Краткое содержание
1	Полевые гетероструктурные транзисторы и интегральные микросхемы на их основе	Понятие гетероперехода. Виды гетеропереходов. Зонная структура и квазиэлектрические силы. Энергетические диаграммы гетеропереходов. Их свойства и применение.
2	Гетерополевые транзисторы	Физика работы полевого гетероструктурного транзистора. Основные характеристики НЕМТ, рНЕМТ, mНЕМТ-транзисторов. Характеристики транзисторов в зависимости от материалов

		гетероструктуры. Гетероструктуры с квантовыми ямами и квантовыми точками.
3	Гетеробиполярные транзисторы и интегральные схемы на их основе	Транзисторы с переменной шириной запрещенной зоны. Широкозонный эмиттер. Физика работы биполярного гетероструктурного транзистора. Основные характеристики НВТ-транзисторов. Коэффициент усиления НВТ-транзистора в схеме с общим эмиттером.
4	Оптоэлектронные приборы на гетероструктурах	Полупроводниковые инжекционные лазеры; лазеры на двойных гетероструктурах. Развитие твердо-тельной акустоэлектроники. Технологические маршруты создания, конструктивные и технологические особенности оптоэлектронных приборов из разных материалов.
5	Гетероструктурные нанопленки	Контакт полупроводник-полупроводник. Квантово-размерные эффекты. Техника получения гетероэпитаксиальных пленок – метод молекулярно-лучевой эпитаксии.

4.3 Перечень лабораторных работ

Лабораторных работ не предусмотрено

4.4 Перечень практических занятий

Семестр № 2

№	Темы практических (семинарских) занятий	Кол-во академических часов
1	Гетероструктуры с квантовыми нитями. Гетероструктуры и сверхрешетки. Модель Андерсона для резкого гетероперехода. Ограничения при изготовлении гетероструктур: согласование решеток; согласование валентностей. Разрывы зон.	6
2	СВЧ интегральные схемы на pHEMT и mHEMT. Широкозонные гетероструктуры (Al, Ga, In) и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн.	5
3	Конструктивные и технологические особенности транзисторов. Фор-мирование НВТ-транзистора с использованием процессов самосовмещения. Повышение частотного диапазона НВТ-транзистора. СВЧ интегральные схемы на НВТ.	5
4	Оптоэлектронные приборы на гетероструктурах на основе GaAs, GaN. Гетероструктурные лазеры. Солнечные элементы на гетероструктурах. Фотоприемные приборы и устройства – детекторы излучений. Сверхяркие светодиоды.	6
5	Методы изучения электронной структуры	6

	пленок. Зонно-энергетические диаграммы многослойных наноэпитаксиальных систем. Оптимальные режимы МЛЭ-роста многокомпонентных нанопленок.	
--	---	--

4.5 Самостоятельная работа

Семестр № 2

№	Вид СРС	Кол-во академических часов
1	Подготовка к зачёту	10
2	Подготовка к практическим занятиям	10
3	Проработка разделов теоретического материала	10

В ходе проведения занятий по дисциплине используются следующие интерактивные методы обучения: Интерактивная лекция; компьютерная симуляция; семинар–дискуссия; разбор конкретных ситуаций.

5 Перечень учебно-методического обеспечения дисциплины

5.1 Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

5.1.1 Методические указания для обучающихся по практическим занятиям

Основной задачей практических занятий студентов является закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях. Цель работы – научиться ориентироваться в теоретическом материале, получить навыки решения задач и применения прикладной специализированной компьютерной программы PTC_MathCAD15.

При выполнении задания для практических занятий рекомендуется начать с изучения лекционного материала по рассматриваемой теме. При возникновении неясностей или затруднений в понимании материала следует обратиться к литературе, рекомендованной преподавателем.

Примеры задач

1. Рассчитайте контактную разность потенциалов n - p^+ гомоперехода, сформированного на контакте двух кристаллов с уровнем легирования $5 \cdot 10^{14}$ и $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре. Ответ: $\phi_0 = 0,12 \text{ эВ}$.
2. Используя правило Андерсона, вычислите разрывы зоны проводимости и валентной зоны для гетероперехода а) GaAs-AlAs и б) InAs-GaSb.
Ответ: а) $\Delta E_C = 0,56 \text{ эВ}$; $\Delta E_V = 0,17 \text{ эВ}$; б) $\Delta E_C = 0,86 \text{ эВ}$; $\Delta E_V = 0,46 \text{ эВ}$.
3. Рассчитайте контактную разность потенциалов и изобразите энергетическую диаграмму p - n -перехода на основе GaAs при следующих параметрах легирования: $N_D = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $N_A = 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $N_C = 4,7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $N_V = 7 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$.
Ответ: $1,19 \text{ эВ}$.

