МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета радиотехники и электроники
_____ / В.А. Небольсин /
31 августа 2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
дисциплины
«Микроэлектронные приборы на гетероструктурах»

Направление подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника

Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года / 4 года и 11 мес.

Форма обучения очная / заочная

Год начала подготовки 2021

Автор программы _____ Т.В. Свистова

И.о. заведующего кафедрой полупроводниковой электроники и наноэлектроники _____ А.В. Строгонов

Руководитель ОПОП _____ А.В. Арсентьев

Воронеж 2021

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели дисциплины: формирование знаний по особенностям разработки, теоретическим и практическим вопросам расчета и проектирования микроэлектронных приборов на гетероструктурах, а также новым наиболее перспективным направлениям их развития.

1.2. Задачи освоения дисциплины:

– ознакомление с историей, достижениями и тенденциями развития микроэлектронных приборов на гетероструктурах, многообразием различных классов приборов на гетероструктурах;

– изучение физических принципов работы, характеристик и параметров микроэлектронных приборов на гетероструктурах;

– практическое освоение студентами задач моделирования и синтеза процессов, лежащих в основе работы микроэлектронных приборов на гетероструктурах;

– приобретение навыков расчета основных параметров и характеристик микроэлектронных приборов на гетероструктурах.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.01.02 «Микроэлектронные приборы на гетероструктурах» относится к дисциплинам части блока Б1 учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Микроэлектронные приборы на гетероструктурах» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-2: способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения;

ПК-5: способность владеть современными методами расчета и проектирования микроэлектронных приборов и устройств твердотельной электроники, способность к восприятию, разработке и критической оценке новых способов их проектирования.

Компетенция	**Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции**
ПК-2	**знать** физические принципы работы, характеристики и параметры основных типов микроэлектронных приборов на гетероструктурах; физические и математические модели процессов и явлений, лежащих в основе принципов действия микроэлектронных приборов на

	гетероструктурах;
	уметь самостоятельно решать задачи моделирования, анализа и синтеза процессов и явлений, лежащих в основе работы микроэлектронных приборов на гетероструктурах; проводить оценочные расчеты их основных параметров и характеристик;
	владеть навыками организации и проведения измерений электрических параметров и характеристик микроэлектронных приборов на гетероструктурах.
ПК-5	**знать** конструкции, параметры, основные эксплуатационные характеристики и области применения микроэлектронных приборов на гетероструктурах;
	уметь применять полученные знания при теоретическом анализе, компьютерном моделировании и экспериментальном исследовании физических процессов, лежащих в основе принципов работы микроэлектронных приборов на гетероструктурах; применять методы расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования микроэлектронных приборов на гетероструктурах;
	владеть навыками использования стандартной терминологии, определений, обозначений и единиц физических величин в микроэлектронике; навыками расчета и проектирования основных классов приборов.

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Общая трудоемкость дисциплины «Микроэлектронные приборы на гетероструктурах» составляет 4 зачетные единицы.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

Очная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		5
Аудиторные занятия (всего)	80	80
В том числе:		
Лекции	48	48
Лабораторные работы (ЛР)	16	16
Практические занятия (ПЗ)	16	16
Самостоятельная работа	64	64
Вид промежуточной аттестации – зачет с оценкой	+	+
Общая трудоемкость час	144	144
зач. ед.	4	4

Заочная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		5
Аудиторные занятия (всего)	16	16
В том числе:		
Лекции	8	8
Лабораторные работы (ЛР)	4	4
Практические занятия (ПЗ)	4	4
Самостоятельная работа	124	124
Часы на контроль	4	4
Вид промежуточной аттестации – зачет с оценкой	+	+
Общая трудоемкость час	144	144
зач. ед.	4	4

