

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

Декан факультета радиотехники
и электроники

31 августа 2021 г.



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 2020

Автор программы

A

С.А. Акулинин

И.о. заведующего кафедрой
полупроводниковой электроники
и наноэлектроники

Bump

А.В. Строгонов

Руководитель ОПОП

[Handwritten signature]

А.В. Арсентьев

Воронеж 2021

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели дисциплины: углубление фундаментальной подготовки в области физики твердого тела, позволяющей будущим специалистам использовать физические принципы и законы, а также результаты физических открытий для создания новых твердотельных приборов и устройств.

1.2. Задачи освоения дисциплины:

– овладение фундаментальными принципами и методами решения научно-технических задач;

– освоение основных положений квантовой механики, квантовой статистики, характеризующих свойства твердых тел;

– формирование навыков применения теорий к грамотному анализу экспериментальных и теоретических результатов, с которыми бакалавру придется сталкиваться при решении перспективных и практических задач создания новых приборов и устройств.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина Б1.В.01 «Спецглавы физики» относится к дисциплинам части блока Б1 учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Спецглавы физики» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-7: способность идентифицировать новые области исследований, новые проблемы в сфере физики, проектирования, технологии изготовления и применения микроэлектронных приборов и устройств.

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-7	знать основные положения квантовой теории твердых тел; спектр колебаний атомов кристаллической решетки, зонная теория, движение электронов в твердых телах эффективная масса; основные положения квантовой статистики;
	уметь применять методы квантовой статистики для расчета концентрации свободных носителей и электропроводности твердых тел;
	владеть навыками применения основных методов физико-математического анализа для решения естественно-научных задач; навыками проведения экспериментальных исследований, обработки и интерпретации результатов эксперимента; навыками исполь-

	зования физико-математического моделирования в практической деятельности.
--	---

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Общая трудоемкость дисциплины «Спецглавы физики» составляет 3 зачетные единицы.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий

Очная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		4
Аудиторные занятия (всего)	32	32
В том числе:		
Лекции	16	16
Лабораторные работы (ЛР)	16	16
Самостоятельная работа	76	76
Вид промежуточной аттестации - зачет	+	+
Общая трудоемкость	час	108
	зач. ед.	3

Заочная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры
		4
Аудиторные занятия (всего)	8	8
В том числе:		
Лекции	4	4
Лабораторные работы (ЛР)	4	4
Самостоятельная работа	96	96
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	Лаб. раб.	СРС	Всего час
1	Общие сведения о квантовых статистиках	Фазовое пространство. Число состояний. Квантовые системы из одинаковых частиц Принцип тождественности одинаковых микро-частиц. Симметричные и несимметричные состояния. Вырожденные и невырожденные системы частиц	2	2	9	13
2	Функции распределения в квантовой статистике	Функции распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Бозоны и фермионы. Плотность числа квантовых состояний. Энергия Ферми	2	2	9	13
3	Нормальные колебания решетки	Акустические и оптические колебания атомов кристаллической решетки. Понятие о фононах. Температура Дебая. Теплоемкость кристалла при низких и высоких температурах.	2	2	9	13
4	Квантовая теория свободных электронов в металлах	Распределение Ферми-Дирака для вырожденного электронного газа в металлах. Теплоемкость электронного газа.	2	2	9	13
5	Элементы зонной теории твердых тел	Волновая функция электрона в пространственно периодическом поле. (приближение слабой связи) Энергетические зоны в кристаллах. Зонные модели металлов, диэлектриков, полупроводников. Квазичастицы электроны и дырки.	2	2	10	14
6	Понятие о квантовой теории электропроводности металлов	Электропроводность металлов. Эффективная масса. Подвижность носителей заряда. Сверхпроводимость, Эффект Мейснера. Высокотемпературная сверхпроводимость. Эффект Джозефсона.	2	2	10	14
7	Собственные полупроводники	Равновесная концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике. Уровень Ферми в собственных Зависимость электропроводности собственного полупроводника от температуры.	2	2	10	14
8	Примесные полупроводники	Донорные и акцепторные примеси и уровни. Основные и неосновные носители заряда. Равновесные концентрации электронов и дырок в примесных полупроводниках. Уровень Ферми в собственных и примесных полупроводниках.	2	2	10	14
Итого			16	16	76	108

