

**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 /  
27 сентября 2022 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА  
дисциплины  
«Электронная компонентная база  
микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»**

**Научная специальность:** 2.2.2 «Электронная компонентная база  
микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств»

**Нормативный период обучения** 4 года

**Год начала подготовки** 2022

Автор программы \_\_\_\_\_ В.Стр А.В. Строгонов

И.о. заведующего кафедрой  
полупроводниковой электроники  
и нанoeлектроники \_\_\_\_\_ В.Стр А.В. Строгонов

Руководитель  
программы аспирантуры \_\_\_\_\_ В.Стр А.В. Строгонов

**Воронеж 2022**

# 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

## 1.1. Цели дисциплины

– формирование у аспирантов знаний в области электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств; освоение современных методов аналитического и экспериментального исследования, используемых в данной области;

– формирование знаний по особенностям разработки, теоретическим и практическим вопросам расчета и проектирования интегральных микросхем, схемотехники различных видов микросхем, важнейшим аспектам разработки и автоматизации проектирования БИС, а также новым наиболее перспективным направлениям развития функциональной микроэлектроники;

– изучение физических основ элементов и приборов нанoeлектроники, принципов их построения, механизмов токопереноса, физических и технологических ограничений пределов уменьшения размеров, возможности увеличения частотного предела быстродействия.

– формирование у аспирантов научных основ для осознанного и целенаправленного использования физических свойств полупроводников при создании элементов, приборов и устройств микро и нанoeлектроники.

## 1.2. Задачи освоения дисциплины

– изучение основных понятий и представлений современной микро- и нанoeлектроники; получение знаний о физической сущности процессов и явлений, протекающих в системах микро- и нанoeлектроники; принципах функционирования основных приборов микро- и нанoeлектроники;

– формирование умения правильно использовать закономерности для реализации потенциальных возможностей материалов и структур при проектировании и создании систем микро- и нанoeлектроники;

– ознакомление с историей, достижениями и тенденциями развития микроэлектроники, многообразием различных классов интегральных микросхем (ИМС);

– ознакомление с физическими принципами работы, характеристиками и параметрами ИМС, моделями процессов и явлений, лежащих в основе работы ИМС;

– расширение научного кругозора и эрудиции на базе изучения законов физики низкоразмерных полупроводниковых структур для последующего использования их при создании приборов нанoeлектроники и в технологии микро- и нанoeлектроники.

– расширение научного кругозора и эрудиции аспирантов на базе изучения фундаментальных закономерностей физики полупроводников и освоение способов практического использования свойств полупроводниковых материалов;

– развитие понимания связи физических свойств полупроводников с параметрами изделий микроэлектроники, использующих различные полупроводниковые материалы;

– практическое овладение навыками физического эксперимента и основными методиками по изучению свойств полупроводников и приборную структуру на их основе;

– освоение навыков самостоятельной работы с литературой; методическими и аппаратными средствами реализации систем микро- и нанoeлектроники.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ**

Дисциплина «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» относится к Образовательному компоненту «Дисциплины (модули)» программы аспирантуры по научной специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

## **3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

В результате изучения дисциплины «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» аспирант должен:

### **знать:**

– физические принципы работы основных функциональных элементов нанoeлектроники; современные методы создания и исследования структур электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

– методы теоретических и экспериментальных исследований в области микро- и нанoeлектроники и квантовых устройств;

– новые методы исследования в области микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств;

– физические принципы работы, характеристики и параметры ИМС;

– физические модели процессов и явлений, лежащих в основе принципа действия ИМС;

### **уметь:**

– критически анализировать и оценивать современные научные достижения в области микро- и нанoeлектроники и квантовых устройств;

– применять навыки проектирования, расчета, моделирования и конструирования полупроводниковых приборов и интегральных устройств; применять методы диагностики для решения конкретных научных и технических задач при исследовании электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств;

– рассчитывать основные параметры структур электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств;

– определять основные параметры структур электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств из экспериментальных данных;

**владеть:**

- методами решения исследовательских и практических задач;
- данными о фундаментальных закономерностях физики полупроводников;
- навыками (опытом деятельности) использования экспериментальной техники для измерения параметров и характеристик электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств;
- навыками разработки моделей и методик проектирования, расчета, моделирования и конструирования электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств;
- методами исследования физических свойств наноструктур;
- методами теоретического анализа физических процессов нанoeлектроники.