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Гетероструктуры в современной микроэлектронике	Введение, исходные положения предмет и задачи дисциплины. Основные параметры и отличительные особенности гетеропереходов. *Самостоятельно.* Физические явления в классических гетероструктурах.	2	-	-	6	8
2	Элементы теории гетеропереходов	Энергетическая диаграмма полупроводниковой гетероструктуры. Выбор материалов полупроводниковых гетеропар. *Самостоятельно.* Электрические модели гетеропереходов. Резкие анизотипные гетеропереходы. Резкие изотипные гетеропереходы.	4	4	-	7	15
3	Свойства гетеропереходов	Электрические свойства: вольт-емкостная характеристика; вольт-амперная характеристика. Оптические свойства гетеропереходов: фотоэлектрические свойства; люминесцентные свойства. *Самостоятельно.* Свойства гетеропереходов в системе GaAs – AlAs.	6	8	-	7	21
4	Исследование параметров гетероэпитаксиальных слоев	Исследование структурных дефектов. Исследование состава слоя. Измерение электрических параметров: метод Ван-дер-Пау, четырезондовый метод, трехзондовый метод, метод эффекта Холла. *Самостоятельно.* Исследование толщина слоя.	4	4	-	6	14
5	Полупроводниковые приборы на основе классических гетероструктур.	Низкопороговые полупроводниковые лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре, лазеры с распределенной обратной связью и с распределенными брэгговскими зеркалами, поверхностно-излучающие лазеры, инфракрасные лазеры на гетероструктурах II-го рода. Высокоэффективные светоизлучающие диоды. Солнечные элементы и фотодетекторы, основанные на эффекте широкозонного окна. Гетеробиполярные транзисторы с широкозонным эмиттером. *Самостоятельно.* Транзисторы, тиристоры, динисторы с передачей светового сигнала. Мощные диоды и тиристоры.	8	-	4	10	22
6	Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешетками.	Основные понятия и определения. Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми ямами. *Самостоятельно.* Фундаментальные физические явления в гетероструктурах со сверхрешетками.	4	-	-	7	11
7	Полупроводниковые приборы на основе гетероструктур с кван-	Инфракрасные квантовые каскадные лазеры. Лазер с КЯ, ограниченной КПСР. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (ВПЭТ). Резонансно-туннельные диоды. Высокоточные стандарты сопротивлений. Приборы на основе эффекта электропоглощения и	8	-	4	7	19

	товыми ямами (КЯ) и сверхрешетками	электрооптические модуляторы. *Самостоятельно.* Инфракрасные фотодетекторы на основе эффекта поглощения между уровнями размерного квантования.					
8	Гетероструктуры с квантовыми проволоками (КП) и квантовыми точками (КТ).	Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми проволоками и квантовыми точками. *Самостоятельно.* Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками.	4	-	4	7	15
9	Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками	Лазеры на основе самоорганизующихся КТ. Многослойные КТ-лазер. *Самостоятельно.* Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками для создания «одноэлектронных» устройств. Новые возможности для развития полевых транзисторов.	8	-	4	7	19
		Итого	**48**	**16**	**16**	**64**	**144**

заочная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Гетероструктуры в современной микроэлектронике	Введение, исходные положения предмет и задачи дисциплины. Основные параметры и отличительные особенности гетеропереходов. *Самостоятельно.* Физические явления в классических гетероструктурах.	2	-	-	13	15
2	Элементы теории гетеропереходов	*Самостоятельно.* Энергетическая диаграмма полупроводниковой гетероструктуры. Выбор материалов полупроводниковых гетеропар. Электрические модели гетеропереходов. Резкие анизотипные гетеропереходы. Резкие изотипные гетеропереходы.	-	-	-	14	14
3	Свойства гетеропереходов	Электрические свойства: вольт-емкостная характеристика; вольт-амперная характеристика. Оптические свойства гетеропереходов: фотоэлектрические свойства; люминесцентные свойства. *Самостоятельно.* Свойства гетеропереходов в системе GaAs – AlAs.	2	4	-	13	19
4	Исследование параметров гетероэпитаксиальных слоев	*Самостоятельно.* Исследование структурных дефектов. Исследование толщина слоя. Исследование состава слоя. Измерение электрических параметров: метод Ван-дер-Пау, четырезондовый метод, трехзондовый метод, метод эффекта Холла	-	-	-	14	14
5	Полупроводниковые приборы на основе классических гетероструктур.	Низкопороговые полупроводниковые лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре, лазеры с распределенной обратной связью и с распределенными брэгговскими зеркалами, поверхностно-излучающие лазеры, инфракрасные лазеры на гетероструктурах II-го рода. Высокоэффективные светоизлучающие диоды. Солнечные элементы и фотодетекторы, основанные на эффекте широкозонного окна. Гетеробиполярные транзисторы с широкозонным эмиттером. *Самостоятельно.* Транзисторы, тиристоры, динисторы с передачей светового сигнала. Мощные диоды и тиристоры.	2	-	4	14	20
6	Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешетками.	*Самостоятельно.* Основные понятия и определения. Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми ямами. Фундаментальные физические явления в гетероструктурах со сверхрешетками.	-	-	-	14	14
7	Полупроводниковые приборы на основе гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) и сверхрешетками	Инфракрасные квантовые каскадные лазеры. Лазер с КЯ, ограниченной КПСР. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (ВПЭТ). Резонансно-туннельные диоды. Высокоточные стандарты сопротивлений. *Самостоятельно.* Приборы на основе эффекта электропоглощения и электрооптические модуляторы. Инфракрасные фотодетекторы на основе эффекта поглощения между уровнями размерного квантования.	2	-	-	14	16
8	Гетероструктуры с квантовыми проволоками (КП) и квантовыми точками (КТ).	*Самостоятельно* .Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми проволоками и квантовыми точками. Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками.	-	-	-	14	14
9	Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками	Лазеры на основе самоорганизующихся КТ. Многослойные КТ-лазер. *Самостоятельно.* Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками для создания «одноэлектронных» устройств. Новые возможности для развития полевых транзисторов.	-	-	-	14	14
		Итого	**8**	**4**	**4**	**124**	**140**
		Контроль					**4**
		Итого					**144**