Рекомендуемая литература

1. Полупроводниковые гетероструктуры: гетеропереход. Учебно-методическое пособие. / Составители П.А. Шилиев, Д.А. Павлов. – Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2009. – 18 с.
2. Смирнов Ю.А. Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники: учебное пособие / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов, 2013. – 495 с.
<https://e.lanbook.com/book/12948#book>.

3. Методические указания по проведению практических занятий по дисциплине «Основы микроэлектроники» [Электронный ресурс]: для студентов по направлению под-готовки/специальности 11.03.01 «Радиотехника» / Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, 2018. 26 с. <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files3/er-17245.pdf>.
4. Вычислительные наноструктуры. Задачи, модели, структуры, 2010. 487 с. <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files3/er-17245.pdf>.

5.1.2 Методические указания для обучающихся по самостоятельной работе:

Самостоятельная работа студентом проводится с целью:

- подготовки к конкретным видам занятий;
- для углубления знаний по учебной дисциплине;
- для расширения кругозора.

Самостоятельная подготовка к конкретным видам занятий включает:

- подготовку к очередной лекции;
- подготовку к лабораторным работам;
- подготовку к практическим работам.

Подготовка к очередной лекции имеет целью освежить в памяти материал предыдущей лекции. При этом также выполняются задания, которые были предложены преподавателем для СРС по теме лекции. Для выяснения всех возникших вопросов используется рекомендованная литература или любая другая литература по теме дисциплины.

Углубление знаний по учебным и смежным с ними вопросам проводится при выполнении заданий преподавателя по самостоятельному изучению отдельных положений предмета. При этом используется основная литература. В конспект вносятся необходимые уточнения и исправления, а также (на полях) дописываются новые сведения.

Расширение кругозора реализуется вследствие личной заинтересованности студента и его стремления самостоятельно получить новые знания сверх учебной программы при выполнении конкретных технических заданий, в результате участия в научно-исследовательской работе кафедры, студенческом научно-методическом семинаре, при выполнении курсовых и дипломных проектов. Для расширения кругозора должна использоваться дополнительная литература и научно-технические периодические издания. При этом не следует ограничиваться конечным объемом знаний, изучаемым на лекциях. Следует искать взаимосвязи с другими техническими дисциплинами в рамках своей специальности и смежными специальностями. Поля конспекта – это место конспектирования дополнительного материала по данной теме.

При самостоятельной подготовке по учебной дисциплине «Гетероструктурные полупроводниковые приборы» необходимо использовать учебники и конспекты лекций по математике (дифференциальное и интегральное исчисление), а также учебники и конспекты лекций по учебным дисциплинам «Физические основы электроники», «Электроника и схемотехника». Для правильной организации самостоятельной работы студента большое значение имеют:

- выработка навыков планирования своего учебного и внеучебного времени;
- выбор приоритетов;
- своевременное и правильное составление конспектов лекций по изучаемым дисциплинам.

Планирование времени включает распределение временных затрат по видам учебной деятельности. При этом, независимо от учебного плана, первоначально студентом должно быть принято правило: 1 час самостоятельной работы на 1 час затрат учебного времени по расписанию.

Приоритеты следует определять, руководствуясь объемом учебной дисциплины в часах.

Доступность и относительная простота учебной дисциплины для конкретного студента не должна быть критерием расстановки приоритетов. В основу должна быть положена систематичность изучения, поиск ответов на все непонятные вопросы. Следует придерживаться правила: чем больше потрачено времени на учебную дисциплину в начале изучения, тем больше будет экономия времени при отчетности.

6 Фонд оценочных средств для контроля текущей успеваемости и проведения промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Оценочные средства для проведения текущего контроля

6.1.1 семестр 2 | Тест

Описание процедуры.

Описание процедуры: каждому студенту выдается раздаточный материал – карточки с тестовыми заданиями в каждом по 3 вопроса с вариантами ответов.