заочная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Лаб. раб.	СРС	Всего час
1	Общие сведения о квантовых статистиках	Фазовое пространство. Число состояний. Квантовые системы из одинаковых частиц Принцип тождественности одинаковых микро-частиц. Симметричные и несимметричные состояния. Вырожденные и невырожденные системы частиц	1	-	12	13
2	Функции распределения в квантовой статистике	Функции распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Бозоны и фермионы. Плотность числа квантовых состояний. Энергия Ферми	1	-	12	13
3	Нормальные колебания решетки	Акустические и оптические колебания атомов кристаллической решетки. Понятие о фононах. Температура Дебая. Теплоемкость кристалла при низких и высоких температурах.	1	-	12	13
4	Квантовая теория свободных электронов в металлах	Распределение Ферми-Дирака для вырожденного электронного газа в металлах. Теплоемкость электронного газа.	1	-	12	13
5	Элементы зонной теории твердых тел	Волновая функция электрона в пространственно периодическом поле. (приближение слабой связи) Энергетические зоны в кристаллах. Зонные модели металлов, диэлектриков, полупроводников. Квазичастицы электроны и дырки.	-	-	12	12
6	Понятие о квантовой теории электропроводности металлов	Электропроводность металлов. Эффективная масса. Подвижность носителей заряда. Сверхпроводимость, Эффект Мейснера. Высокотемпературная сверхпроводимость. Эффект Джозефсона.	-	-	12	12
7	Собственные полупроводники	Равновесная концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике. Уровень Ферми в собственных Зависимость электропроводности собственного полупроводника от температуры.	-	2	12	14
8	Примесные полупроводники	Донорные и акцепторные примеси и уровни. Основные и неосновные носители заряда. Равновесные концентрации электронов и дырок в примесных полупроводниках. Уровень Ферми в собственных и примесных полупроводниках.	-	2	12	14
Всего			4	4	96	104
Контроль						4
Итого						108

5.2 Перечень лабораторных работ

1. Определение энергии активации примеси в полупроводнике
2. Изучение механизма излучения в полупроводниках
3. Изучение фотопроводимости полупроводников
4. Измерение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках методом эффекта Холла.

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

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины «Спецглавы физики» 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-7	знать основные положения квантовой теории твердых тел; спектр колебаний атомов кристаллической решетки, зонная теория, движение электронов в твердых телах эффективная масса; основные положения квантовой статистики;	Успешное выполнение лабораторных работ	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	уметь применять методы квантовой статистики для расчета концентрации свободных носителей и электропроводности твердых тел;	Решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть навыками применения основных методов физико-математического анализа для решения естественно-научных задач; навыками проведения экспериментальных исследований, обработки и интерпретации результатов эксперимента; навыками использования физико-математического моделирования в практической деятельности.	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 4 семестре для очной формы обучения, в 4 семестре для заочной формы обучения по двухбалльной системе:

«зачтено»

«не зачтено»

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Зачтено	Не зачтено
ПК-7	знать основные положения квантовой теории твердых тел; спектр колебаний атомов кристаллической решетки, зонная теория, движение электронов в твердых телах эффективная масса; основные положения квантовой статистики;	Тест	Выполнение теста на 70 – 100 %	Выполнение менее 70 %
	уметь применять методы квантовой статистики для расчета концентрации свободных носителей и электропроводности твердых тел;	Решение стандартных практических задач	Продemonстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть навыками применения основных методов физико-математического анализа для решения естественно-научных задач; навыками проведения экспериментальных исследований, обработки и интерпретации результатов эксперимента; навыками использования физико-математического моделирования в практической деятельности.	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Продemonстрирован 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. Известно, что удельное сопротивление полупроводников определяется формулой:

$$\rho = \frac{1}{en\mu}.$$

Непосредственно из измерений удельного сопротивления нельзя рассчитать концентрацию свободных носителей n и подвижность μ . Укажите, какой дополнительный эффект (явление) необходимо измерить для оценки μ и n :

- а) эффект Пельтье;
- б) эффект термоэдс;
- в) эффект Холла.