5.2 Перечень лабораторных работ

1. Исследование параметров резкого анизотипного гетероперехода
2. Измерение вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик гетероперехода
3. Исследование оптических свойств гетеропереходов.
4. Исследование характеристик гетероструктур на основе металлооксидных пленок.

6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины «Микроэлектронные приборы на гетероструктурах» не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-2	**знать** физические принципы работы, характеристики и параметры основных типов микроэлектронных приборов на гетероструктурах; физические и математические модели процессов и явлений, лежащих в основе принципов действия микроэлектронных приборов на гетероструктурах;	Тест	Выполнение теста на 40 – 100 %	В тесте менее 40 % правильных ответов
	уметь самостоятельно решать задачи моделирования, анализа и синтеза процессов и явлений, лежащих в основе работы микроэлектронных приборов на гетероструктурах; проводить оценочные расчеты их основных параметров и характеристик;	Тест	Выполнение теста на 40 – 100 %	В тесте менее 40 % правильных ответов
	владеть навыками организации и проведения измерений электрических параметров и характеристик микроэлектронных приборов на гетероструктурах.	Тест	Выполнение теста на 40 – 100 %	В тесте менее 40 % правильных ответов
ПК-5	**знать** конструкции, параметры, основные эксплуатационные характеристики и области применения микроэлектронных приборов на гетероструктурах;	Тест	Выполнение теста на 40 – 100 %	В тесте менее 40 % правильных ответов

	уметь применять полученные знания при теоретическом анализе, компьютерном моделировании и экспериментальном исследовании физических процессов, лежащих в основе принципов работы микроэлектронных приборов на гетероструктурах; применять методы расчета параметров и характеристик, моделирования и проектирования микроэлектронных приборов на гетероструктурах;	Тест	Выполнение теста на 40 – 100 %	В тесте менее 40 % правильных ответов
	владеть навыками использования стандартной терминологии, определений, обозначений и единиц физических величин в микроэлектронике; навыками расчета и проектирования основных классов приборов.	Тест	Выполнение теста на 40 – 100 %	В тесте менее 40 % правильных ответов

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 5 семестре для очной формы обучения, в 5 семестре для заочной формы обучения по системе:

«отлично»;
«хорошо»;
«удовлетворительно»;
«неудовлетворительно»

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл	Неудовл
ПК-2	**знать** физические принципы работы, характеристики и параметры основных типов микроэлектронных приборов на гетероструктурах; физические и математические модели процессов и явлений, лежащих в основе принципов действия микроэлектронных приборов на гетероструктурах;	Тест	Выполнение теста на 90 – 100 %	Выполнение теста на 80 – 90 %	Выполнение теста на 70 – 80 %	В тесте менее 70 % правильных ответов
	уметь самостоятельно решать задачи моделирования, анализа и синтеза процессов и явлений, лежащих в основе работы микроэлектронных приборов на гетероструктурах; проводить оценочные расчеты их основных параметров и характеристик;	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть навыками организации и проведения измерений электрических параметров и характеристик микроэлектронных приборов на гетероструктурах.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ПК-5	**знать** конструкции, параметры, основные эксплуатационные характеристики и области применения микроэлектронных приборов на гетероструктурах;	Тест	Выполнение теста на 90 – 100 %	Выполнение теста на 80 – 90 %	Выполнение теста на 70 – 80 %	В тесте менее 70 % правильных ответов
	уметь применять полученные знания при теоретическом анализе, компьютерном моделировании и экспериментальном исследовании физических процессов, лежащих в основе принципов работы микроэлектронных приборов на гетероструктурах; применять методы расчета параметров и характе-	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

	ристик, моделирования и проектирования микроэлектронных приборов на гетероструктурах;					
	владеть навыками использования стандартной терминологии, определений, обозначений и единиц физических величин в микроэлектронике; навыками расчета и проектирования основных классов приборов.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Сверхрешетка – это:
    1. полупрозрчный диэлектрик с определенной периодической структурой и уникальными оптическими свойствами;
    2. твердотельная периодическая структура, в которой на носители заряда наряду с потенциалом кристаллической решетки действует дополнительный встроенный потенциал;
    3. фазы переменного состава, в которых атомы различных элементов расположены в общей кристаллической решетке.