Тестирование

Тема: Полевые гетероструктурные транзисторы и интегральные микросхемы на их основе

Вопросы для контроля / Варианты ответа Да Нет

1. В гетеропереходах используются полупроводниковые материалы с одинаковым типом проводимости.
2. При сращивании дна зоны проводимости ЕС гетероперехода германий-арсенид галлия (p-Ge – n-GaAs) на металлургической границе перехода на зонной диаграмме образуется «пичок», величина которого $\Delta EC = \chi_{Ge} + \chi_{GaAs}$.
3. При сшивании вершины валентной зоны EV в области металлургического перехода германий-арсенид галлия (p-Ge – n-GaAs) получается разрыв $\Delta EV = -\Delta E + (E_{gGaAs} - E_{gGe})$.

Тема: Гетерополевые транзисторы

Вопросы для контроля / Варианты ответа Да Нет

1. Двумерный электронный газ обеспечивает возможность получения слоя с повышенной концентрацией носителей без увеличения концентрации доноров.
2. Пороговое напряжение НЕМТ определяется толщиной dN и степенью легирования гетерослоя AlGaAs.
3. В обращенном НЕМТ узкозонный слой GaAs, в котором формируется канал, расположен между барьерным контактом и широкозонным гетерослоем AlGaAs.

Тема: Гетеробиполярные транзисторы и интегральные схемы на их основе

Вопросы для контроля / Варианты ответа Да Нет

1. Основное преимущество гетеропереходных биполярных транзисторов перед обычным биполярным транзистором – усиление инжекции неосновных носителей в эмиттер.
2. Поскольку полупроводник, образующий эмиттер гетеропереходного биполярного

транзистора имеет более широкую запрещенную зону, чем тот, что образует базу, энергетический барьер для инжекции дырок в эмиттер выше, чем барьер для инжекции электронов из эмиттера в базу.

3. Увеличение концентрации примеси в эмиттерной и уменьшение в коллекторной областях способствуют повышению быстродействия транзистора.

Описание процедуры: каждому студенту выдается раздаточный материал – карточ-ки с тестовыми заданиями в каждом по 3 вопроса с вариантами ответов.

Критерии оценки: зачтено – если процент правильных ответов превышает 50% (50% и менее – не зачет).

Тема: Оптоэлектронные приборы на гетероструктурах

Вопросы для контроля / Варианты ответа Да Нет

1. Основным физическим механизмом, ответственным за генерацию излучения в полупроводниках, является взаимодействие фотонов с носителями заряда в запрещенной зоне и зоне проводимости.

2. В полупроводниковых лазерах инверсия заселённости достигается за счёт инжекции носителей заряда в активную область кристалла, содержащего р-п-переход.

3. Оптроны способны передавать постоянные и переменные сигналы с частотой вплоть до нескольких МГц при обеспечении электрической изоляции.

Тема: Гетероструктурные нанопленки

Вопросы для контроля / Варианты ответа Да Нет

1. Физические методы осаждения: лазерное напыление, молекулярные пучки, магнетронное напыление, работающие на атмосферном давлении.

2. Методом молекулярно-пучковой эпитаксии можно выращивать гетероструктуры заданной толщины с моноатомно гладкими гетерограницами и с заданным профилем легирования.

3. Постоянные решетки $Ga_{1-x}Al_xAs$ и $GaAs$ хорошо согласуются друг с другом, а их ширины запрещенных зон отличаются в 1,5 раза.

Критерии оценивания.

Критерии оценки: зачтено – если процент правильных ответов превышает 50% (50% и менее – не зачет).

6.2 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

6.2.1 Критерии и средства (методы) оценивания индикаторов достижения компетенции в рамках промежуточной аттестации

Индикатор достижения компетенции	Критерии оценивания	Средства (методы) оценивания промежуточной аттестации
ПК-3.5	Готовность проводить экспериментальные исследования по	Устное собеседование по

	синтезу и анализу материалов нано- и микросистемной техники. Уровень способности к планированию, проведению исследования, наблюдению, обобщению информации.	теоретическим вопросам зачет; выполнение практических заданий.
--	---	--

6.2.2 Типовые оценочные средства промежуточной аттестации

6.2.2.1 Семестр 2, Типовые оценочные средства для проведения зачета по дисциплине

6.2.2.1.1 Описание процедуры

Зачет производится по совокупности выполненных студентом работ: выполнение практических и тестовых заданий; активность студента на практических и лекционных занятиях.

Типовые оценочные средства для проведения зачета по дисциплине

- выполнение практических заданий; качество решения задач – активность студента на практических занятиях;
- выполнение тестовых заданий;
- активность студента на лекционных занятиях.