**4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ**

Общая трудоемкость дисциплины «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» составляет 12 зачетных единиц.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры			
		5	6	7	
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	54	18	18	18	
В том числе:					
Лекции	54	18	18	18	
Практические занятия (ПЗ)	-	-	-	-	
<b>Самостоятельная работа</b>	342	90	90	162	
Контроль	36	-	-	36	
Вид промежуточной аттестации – экзамен		-	-	+	
<b>Общая трудоемкость</b>	час	432	108	108	216
	зач.ед.	12	3	3	6

**5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)****5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий**

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	СРС	Всего час
<b>5 семестр</b>					
1	Основные понятия микро- и нанoeлектроники	Микроэлектроника и нанoeлектроника, сравнительный анализ терминологии. Классификация элементов и приборов нанoeлектроники. Важнейшие эффекты и процессы, проявляющиеся в элементах нанoeлектроники. Размерные эффекты. Эффекты масштабирования. Физические ограничения нанoeлектроники. Фундаментальные ограничения на миниатюризацию элементов микроэлектроники и нанoeлектроники.	6	30	36

		Двумерный электронный газ. Квантовые ямы, периодические квантовые ямы. Полупроводниковые сверхрешетки, сверхрешетки полупроводник - диэлектрик, напряжённые сверхрешетки. Квантовые нити (провода). Вискеры. Квантовые точки.			
2	Элементы интегральных микросхем	Классификация микросхем по функциональным и конструкторско-технологическим признакам. Элементы и компоненты микросхем. Активные элементы интегральных микросхем. Особенности структуры биполярных транзисторов полупроводниковых микросхем. Диодные структуры в микроэлектронике. Транзисторные структуры специального назначения: многоэмиттерные и многоколлекторные транзисторы, транзисторы с диодом Шоттки. Конструктивные особенности МДП транзисторов интегральных микросхем. Пассивные элементы интегральных микросхем. Полупроводниковые и пленочные резисторы. Конденсаторы и индуктивные элементы	6	30	36
3	Биполярные интегральные схемы. Интегральные схемы на основе полевых транзисторов	Дифференциальные усилители. Операционные усилители. Интегральные аналоговые умножители, аналоговые коммутаторы и ключи, интегральные стабилизаторы напряжения. Основные характеристики, физические процессы и применение МОП ИС. Логика р-МОП. Основные уравнения р-МОП-транзистора. Логика п-МОП. Рабочие характеристики транзистора п-МОП в режиме обогащения. Основные уравнения транзистора типа п-МОП. Запоминающие устройства типа п-МОП. Логика КМОП. Характеристики КМОП-приборов. Сравнение структур КМОП и п-МОП. Приборы КМОП с кремниевыми затворами. Логические устройства типа КМОП-КНС и КМОП-КНД. Использование МОП-технологии в СБИС	6	30	36
<b>Всего за 5 семестр</b>			<b>18</b>	<b>90</b>	<b>108</b>
<b>6 семестр</b>					
4	Элементы микро- и нанoeлектроники на основе гетеропереходов	Зонная диаграмма изотипных и анизотипных гетероструктур. Выбор материалов для гетеропереходов. Элементы на основе гетеропереходов. Гетеротранзисторы на основе одинарного и множественных гетеропереходов. Характеристики и параметры биполярных гетеротранзисторов. Быстродействие гетеротранзисторов. Гетеротранзисторы на основе твердых растворов, обладающих повышенной подвижностью носителей зарядов. Преимущества и недостатки гетеротранзисторов.	6	30	36
5	Элементы с высокой подвижностью носителей зарядов	Элементы с напряженными полупроводниковыми нанослоями. СВЧ-элементы на основе твердого раствора кремния-германия. Транзистор с высокой подвижностью электронов (НЕМТ). НЕМТ, выполненные на основе твердых растворов полупроводниковых соединений. Мощные транзисторы на двумерном электронном газе. НЕМТ, выполненные на основе нитрида галлия и алмаза. Использование в НЕМТ дельта-легированных слоев.	6	30	36
6	Квантовая электроника	Направления и тенденции развития квантовой электроники. Усиление и генерация оптического излучения, методы создания инверсии. Резонаторы оптического диапазона. Активные среды лазеров. Общие особенности и характеристики лазерного излучения. Твердотельные лазеры, типы, особенности устройства, основные характеристики, области применения. Полупроводниковые лазеры, типы, особенности устройства, основные характеристики, области применения.	6	30	36
<b>Всего за 5 семестр</b>			<b>18</b>	<b>90</b>	<b>108</b>
<b>7 семестр</b>					
7	Квантоворазмерные структуры и их приборное применение.	Определения, физические свойства и применение квантовых точек, ям, проволок, полупроводниковых сверхрешеток и их комбинаций, структур с двумерным электронным газом, магнитных сверхрешеток; модели «мелкой» и «глубокой» (широкой) квантовых ям; квантование зонного электронного спектра; сверхрешетки и блоховские осцилляции; квантовый целочисленный и дробный эффекты Холла (дробные заряды и промежуточная статистика) в двумерном электронном газ; использование гигантского магниторезистивного эффекта для конструирования приборов нового поколения; основные положения теории «фазонов» и самоорганизации структур нанoeлектроники; возможности самосборки элементов устройств низкоразмерных полупроводниковых приборов.	6	54	60
8	Приборы нанoeлектроники	Гетероструктурные транзисторы. Аналоговые транзисторы. Транзисторы на квантовых эффектах. Одноэлектроника. Одноэлектронный транзистор. Электроника на основе эффекта Джозефсона. Элементы на основе фуллеренов и графенов. Графитовые нанотрубки и их применение в нанoeлектронике. Полимерные нанотранзисторы. Микромеханические транзисторы. Элементы нанoeлектроники, использующие эффект баллистического транспорта электронов. Элементы на основе резонансного туннелирования. Туннельный транзистор. Кулоновская блокада.	6	54	60
9	Направления и тенденции развития микро и нанoeлектроники	Полимерная электроника. Молекулярная электроника. Микросистемная техника. Логические микросхемы на базе неклассических КМОП-структур и новых логических технологий. Микросхемы памяти, формируемые в процессах КМОП-технологий и на базе других технологических платформ. Нанoeлектронные ключи. Атомные переключающие устройства. Элементы нанoeлектроники на основе отдельных атомов и молекул. Спинтроника. Гигантское магнитосопротивление. Магнитная память. Энергонезависимая память на спин-зависимом туннелирова-	6	54	60