2. Гетеропереход – это:
    1. сверхрешетка, в которой искусственно создано поле, период которого на порядки превышает период основной решетки;
    2. контакт двух различных по химическому составу полупроводников, при котором кристаллическая решетка одного материала без нарушения периодичности переходит в решетку другого материала;
    3. фаза переменного состава, в которых атомы различных элементов расположены в общей кристаллической решётке, тип решетки компонента – растворителя сохраняется, но с иными размерами элементарной ячейки.

3. Квантовой ямой называют
    1. одномерную (1D) структуру с двумя нанометровыми геометрическими измерениями;
    2. двумерную (2D) структуру с одним нанометровым измерением;
    3. нульмерный (0D) объект, все три измерения которого имеют порядок нанометровых геометрических измерения.

4. Квантовой проволокой называют
    1. одномерную (1D) структуру с двумя нанометровыми геометрическими измерениями;
    2. нульмерный (0D) объект, все три измерения которого имеют порядок нанометровых геометрических измерения;
    3. двумерную (2D) структуру с одним нанометровым измерением.

5. Квантовой точкой называют
    1. двумерную (2D) структуру с одним нанометровым измерением;
    2. нульмерный (0D) объект, все три измерения которого имеют порядок нанометровых геометрических измерения;
    3. одномерную (1D) структуру с двумя нанометровыми геометрическими измерениями.

6. Какие наноструктуры называются квантовыми ямами:
1. 3D;
2. 2D;
3. 1D;
4. 0D?

7. Какие наноструктуры называются квантовыми проволоками:
1. 3D;
2. 2D;
3. 1D;
4. 0D?

8. Какие наноструктуры называются квантовыми точками:
1. 3D;
2. 2D;
3. 1D;
4. 0D?

9. Какой спектр характерен для квантовой точки:
1. аналогичный спектру малоатомного кластера;
2. аналогичный спектру малоатомной молекулы;
3. аналогичный спектру квантовой ямы;
4. аналогичный спектру одиночного атома?

10. Какие пары материалов позволяют создавать гетерооптоэлектронные приборы:
1. Ge – Ge;
2. Si – Si;
3. GaAs – GaAlAs;
4. GaAs – GaAs?

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. К нанофотонным относятся устройства, использующие оптоэлектронные приборы с размером областей:
1. более 10^{-6};
2. менее 10^{-6};
3. более 10^{-7};
4. менее 10^{-7}.

2. Минимальными пороговыми токами обладают лазеры на основе:
1. моноперехода;
2. одиночной гетероструктуры;
3. квантовых ям;
4. квантовых точек.

3. Энергетической щелью называется интервал энергий между:
1. верхним заполненным энергетическим уровнем валентной зоны и уровнем Ферми;
2. верхним заполненным уровнем валентной зоны и ближайшим к нему незаполненным уровнем зоны проводимости;
3. потолком зоны проводимости и уровнем Ферми;
4. двумя примесными уровнями в запрещенной зоне.

4. Какими оптическими свойствами обладают металлические нанокластеры:
   1. более широкой полосой спектра поглощения, чем массивные материалы; комплексной диэлектрической проницаемостью;
   2. более узкой полосой спектра поглощения, чем массивные материалы; комплексной диэлектрической проницаемостью;
   3. более узкой полосой спектра поглощения, чем массивные материалы; постоянной диэлектрической проницаемостью.

5. Каких размеров может быть экситон полупроводникового нанокластера?
   1. гораздо меньше кластера;
   2. сравнимым или больше кластера;
   3. гораздо больше кластера.

6. Какие фотонные кристаллы способны к интенсивному испусканию света:
   1. GaAs; InP;
   2. GaAlAs; InAsP;
   3. GaS; InS.

7. Наноэлектронные лазеры создают на основе:
   1. моно p-n-переходов;
   2. гетероструктур;
   3. полимерных материалов;
   4. жидких кристаллов.

8. Какая особенность присуща лазерам с вертикальным резонатором:
   1. отсутствие горизонтальных резонаторов; низкий пороговый ток;
   2. встроенная система накачки; отсутствие горизонтальных резонаторов;
   3. высокий КПД, низкий пороговый ток?

