

**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 нанoeлектроника

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 2018

Автор программы

Т.В. Свистова

И.о. заведующего кафедрой  
полупроводниковой электроники  
и нанoeлектроники

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, лежа-

	щих в основе принципов действия микроэлектронных приборов на гетероструктурах;
	<b>уметь</b> 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;
	<b>владеть</b> навыками организации и проведения измерений электрических параметров и характеристик микроэлектронных приборов на гетероструктурах.
ПК-5	<b>знать</b> конструкции, параметры, основные эксплуатационные характеристики и области применения микроэлектронных приборов на гетероструктурах;
	<b>уметь</b> 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;
	<b>владеть</b> 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 3 зачетные единицы.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

##### Очная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		6
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	50	50
В том числе:		
Лекции	34	34
Практические занятия (ПЗ)	16	16
<b>Самостоятельная работа</b>	58	58
Вид промежуточной аттестации - зачет	+	+
Общая трудоемкость	час	108
	зач. ед.	3
		108
		3

## Заочная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		6
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	12	12
В том числе:		
Лекции	6	6
Практические занятия (ПЗ)	6	6
<b>Самостоятельная работа</b>	92	92
Контрольная работа	+	+
Часы на контроль	4	4
Вид промежуточной аттестации - зачет	+	+
Общая трудоемкость	час	108
	зач. ед.	3

## 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.	СРС	Всего, час
1	Гетероструктуры в современной микроэлектронике.	Основные параметры и отличительные особенности гетеропереходов. Физические явления в классических гетероструктурах.	4	-	8	12
2	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. Транзисторы, тиристоры, динисторы с передачей светового сигнала. Мощные диоды и тиристоры.	10	4	14	28
3	Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешетками.	Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми ямами и сверхрешетками.	2	2	4	8
4	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. Приборы на основе эффекта электропоглощения и электрооптические модуляторы. Инфракрасные фотодетекторы на основе эффекта поглощения между уровнями размерного квантования.	8	4	14	26
5	Гетероструктуры с квантовыми проволоками (КП) и квантовыми точками (КТ).	Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми проволоками и квантовыми точками	2	2	4	8
6	Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками	Лазеры на основе самоорганизующихся КТ. Многослойные КТ-лазер. Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками для создания «одноэлектронных» устройств. Новые возможности для развития полевых транзисторов.	8	4	14	26
<b>Итого</b>			<b>34</b>	<b>16</b>	<b>58</b>	<b>108</b>

## заочная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	СРС	Всего, час
1	Гетероструктуры в современной микроэлектронике.	Основные параметры и отличительные особенности гетеропереходов. Физические явления в классических гетероструктурах.	2	-	8	10
2	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. Транзисторы, тиристоры, динисторы с передачей светового сигнала. Мощные диоды и тиристоры.	-	2	28	30
3	Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешетками.	Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми ямами и сверхрешетками.	2	-	8	10
4	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. Приборы на основе эффекта электропоглощения и электрооптические модуляторы. Инфракрасные фотодетекторы на основе эффекта поглощения между уровнями размерного квантования.	-	2	20	22
5	Гетероструктуры с квантовыми проволоками (КП) и квантовыми точками (КТ).	Фундаментальные физические явления в гетероструктурах с квантовыми проволоками и квантовыми точками	2	-	8	10
6	Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками	Лазеры на основе самоорганизующихся КТ. Многослойные КТ-лазер. Применение гетероструктур с квантовыми проволоками и квантовыми точками для создания «одноэлектронных» устройств. Новые возможности для развития полевых транзисторов.	-	2	20	22
<b>Всего</b>			<b>6</b>	<b>6</b>	<b>92</b>	<b>104</b>
<b>Контроль</b>						<b>4</b>
<b>Итого</b>						<b>108</b>

## 5.2 Перечень лабораторных работ

Не предусмотрено учебным планом.

## 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).

Учебным планом по дисциплине «Микроэлектронные приборы на гетероструктурах» предусмотрено выполнение контрольной работы в 6 семестре для заочной формы обучения.