	нии. Квантовые компьютеры. Принципы организации и функционирования. Кубиты. Элементы квантовых компьютеров.			
		<b>Всего за 7 семестр</b>	<b>18</b>	<b>162</b>
		<b>Контроль</b>		<b>36</b>
		<b>Итого</b>		<b>432</b>

## 6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА РЕФЕРАТОВ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» не предусматривает выполнение рефератов.

## 7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

### 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».

Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
Активная работа на лекциях, отвечает на теоретические вопросы	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
Решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

#### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 7 семестре по системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
Тест	Выполнение теста на 90 – 100 %	Выполнение теста на 80 – 90 %	Выполнение теста на 70 – 80 %	В тесте менее 70 % правильных ответов
Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

		во всех задачах		
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. Средняя интегральная микросхема (СИС) – это ИС, содержащая:
  - 1) свыше 100 до 1000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС и свыше 100 до 500 – для аналоговых (2..3 степень);
  - 2) до 100 элементов и (или) компонентов включительно (1..2 степень);
  - 3) свыше 1000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС и свыше 500 – для аналоговых ИС (3..4 степень).
  
2. В какой из перечисленных микросхем все элементы выполнены в объеме кристалла полупроводника?
  - 1) тонкопленочной;
  - 2) гибридной;
  - 3) полупроводниковой.
  
3. Большая интегральная микросхема (БИС) – это ИС, содержащая:
  - 1) свыше 100 до 1000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС и свыше 100 до 500 – для аналоговых (2..3 степень);
  - 2) до 100 элементов и (или) компонентов включительно (1..2 степень);
  - 3) свыше 1000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС и свыше 500 – для аналоговых ИС (3..4 степень).
  