9. Какой эффект используется в работе наноэлектронных фотоприемников на квантовых схемах:
   1. туннельный;
   2. размерного квантования;
   3. тиристорный;
   4. лавинного пробоя?

10. Фотоприемники на квантовых точках характеризуются квантовой эффективностью:
   1. $n < 1$ %;
   2. $n \approx 3...30$ %;
   3. $n \approx 31...50$ %;
   4. $n > 50$ %.

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Рассчитайте контактную разность потенциалов n-n^+-гомоперехода, сформированного на контакте двух кристаллов с уровнем легирования $5 \cdot 10^{14}$ и $5 \cdot 10^{16}$ $см^{-3}$ при комнатной температуре.

2. Рассчитайте контактную разность потенциалов гомоперехода, сформированного на контакте двух невырожденных полупроводников *p*- и *n*-типа: а) PbS; б) Si. $N_d = 10^{18}$ $см^{-3}$, $N_a = 10^{16} см^{-3}$.

3. Рассчитайте разрывы зон проводимости ΔE_C и валентной зоны ΔE_V а также диффузионный потенциал φ_0 для гетероперехода n-Si-p-Ge. Постройте энергетическую диаграмму. Концентрацию мелких доноров в кремнии примите равной $N_d = 5 \cdot 10^{15} см^{-3}$, концентрацию мелких акцепторов в германии $N_a = 2 \cdot 10^{16} см^{-3}$.

4. Рассчитайте для идеального гетероперехода n-Si-p-Ge из предыдущей задачи толщину обедненных слоев, напряженности полей на границе раздела и контактные разности потенциалов, приходящиеся на каждый материал. Постройте энергетическую диаграмму. Определите, какой высоты потенциальные барьеры стоят на пути встречного движения через переход основных носителей.

5. Используя правило Андерсона вычислите разрывы зоны проводимости и валентной зоны для гетероперехода а) GaAs-AlAs и б) InAs-GaSb.

6. Используя правило Андерсона, нарисуйте зонную диаграмму при комнатной температуре для гетероструктуры p-$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ – n-GaAs. Какие типы зарядов, может захватывать данная структура на гетерогранице? Как изменится зонная диаграмма при приложении постоянного потенциала V?

7. Схематически изобразите диаграмму *p-n* и *n-p*-переходов на основе гетероперехода II типа и в каком случае электроны и дырки могут «захватываться» на интерфейсе. Что измениться в случае нелегированного гетероперехода III типа (например, InAs-GaSb)?

8. Рассчитайте контактную разность потенциалов и изобразите энергетическую диаграмму *p-n*-перехода на основе GaAs при следующих параметрах легирования: $N_D=2 \cdot 10^{21} м^{-3}$, $N_A=10^{23} м^{-3}$, $N_C=4.7 \cdot 10^{23} м^{-3}$, $N_V=7 \cdot 10^{24} м^{-3}$.

9. Диод из предыдущей задачи замените гетеропереходом между *n*-$Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ и p-GaAs. Легирование Al меняется скачком. Сосчитайте положение уровня Ферми, нарисуйте диаграмму, и рассчитайте контактную разность потенциалов. Покажите, что контактная разность потенциалов вычисляется как:

$$eV = E_g^{(p)} + \Delta E_c - [E_c^{(n)} - E_F^{(n)}] - [E_F^{(p)} - E_v^{(p)}].$$

Две разности в скобках могут быть вычислены просто исходя из уровня легирования. Покажите, что эффект от замены GaAs на AlGaAs на *n*-стороне сводится к увеличению контактной разности потенциалов на ΔE_C.

10. Используя справочные данные, определите по обобщенному правилу Вегарда составы $In_xGa_{1-x}As$ и $In_xAl_{1-x}As$, которые без напряжений могут быть выращены на подложке InP.

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

1. Основные параметры и отличительные особенности гетеропереходов.
2. Физические явления в классических гетероструктурах.
3. Односторонняя инжекция.
4. Сверхинжекция.
5. Диффузия во встроенном квазиэлектрическом поле.
6. Электронное ограничение. Оптическое ограничение.
7. Эффект широкозонного окна.
8. Диагональное туннелирование через гетерограницу.
9. Низкопороговые полупроводниковые лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре,
10. Лазеры с распределенной обратной связью и с распределенными брэгговскими зеркалами,
11. Поверхностно-излучающие лазеры,