Пример задания:

Вопросы, темы для подготовки к зачету:

1. Определение гетероперехода. Виды гетеропереходов.
2. Зонная структура и квазиэлектрические силы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.
3. Гетероструктуры с квантовыми ямами и квантовыми точками.
4. Физика работы полевого гетероструктурного транзистора.
5. Основные характеристики НЕМТ.
6. Характеристики рНЕМТ.
7. Характеристики mНЕМТ-транзисторов.
8. Характеристики транзисторов в зависимости от материалов гетероструктуры.
9. Транзисторы с переменной шириной запрещенной зоны.
10. Широкозонный эмиттер.
11. Физика работы биполярного гетероструктурного транзистора.
12. Основные характеристики НВТ-транзисторов.
13. Коэффициент усиления НВТ-транзистора в схеме с общим эмиттером.
14. Полупроводниковые инжекционные лазеры.
15. Лазеры на двойных гетероструктурах.
16. Твердотельная акустоэлектроника.
17. Технологические маршруты создания, конструктивные и технологические особенности оптоэлектронных приборов из разных материалов.
18. Контакт полупроводник-полупроводник.
19. Квантово-размерные эффекты.
20. Техника получения гетероэпитаксиальных пленок.
21. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии.

6.2.2.1.2 Критерии оценивания

Зачтено	Не зачтено
1. Выполнение индивидуальных заданий (задачи; тесты). 2. Принимает активное участие в процессе решения задач, устного опроса и коллективной дискуссии, без существенных ошибок излагая лекционный теоретический материал.	1. Не выполнены индивидуальные задания (задачи; тесты). 2. Не умеет решать задачи; не принимает участия в коллективных дискуссиях; на вопросы по содержанию теоретического лекционного курса отвечает с грубыми ошибками.

7 Основная учебная литература

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: [Учеб. пособие для вузов] / И.П. Степаненко, 2003. 488 с.
2. Ефимов И.Е. Основы микроэлектроники: учебник / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь, 2008. 383 с. <https://e.lanbook.com/book/709#book>.
3. Наноструктуры в электронике и фотонике / под ред. Ф. Рахмана; пер. с англ. Ю.А. Заболотной; под ред. Е.Л. Свинцова, 2010. 343 с.
4. Смирнов Ю.А. Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники: учебное пособие / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов, 2013. 495 с. <https://e.lanbook.com/book/12948#book>.
5. Методические указания по проведению практических занятий по дисциплине «Основы микроэлектроники» [Электронный ресурс]: для студентов по направлению подготовки/специальности 11.03.01 «Радиотехника» / Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, 2018. 26 с. <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files3/er-17245.pdf>.

8 Дополнительная учебная литература и справочная

1. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / Под ред. Л. Ченга, К. Плога, 1989. 582 с. <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files3/er-17245.pdf>.
2. Марголин В.И. Физические основы микроэлектроники: учебник для вузов по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» направления «Проектирование и технология электронных средств» / В.И. Марголин, В.А. Жабрев, В.А. Тупик, 2008. 398 с. <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files3/er-17245.pdf>.
3. Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике: сборник статей / Ин-т СВЧ полупроводниковой электроники, 2010. 431 с. <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files3/er-17245.pdf>.
4. Барыбин А.А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы: учебное пособие / А.А. Барыбин, 2008. 423 с. <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files3/er-17245.pdf>.
5. Татаренко Н.И. Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе / Н.И. Татаренко, В.Ф. Кравченко, 2006. 192 с. <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files3/er-17245.pdf>.

9 Ресурсы сети Интернет

1. <http://library.istu.edu/>
2. <https://e.lanbook.com/>

10 Профессиональные базы данных

1. <http://new.fips.ru/>
2. <http://www1.fips.ru/>

11 Перечень информационных технологий, лицензионных и свободно распространяемых специализированных программных средств, информационных справочных систем

1. Лицензионное программное обеспечение Системное программное обеспечение
2. Лицензионное программное обеспечение Пакет прикладных офисных программ
3. Лицензионное программное обеспечение Интернет-браузер

12 Материально-техническое обеспечение дисциплины

1. Учебная аудитория для проведения лекционных занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Оснащение: комплект учебной мебели, рабочее место преподавателя, доска. Мультимедийное оборудование (в том числе переносное): мультимедийный проектор, экран, акустическая система, компьютер с выходом в интернет.
2. Учебная аудитория для проведения лабораторных/практических (семинарских) занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации. Оснащение: комплект учебной мебели, рабочее место преподавателя, доска. Мультимедийное оборудование (в том числе переносное): мультимедийный проектор, экран, акустическая система, компьютер с выходом в интернет.