4. В какой из перечисленных микросхем все элементы представляют собой пленки, нанесенные на диэлектрическое основание?
  - 1) тонкопленочной;
  - 2) гибридной;
  - 3) полупроводниковой
  
5. Сверхрешетка –
  - 1) это полупрозрачный диэлектрик с определенной периодической структурой и уникальными оптическими свойствами;
  - 2) это твердотельная периодическая структура, в которой на носители заряда наряду с потенциалом кристаллической решетки действует дополнительный встроенный потенциал;
  - 3) это фазы переменного состава, в которых атомы различных элементов расположены в общей кристаллической решётке.
  
6. Напряженная полупроводниковая структура представляет собой
  - 1) тонкий слой узкозонного полупроводника, помещенный в матрицу относительно широкозонного материала с меньшим параметром решетки и испытывающий сжимающие напряжения;

2) тонкий слой широкозонного полупроводника, помещенный в матрицу относительно узкозонного материала с меньшим параметром решетки и испытывающий сжимающие напряжения;

3) тонкий слой узкозонного полупроводника, помещенный в матрицу относительно широкозонного материала с большим параметром решетки и испытывающий сжимающие напряжения.

7. Туннельный эффект - это

1) явление, связанное с квантованием энергии носителей заряда, движение которых ограничено в одном, двух или трех направлениях;

2) квантовое явление, в котором на частицу с электрическим зарядом или магнитным моментом электромагнитное поле влияет даже в тех областях, где напряженность электрического поля и индукция магнитного поля равны нулю, но не равен нулю электромагнитный потенциал;

3) преодоление микрочастицей потенциального барьера в случае, когда её полная энергия, остающаяся при туннелировании неизменной, меньше высоты барьера.

8. Композиционная сверхрешетка – это сверхрешетка

1) с одним нанометровым измерением;

2) с переменным легированием, в которой периодичность параметров создается введением небольшого количества примеси в узкие, строго ограниченные части кристаллической структуры;

3) с переменным составом, в которых чередуются тонкие слои материалов различного состава.

9. Легированная сверхрешётка - это сверхрешетка

1) с переменным легированием, в которых периодичность параметров создается введением небольшого количества примеси в узкие, строго ограниченные части кристаллической структуры;

2) с одним нанометровым измерением;

3) с переменным составом, в которых чередуются тонкие слои материалов различного состава.

10. Структура обращенного НЕМТ - транзистора содержит

1) металлический контакт – широкозонный гетерослой AlGaAs, выполняющий роль подзатворного диэлектрика - узкозонный слой GaAs, в котором формируется канал;

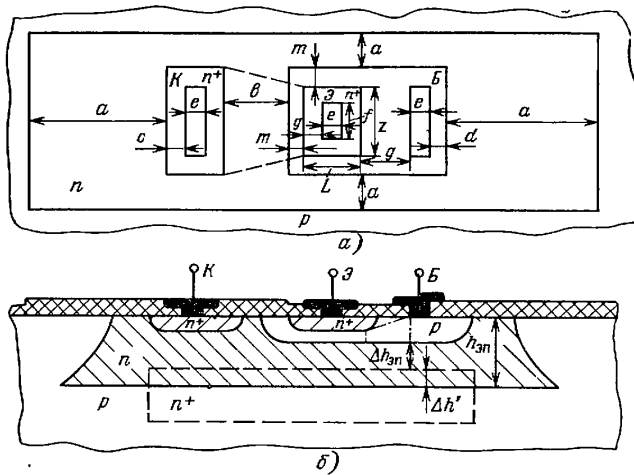
2) металлический контакт – нелегированный слой GaAs («подзатворный диэлектрик»), узкозонный слой GaAs, в котором формируется канал - широкозонный гетерослой AlGaAs;

3) металлический контакт – широкозонный гетерослой AlGaN, выполняющий роль подзатворного диэлектрика - узкозонный слой GaN, в котором формируется канал.