12. Инфракрасные лазеры на гетероструктурах II-го рода.
13. Высокоэффективные светоизлучающие диоды.
14. Солнечные элементы и фотодетекторы, основанные на эффекте широкозонного окна.
15. Полупроводниковая интегральная оптика, основанная на полупроводниковых РОС и РБЗ лазерах.
16. Гетеробиполярные транзисторы с широкозонным эмиттером.
17. Транзисторы, тиристоры, динисторы с передачей светового сигнала. Мощные диоды и тиристоры.
18. Преобразователи света из инфракрасного в видимый диапазон.
19. Эффективные холодные катоды.
20. Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми ямами и сверхрешетками.
21. Двумерный электронный газ.
22. Ступенчатый вид функции плотности состояний.
23. Квантовый эффект Холла.
24. Дробный квантовый эффект Холла.
25. Существование экситонов при комнатной температуре.
26. Резонансное туннелирование в структурах с двойным барьером и сверхрешетках.
27. Энергетический спектр носителей в сверхрешетках.
28. Стимулированное излучение при резонансном туннелировании в сверхрешетках.
29. Псевдоморфный рост напряженных структур.
30. Инфракрасные квантовые каскадные лазеры.
31. Лазер с КЯ, ограниченной КПСР.
32. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (ВПЭТ).
33. Резонансно-туннельные диоды.
34. Высокоточные стандарты сопротивлений.
35. Приборы на основе эффекта электропоглощения и электрооптические модуляторы.
36. Инфракрасные фотодетекторы на основе эффекта поглощения между уровнями размерного квантования.
37. Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми проволоками и квантовыми точками.
38. Одномерный электронный газ (КП). Функция плотности состояний с острыми максимумами (КП).
39. Нульмерный электронный газ (КТ). Функция плотности состояний типа δ-функции (КТ).
40. Лазеры на основе самоорганизующихся КТ.
41. Многослойные КТ-лазер.
42. Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками для создания «одноэлектронных» устройств.

7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену

Не предусмотрено учебным планом.

7.2.6 Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Зачет с оценкой проводится по билетам, каждый из которых содержит 3 вопроса. Оценка знаний студентов производится по следующему критерию:

– оценка «отлично» выставляется, если на все вопросы даны отличные ответы или 2 вопроса оценены на «отлично», а 1 вопрос – на «хорошо»;

– оценка «хорошо» выставляется, если 2 вопроса оценены на «отлично» или «хорошо», а 1 вопрос – на «удовлетворительно»;

– оценка «удовлетворительно» выставляется, если 2 вопроса оценены на «удовлетворительно» или один из вопросов оценен на «неудовлетворительно» при любых оценках на оставшиеся вопросы;

– оценка «неудовлетворительно» выставляется, если более 1 вопроса оценены на «неудовлетворительно».

Оценка	Критерии оценок
Отлично	Корректное использование широкого спектра научных понятий. Рассуждения логически непротиворечивы, последовательны, выявлены причинно-следственные связи, осуществлен последовательный анализ проблемы, все выводы обоснованы достоверной фактологической базой. Продемонстрировано умение целостно видеть проблему, выделять ее ключевое звено.
Хорошо	Достаточный уровень знаний. Может быть продемонстрировано знание основных принципов и концепций при наличии некоторых несущественных пробелов. Целостное видение рассматриваемой проблемы присутствует, но не до конца выражено в авторском анализе.
Удовлетворительно	Удовлетворительный уровень знаний. Налицо ряд пробелов в знании основных принципов и концепций. Анализ проблемы проведен фрагментарно. Выводы в основном верные, но в рассуждении допущены логические пробелы, мешающие целостному видению рассматриваемой проблемы.
Неудовлетворительно	Низкий уровень знаний. Допущены существенные ошибки. Отсутствие логических рассуждений, понимания проблемы, необоснованность выводов.

При получении оценок «отлично», «хорошо» и «удовлетворительно» требуемые в рабочей программе знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на промежуточном этапе считаются достигнутыми.

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции (или ее части)	Наименование оценочного средства
1	Гетероструктуры в современной микроэлектронике	ПК-2, ПК-5	Тест

2	Элементы теории гетеропереходов	ПК-2, ПК-5	Тест
3	Свойства гетеропереходов	ПК-2, ПК-5	Тест
4	Исследование параметров гетероэпитаксиальных слоев	ПК-2, ПК-5	Тест
5	Полупроводниковые приборы на основе классических гетероструктур.	ПК-2, ПК-5	Тест, защита лабораторных работ
6	Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешетками.	ПК-2, ПК-5	Тест
7	Полупроводниковые приборы на основе гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) и сверхрешетками	ПК-2, ПК-5	Тест, защита лабораторных работ
8	Гетероструктуры с квантовыми проволоками (КП) и квантовыми точками (КТ).	ПК-2, ПК-5	Тест, защита лабораторных работ
9	Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками	ПК-2, ПК-5	Тест, защита лабораторных работ