Примерная тематика контрольной работы:

1. Полупроводниковые приборы на основе классических гетероструктур.
2. Полупроводниковые приборы на основе гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ), квантовыми проволоками (КП), квантовыми точками (КТ) и сверхрешетками.

## 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 6 семестре для очной формы обучения, в 6 семестре для заочной формы обучения по двухбалльной системе:

«зачтено»

«не зачтено»

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Зачтено	Не зачтено
ПК-2	знать физические принципы работы, характеристики и параметры основных типов микроэлектронных приборов на гетеро-	Тест	Выполнение теста на 70 -	Вы-

	структурах; физические и математические модели процессов и явлений, лежащих в основе принципов действия микроэлектронных приборов на гетероструктурах;		100 %	не менее 70 %
	<b>уметь</b> 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	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	<b>владеть</b> навыками организации и проведения измерений электрических параметров и характеристик микроэлектронных приборов на гетероструктурах.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ПК-5	<b>знать</b> конструкции, параметры, основные эксплуатационные характеристики и области применения микроэлектронных приборов на гетероструктурах;	Тест	Выполнение теста на 70 - 100 %	Выполнение менее 70 %
	<b>уметь</b> 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;	Решение стандартных практических задач	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	<b>владеть</b> 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	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. полупрозрачный 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 нанoeлектронных 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  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при комнатной температуре.

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

3. Рассчитайте разрывы зон проводимости  $\Delta E_c$  и валентной зоны  $\Delta E_v$  а также диффузионный потенциал  $\phi_0$  для гетероперехода  $n$ -Si- $p$ -Ge. Постройте энергетическую диаграмму. Концентрацию мелких доноров в кремнии примите равной  $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , концентрацию мелких акцепторов в германии  $N_a = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

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<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>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 изменится 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:  $N_D = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_A = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_C = 4.7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_V = 7 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .

9. Диод из предыдущей задачи замените гетеропереходом между  $n$ -Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>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  $\Delta E_c$ .

10. Используя справочные данные, определите по обобщенному правилу Вегарда составы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ , которые без напряжений могут быть выращены на подложке  $\text{InP}$ .

#### 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 встроеном 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  $\delta$ -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 проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 10 вопросов и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, задача оценивается в 10 баллов (5 баллов верное решение и 5 баллов за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов – 20.

1. Оценка «не зачтено» ставится в случае, если студент набрал менее 6 баллов.

2. Оценка «зачтено» ставится в случае, если студент набрал от 6 до 20 баллов

При получении оценки «Зачтено» 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, контрольная работа, устный опрос

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

### **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 нанoeлектроники. – 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/>;
- Университетская библиотека онлайн: <http://biblioclub.ru/>;
- 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. Дисплейный класс** для проведения практических занятий и самостоятельной работы студентов, укомплектованный специализированной мебелью и оснащенный персональ-

ными 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: (Нб1/IntelCorei3/Кв/М/20" LCD);  
компьютер-сборка каф.7;  
компьютер-сборка каф.3;  
компьютер в составе: (Нб1/IntelCorei3/Кв/М/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 практические занятия, студентами заочной формы обучения выполняется контрольная работа.

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.

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. Освоение дисциплины оценивается на зачете.

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



	<p>ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удается разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.</p>
<p>Практические занятия</p>	<p>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.</p>
<p>Самостоятельная работа</p>	<p>Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций;</li> <li>- работа над темами для самостоятельного изучения;</li> <li>- участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;</li> <li>- подготовка к промежуточной аттестации.</li> </ul>
<p>Подготовка к промежуточной аттестации</p>	<p>Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начинаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.</p>

## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП
1	Актуализирован раздел 8.2: при осуществлении образовательного процесса по дисциплине используется образовательный портал ВГТУ – <a href="https://old.education.cchgeu.ru">https://old.education.cchgeu.ru</a>	31.08.2021	
2			
3			
4			