## 7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Рассчитать сопротивление тела коллектора при отсутствии и наличии скрытого  $n+$ -слоя. Будем полагать, что транзистор имеет структуру, показанную на рисунке при следующих значениях параметров:  $f = e = m = c = g = d = 4$  мкм,  $b = z = L = q = 12$  мкм;  $\Delta h_{эп} = 3$  мкм;  $\Delta h' = 3$  мкм;  $\rho_k = 0,5$  Ом·см; толщина скрытого  $n+$ -слоя 5 мкм, удельное сопротивление скрытого  $n+$ -слоя  $R_s = 10$  Ом/□; глубины залегания эмиттерного и коллекторного переходов равны 2 и 3 мкм соответственно. Будем считать боковые стенки диффузионных областей вертикальными.





Топология (а) и структура (б) интегрального биполярного транзистора

2. Масса одной углеродной нанотрубки составляет  $2.99 \cdot 10^{-19}$  г. Сколько атомов углерода входит в состав этой частицы?
3. Одноэлектронный транзистор, включающий в себя в качестве основного элемента конденсатор со структурой металл-диэлектрик-металл (МДМ), способен реагировать на туннелирование одного электрона, если емкость указанной структуры составляет  $10^{-18} - 10^{-19}$  Ф. Какова площадь обкладок конденсатора с диоксидом кремния  $\text{SiO}_2$  в качестве диэлектрика, если емкость составляет  $10^{-18}$  Ф при толщине диэлектрика, равной 10 нм.
4. Найдите емкость плоского конденсатора с диоксидом кремния ( $\text{SiO}_2$ ) в качестве диэлектрика, при толщине диэлектрика  $d = 1$  нм и обкладках, представляющих собой круги радиусом  $R_0 = 10$  нм. Диэлектрическую проницаемость  $\text{SiO}_2$   $\epsilon$  принять равной 2,825. Какую энергию имеет этот конденсатор, если зарядить его обкладки зарядами  $+e$  и  $-e$ , где  $e$  - заряд электрона. Считать, что заряды распределены по обкладкам равномерно, краевыми эффектами пренебречь.
5. Какую долю от населенности основного уровня составляет в равновесном состоянии населенность уровня с энергией 0,1 эВ при температуре 300 К (статистические веса принять равными единице)?
6. Какую энергию (в обратных сантиметрах) должен иметь энергетический уровень, чтобы его населенность составила 0,1 % населенности основного уровня (статистические веса принять равными единице)?
7. Верхний лазерный уровень в твердотельном лазере на стекле с неодимом имеет энергию около  $12000 \text{ см}^{-1}$ . Выразите эту энергию в электронвольтах.
8. Ненасыщенный показатель преломления рубинового лазера  $k_0 = 0,1 \text{ см}^{-1}$ , а длина активной среды  $l = 10$  см. Найдите условие для коэффициента обратной связи  $\beta$ , при котором возможна генерация.
9. Активная среда оптического квантового генератора имеет коэффициент квантового усиления  $g$  и коэффициент потерь  $k$ . Зеркала резонатора одинаковые с коэффициентом отражения  $r_{\text{отр}}$ . Вычислите отношение когерентной выходной мощности  $P_0$  к мощности  $P_k$ , поглощаемой в активном веществе, считая  $P_0 \sim g - k$  и  $P_k \sim k$ . Покажите, что при длине стержня активного вещества больше критической поглощаемая в образце мощность становится

больше мощности когерентного выходного излучения и в этом смысле оптический квантовый генератор становится неэффективным.

10. 7. 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  $\text{InP}$ .

### 7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

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

2. Рассчитайте для идеального гетероперехода  $n\text{-Si-p-Ge}$  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.

3. Используя правило Андерсона вычислите разрывы зоны проводимости и валентной зоны для гетероперехода: а)  $\text{GaAs-AlAs}$  и б)  $\text{InAs-GaSb}$ .

4. Используя правило Андерсона, нарисуйте зонную диаграмму при комнатной температуре для гетероструктуры  $p\text{-Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As} - n\text{-GaAs}$ . Какие типы зарядов, может захватывать данная структура на гетерогранице? Как изменится зонная диаграмма при приложении постоянного потенциала  $V$ ?

5. Схематически изобразите диаграмму  $p\text{-}n$  и  $n\text{-}p$ -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,  $\text{InAs-GaSb}$ )?