7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста преподавателем и выставляется оценка согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач преподавателем и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач преподавателем и выставляется оценка, согласно методике выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

8 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Основная литература

1. **Свистова Т.В.** Основы микроэлектроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Т.В. Свистова; ФГБОУ ВО «Воронеж. гос. техн. ун-т», каф. полупроводниковой электроники и наноэлектроники. – Электрон. текстовые, граф. дан. (2,7 Мб). - Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. - 147 с

2. **Ефимов И.Е.** Основы микроэлектроники: учебник / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь. - 3-е изд., стереотип. - СПб.: Лань, 2008. - 384 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0866-5

3. **Ефимов И.Е.** Основы микроэлектроники [Электронный ресурс]: учебник / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь. - 3-е изд. - СПб.: Лань, 2021. - 384 с. - ISBN 978-5-8114-0866-5. URL: https://e.lanbook.com/book/167727

4. **Старосельский В.И.** Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учеб. пособие / В.И. Старосельский. - М.: Юрайт, 2011. - 463 с. - ISBN 978-5-9916-0808-4

5. **Смирнов Ю.А.** Основы микроэлектроники и микропроцессоров техники: учеб. пособие / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. - 2-е изд., испр. - Спб.: Лань, 2013. - 496 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1379-9

6. **Смирнов Ю.А.** Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. - 2-е изд., испр. - Спб.: Лань, 2021. - 496 с. - Книга из коллекции Лань - Инженерно-технические науки. - ISBN 978-5-8114-1379-9. URL: https://e.lanbook.com/book/168550

7. **Лозовский В.Н.** Нанотехнологии в электронике. Введение в специальность: учеб. пособие / В.Н. Лозовский, Г.С. Константинова, С.В. Лозовский. - СПб. : Лань, 2008. - 336 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0827-6

8. **Лозовский В.Н.** Нанотехнологии в электронике. Введение в специальность [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.Н. Лозовский, С.В. Лозовский. - 2-е изд., стер. - СПб.: Лань, 2019. - 332 с. - ISBN 978-5-8114-3986-7. URL: https://e.lanbook.com/book/113943

Дополнительная литература

9. **Свистова Т.В.** Микроэлектроника: учеб. пособие / Т. В. Свистова. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. - 129 с.

10. **Коваленко А.А.** Основы микроэлектроники: учеб. пособие / А.А. Коваленко, М.Д. Петропавловский. - М.: Академия, 2006. - 240 с. - (Высшее профессиональное образование). - ISBN 5-7695-2661-3

11. **Степаненко И.П.** Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов / И.П. Степаненко. - 2-е изд. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. - 488 с. - ISBN 5-93208-045-0

12. **Щука А.А.** Электроника: учеб. пособие / А.А. Щука ; под ред. А.С.Сигова. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 800 с. - ISBN 5-94157-461-4

13. **Ковалев А.Н.** Физика и технология наноструктурных гетерокомпозиций: учебник / А.Н. Ковалев, О.И. Рабинович, М.И. Тимошина. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2015. - 460 с. - ISBN 978-5-87623-941-9. URL: http://www.iprbookshop.ru/98922.html

14. **Введение в нанотехнологию**: учебник. / В.И. Марголин, В.А. Жабрев, Г.Н. Лукьянов, В.А. Тупик. - Спб. :Лань, 2012. - 464 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1318-8

15. **Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах** / С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012 – 352 с. - (Нанотехнологии). - ISBN 978-5-9963-0294-9

16. **Пантелеев В.И.** Физика и технология полупроводниковых гетеропереходных структур: учеб. пособие / В.И. Пантелеев. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2000. - 82 с.

17. **Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Микроэлектроника» для студентов специальности 210107 «Электронное машиностроение» очной формы обучения** / Каф. технологических и автоматизированных систем электронного машиностроения; Сост. Г. И. Липатов. - Воронеж : ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. - 43 с. (№ 86-2010)

8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем

Программное обеспечение компьютеров для самостоятельной и аудиторной работы:

- Операционные системы семейства MSWindows;
- Пакет офисных программ LibreOffice;
- Программа просмотра файлов WinDjview;
- Программа просмотра файлов формата pdf Adobe Acrobat Reader;
- Интернет-браузеры Mozilla Firefox, Google Chrome;
- Математический пакет MathCad Express, Smath Studio;
- Среда разработки Python;
- Система управления курсами Moodle;

Используемые электронные библиотечные системы:

- Модуль книгообеспеченности АИБС «МАРК SQL»: http://bibl.cchgeu.ru/provision/struct/;
- ЭБС Издательства «ЛАНЬ», в том числе к коллекциям «Инженерно-технические науки», «Физика»: http://e.lanbook.com/;
- ЭБС IPRbooks: http://www.iprbookshop.ru;
- научная электронная библиотека eLIBRARY.RU: http://elibrary.ru/.

Информационные справочные системы:

- портал федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования: http://fgosvo.ru;
- единое окно доступа к образовательным ресурсам: http://window.edu.ru/;
- открытый образовательный ресурс НИЯУ МИФИ: http://online.mephi.ru/;
- открытое образование: https://openedu.ru/;
- физический информационный портал: http://phys-portal.ru/index.html
- Профессиональные справочные системы «Техэксперт»: https://cntd.ru
- Электронная информационная образовательная среда ВГТУ: https://old.education.cchgeu.ru

9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

1. Лекционная аудитория 311/4, укомплектованная специализированной мебелью и оснащенная оборудованием для лекционных демонстраций: мультимедиа-проектором, стационарным экраном, наборами демонстрационного оборудования (учебный корпус № 4, расположенный по адресу: Московский пр., 179):

комплект учебной мебели: рабочее место преподавателя (стол, стул);
рабочие места обучающихся (столы, стулья) на 22 человека.
проектор BenQ MP515 DLP;
экран ScreenMedia настенный.
огнетушитель.

2. Лаборатория физики полупроводниковых приборов, ауд. 208/4, укомплектованная специализированной мебелью и оснащенная оборудованием для проведения лабораторных занятий (учебный корпус № 4, расположенный по адресу: Московский пр., 179):

комплект учебной мебели: рабочее место преподавателя (стол, стул);
рабочие места обучающихся (столы, стулья) на 22 человека;
генератор Г4-18А (3 штуки);
измеритель иммитанса Е7-20;
осциллограф С1-104 (2 штуки);
лабораторный источник питания HY5003 (2 штуки);

осциллограф С9-4А (2 штуки);
электрометр У1-7;
частотомер Ч3-34;
вольтметр В7-20 (2 штуки);
осциллограф С1-73;
вольтметр селективный GMS;
осциллограф МСР ОСУ-10А;
генератор сигналов FG-515;
генератор ГЗ-104 (2 штуки);
вольтметр В7-16;
вольтметр цифровой В2-20;
обучающее устройство (2 штуки);
огнетушитель.

3. Дисплейный класс для самостоятельной работы студентов**,** укомплектованный специализированной мебелью и оснащенный персональными компьютерами с лицензионным программным обеспечением с возможностью подключения к сети «Интернет» и доступом в электронную информационно-образовательную среду университета, ауд. 209/4 (учебный корпус № 4, расположенный по адресу: Московский пр., 179):

комплект учебной мебели: рабочее место преподавателя (стол, стул);
рабочие места обучающихся (столы, стулья) на 20 человек.
компьютер-сборка каф.9;
компьютер в составе: (H61/IntelCorei3/Кв/M/20" LCD);
компьютер-сборка каф.7;
компьютер-сборка каф.3;
компьютер в составе: (H61/IntelCorei3/Кв/M/23" LCD);
компьютер-сборка каф.5;
компьютер-сборка каф.4;
компьютер-сборка каф.8;
компьютер-сборка каф.2;
компьютер-сборка каф.6;
компьютер-сборка каф.10;
комп. в сост: Сист.блок RAMEC GALE,монитор 17" LCD;
компьютер-сборка каф.1;
экран Projecta ProScreen настенный рулонный;
проектор BenQ MP515 DLP;
огнетушитель.

10 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Микроэлектронные приборы на гетероструктурах» читаются лекции, проводятся лабораторные и практические занятия.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета параметров гетероструктур и приборов на их основе. Занятия проводятся путем решения стандартных и прикладных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Большое значение по закреплению и совершенствованию знаний имеет самостоятельная работа студентов. Информацию обо всех видах самостоятельной работы студенты получают на занятиях.

Контроль усвоения материала дисциплины осуществляется тестированием и защитой лабораторных работ Освоение дисциплины оценивается на зачете с оценкой.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удается разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практические занятия	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, решение задач по алгоритму.
Лабораторная работа	Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных, для подготовки к ним необходимо: разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
1	Актуализирован раздел 8.1 в части состава учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины.	04.02.2025	
2			
3			
4			