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

7. Диод из предыдущей задачи замените гетеропереходом между  $n\text{-Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  и  $p\text{-GaAs}$ . 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  $\text{GaAs}$  на  $\text{AlGaAs}$  на  $n$ -стороне сводится к увеличению контактной разности потенциалов на  $\Delta E_c$ .

8. Определите спектральный диапазон (или диапазон длин волн) работы фотоприемной матрицы на основе наногетероструктур для следующих параметров квантовых ям:  $E_{g1} = 1,43 \text{ эВ}$ ,  $E_{g2} = 1,78 \text{ эВ}$ ,  $E_1 = 0,05 \text{ эВ}$ ,  $E_2 = 0,175 \text{ эВ}$ , середины запрещенных зон полупроводниковых материалов, составляющих квантовую яму, совпадают.

9. Определите минимальную площадь фотоприемной матрицы инфракрасного (ИК) диапазона спектра для передачи изображения телевизионного стандарта. Чувствительным элементом матрицы является многослойная наногетероструктура, содержащая  $n = 50$  слоев квантовых

ям и два контактных слоя общей толщиной  $h_k = 2,67$  мкм. Считайте, что разделение фотоматрицы на элементы проводится с помощью изотропного травления. Минимально допустимые размеры поверхности чувствительного элемента  $d$  и окна для травления  $l$  составляют 1 мкм, толщины слоев узкозонного и широкозонного полупроводников, составляющих структуру квантовой ямы,  $h_y = 5$  нм и  $h_{ш} = 45$  нм соответственно, число строк изображения  $N = 600$ . Чувствительный элемент фотоматрицы имеет форму квадрата.

10. Определите долю мощности оптического излучения, поглощаемого в фотоприемнике на квантовых ямах. Излучение падает перпендикулярно к поверхности фотоприемника. Коэффициент поглощения излучения в узкозонном полупроводнике  $\alpha = 7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ , коэффициенты отражения от границ раздела узкозонного и широкозонного полупроводников  $R_1 = 0,01$ ,  $R_2 = 0,02$ , толщина слоя узкозонного полупроводника  $d = 5$  нм, число периодов фотоприемной структуры  $n = 50$ . Преобразовать ответ для  $R_1 = R_2 = 0$ . Объяснить полученный результат.

### 7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Не предусмотрено учебным планом.

### 7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену

1. Элементы и компоненты микросхем.
2. Классификация микросхем по функциональным и конструкторско-технологическим признакам.
3. Особенности структуры биполярных транзисторов полупроводниковых микросхем.
4. Диодные структуры в микроэлектронике.
5. Транзисторные структуры специального назначения: многоэмиттерные и многоколлекторные транзисторы, транзисторы с диодом Шотки.
6. Конструктивные особенности МДП транзисторов интегральных микросхем.
7. Структура и принцип действия транзисторных элементов памяти постоянных запоминающих устройств.
8. Приборы с зарядовой связью.
9. Пассивные элементы интегральных микросхем.
10. Полупроводниковые и пленочные резисторы.
11. Конденсаторы и индуктивные элементы.
12. Закон Мура. Понятие и законы масштабирования элементов микросхем.
13. Физические ограничения в микроэлектронике. Основные проблемы миниатюризации и особенности структуры современных субмикронных МДП транзисторов.
14. Транзисторы с управляющим переходом металл-полупроводник.
15. Функциональные возможности МДП и МЕР транзисторов в интегральных микросхемах.
16. Гетероструктуры в современной микроэлектронике.
17. Основные параметры и отличительные особенности гетеропереходов.
18. Зонная диаграмма изотипных и анизотипных гетероструктур.
19. Выбор материалов для гетеропереходов.
20. Сверхрешетки и приборы на их основе.
21. Явления сверхинжекции и образования двумерного электронного газа в гетеропереходе.
22. Гетеропереходные биполярные транзисторы.

23. Транзисторы с высокой подвижностью электронов: физические принципы работы и варианты конструкции. НЕМТ-структуры.
24. Энергетические состояния атомов, молекул и твердых тел. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными системами и твердыми телами.
25. Усиление и генерация оптического излучения.
26. Методы создания инверсии.
27. Резонаторы оптического диапазона.
28. Активные среды лазеров.
29. Общие особенности и характеристики лазерного излучения.
30. Твердотельные лазеры, типы, особенности устройства, основные характеристики, области применения.
31. Полупроводниковые лазеры, типы, особенности устройства, основные характеристики, области применения.
32. Полимерная электроника.
33. Молекулярная электроника.
34. Микросистемная техника.
35. Логические микросхемы на базе неклассических КМОП-структур и новых логических технологий.
36. Микросхемы памяти, формируемые в процессах КМОП-технологий и на базе других технологических платформ.
37. Физические свойства и применение квантовых точек, ям, проволок, полупроводниковых сверхрешеток и их комбинаций
38. Квантовый целочисленный и дробный эффекты Холла (дробные заряды и промежуточная статистика) в двумерном электронном газе
39. Использование гигантского магниторезистивного эффекта для конструирования приборов нового поколения;
40. Основные положения теории «фазонов» и самоорганизации структур нанoeлектроники.
41. Возможности самосборки элементов устройств низкоразмерных полупроводниковых приборов.
42. Гетероструктурные транзисторы.
43. Аналоговые транзисторы.
44. Транзисторы на квантовых эффектах.
45. Одноэлектроника.
46. Углеродные нанотрубки.
47. Спинтроника.
48. Электроника на основе эффекта Джозефсона.

### **7.2.6 Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации**

Экзамен 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 «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 6 баллов.

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 6 до 10 баллов
3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 11 до 15 баллов.
4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 16 до 20 баллов.

### 7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Наименование оценочного средства
1	Основные понятия микро- и наноэлектроники	Тест, устный опрос
2	Элементы интегральных микросхем	Тест, устный опрос
3	Биполярные интегральные схемы. Интегральные схемы на основе полевых транзисторов	Тест, устный опрос
4	Элементы микро- и наноэлектроники на основе гетеропереходов	Тест, устный опрос
5	Элементы с высокой подвижностью носителей зарядов	Тест, устный опрос
6	Квантовая электроника	Тест, устный опрос
7	Квантоворазмерные структуры и их приборное применение	Тест, устный опрос
8	Приборы наноэлектроники	Тест, устный опрос
9	Направления и тенденции развития микро и наноэлектроники	Тест, 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 экзаменатором 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 экзаменатором 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 экзаменатором 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. **Смирнов Ю.А.** Основы нано- и функциональной электроники: Учеб. пособие / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. - 2-е изд., испр. - СПб. : Лань, 2013. - 320 : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1378-2
2. **Смирнов Ю.А.** Основы нано- и функциональной электроники [Электронный ресурс] / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. - 2-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2021. - 320 с. - Книга из коллекции Лань - Инженерно-технические науки. - ISBN 978-5-8114-1378-2. URL: <https://e.lanbook.com/book/168521>
3. **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
4. **Ефимов И.Е.** Основы микроэлектроники [Электронный ресурс] / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь. - 3-е изд. – СПб.: Лань, 2021. - 384 с. - Книга из коллекции Лань - Инженерно-технические науки. - ISBN 978-5-8114-0866-5. URL: <https://e.lanbook.com/book/167727>
5. **Смирнов Ю.А.** Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники [Текст] : учеб. пособие \ Ю.А. Смирнов. - 2-е изд., испр. - СПб.; М.; Краснодар : Лань, 2013 (Чехов : Первая Образцовая тип., фил. "Чеховский Печатный Двор", 2013). - 495 с. : ил. - Библиогр. в конце глав. - ISBN 978-5-8114-1379-9
6. **Смирнов Ю.А.** Основы микроэлектроники и микропроцессорной техники [Электронный ресурс] / Ю.А. Смирнов, С.В. Соколов, Е.В. Титов. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург : 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. **Лазеры: применения и приложения** [Электронный ресурс] / А.С. Борейшо, В.А. Борейшо, И.М. Евдокимов, С.В. Ивакин – СПб.: Лань, 2021. - 520 с. - Книга из коллекции Лань - Инженерно-технические науки. - ISBN 978-5-8114-2234-0. URL: <https://e.lanbook.com/book/168977>
8. **Петров К.С.** Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учеб. пособие. - СПб. : Питер, 2006. - 522 с. : ил. - ISBN 5-94723-378-9

### Дополнительная литература

9. **Дробот П.Н.** Нанoeлектроника [Электронный ресурс] : учеб. пособие / П.Н. Дробот. - Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2016. - 286 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/72141.html>
10. **Драгунов В.П.** Микро- и нанoeлектроника [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.П. Драгунов; Д.И. Остертак. - Новосибирск : НГТУ, 2012. - 38 с. - ISBN 978-5-7782-2095-9. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=228941>
11. **Липатов Г.И.** Компоненты микросистемной техники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Г.И. Липатов. - ФГБОУ ВО "Воронеж. гос. техн. ун-т", каф. полупроводниковой электроники и нанoeлектроники. - Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2019. - Электрон. текстовые и граф. данные (4,2 Мб) : ил. : табл. - Библиогр.: 4 назв. - ISBN 978-5-7731-0799-6.
12. **Свистова Т.В.** Основы микроэлектроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Т.В. Свистова. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГТУ», 2017. – 147 с.
13. **Рембеза С.И.** Введение в микроэлектронику и нанoeлектронику [Электронный ресурс]: учеб. пособие / С.И. Рембеза, Е.С. Рембеза. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГТУ», 2017. – 143 с.
14. **Рембеза С.И.** Низкоразмерные структуры для микро- и нанoeлектроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / С.И. Рембеза, Е.С. Рембеза, Н.Н. Кошелева. – Электрон. текстовые, граф. дан. ( 6,2 Мб ). – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2015.
15. **Свистова Т.В.** Функциональная электроника [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Т.В. Свистова. – Электрон. текстовые, граф. дан. (3,2 Мб ). – Воронеж : ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2014.

16. **Свистова Т.В.** Методы исследования материалов и структур электроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Т.В. Свистова. – Электрон. текстовые, граф. дан. (10,8 Мб). – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2013.
17. **Митрохин В.И.** Акустооптические свойства полупроводников с глубокими примесными центрами [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.И. Митрохин. – Воронеж: ГОУВПО «ВГТУ», 2009.
18. **Митрохин В.И.** Релаксационные и резонансные методы исследования дефектов в твердых телах [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.И. Митрохин. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2004.
19. **Балашов Ю.С.** Физические основы функционирования интегральных устройств микроэлектроники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю.С. Балашов, М.И. Горлов, Р.Т. Чермошценцев, Е.Т. Чермошценцева. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2003.

## **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», код доступа: <http://bibl.cchgeu.ru/provision/struct/>;
- Университетская библиотека онлайн, код доступа: <http://biblioclub.ru/>;
- ЭБС Издательства «ЛАНЬ» в том числе к коллекциям «Инженерно-технические науки», «Физика», код доступа <http://e.lanbook.com/>;
- ЭБС IPRbooks, код доступа: <http://www.iprbookshop.ru/>;
- научная электронная библиотека eLIBRARY.RU, код доступа: <http://elibrary.ru/>.

### **Информационные справочные системы:**

- портал федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования, код доступа <http://fgosvo.ru/>;
- единое окно доступа к образовательным ресурсам, код доступа <http://window.edu.ru/>;
- открытый образовательный ресурс НИЯУ МИФИ, код доступа <http://online.mephi.ru/>;
- открытое образование, код доступа: <https://openedu.ru/>;
- физический информационный портал, код доступа: <http://phys-portal.ru/index.html>
- Профессиональные справочные системы «Техэксперт»: <https://cntd.ru>
- Электронная информационная образовательная среда ВГТУ <https://old.education.cchgeu.ru>
- Лаборатории электронных средств обучения, ЛЭСО ГОУ ВПО «СибГУТИ» [www.labfor.ru](http://www.labfor.ru)

## 9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

1. **Лекционная аудитория** 205/4, 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).

2. **Дисплейный класс** для проведения самостоятельной работы студентов, укомплектованный специализированной мебелью и оснащенный персональными компьютерами (17 штук) 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).

## 10 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

По дисциплине «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» читаются лекции, выполняется самостоятельная работа.

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

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

Контроль усвоения материала дисциплины производится путем проведения тестирования и устного опроса. Освоение дисциплины оценивается на экзамене.

Вид учебных занятий	Деятельность обучающегося
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометить 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 удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: <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>
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 экзаменом 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			
2			
3			
4			