2. Концентрация свободных носителей в полупроводнике определяется межзонными переходами и ионизацией примесных уровней. В какой области температур сохраняется понятие полупроводник n -типа, p -типа:

- а) в области частичной ионизации примесей;
- б) в области полной ионизации примесей;
- в) в области собственной проводимости.

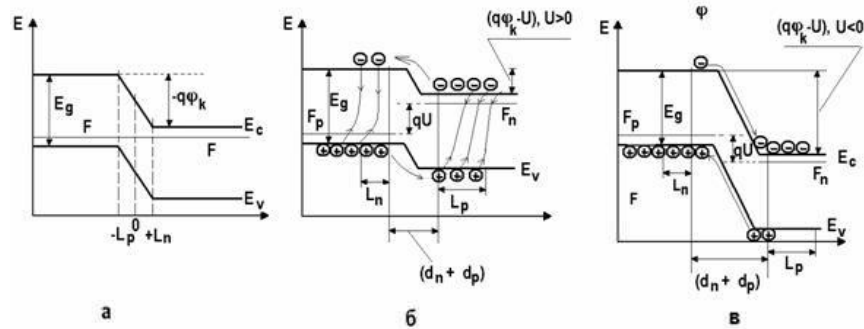
3. Подвижность носителей заряда может быть представлена формулой:

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*}$$

Какие процессы определяют параметр время релаксации:

- рассеивание на ионизированных примесях;
- рассеивание на колебаниях решетки;
- захват на ловушечные центры;
- все перечисленные механизмы.

4. На рис. 1а представлена энергетическая диаграмм р-п перехода в равновесии, при прямом и обратном смещении.



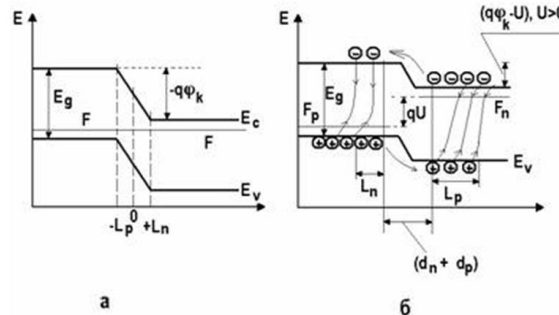
Какие параметры полупроводников определяют высоту потенциального барьера в состоянии равновесия:

- концентрации примесей акцепторов и доноров в р и п областях полупроводников;
- диффузионная длина электронов и дырок в полупроводниках;
- время жизни неосновных носителей заряда.

5. Как изменится высота потенциального барьера при прямом смещении:

- увеличится;
- уменьшится;
- останется без изменений.

6. На рис. 1а представлена энергетическая диаграмм р-п перехода в равновесии.



Какое смещение приложено к р-п переходу на рис 1б?

- прямое смещение;
- обратное смещение.

7. Как изменится высота потенциального барьера при обратном смещении:

- увеличится;
- уменьшится;
- останется без изменений.

8. При введении в полупроводник n-типа с концентрацией носителей $n = N_d$ акцепторной примеси с концентраций N_a концентрация электронов:

- не изменится;
- увеличится;
- уменьшится на величину N_a .

9. В сильных электрических полях дрейфовая скорость электронов становится сравнимой с тепловой скоростью. Какой эффект наблюдается при этом?

- а) сверхпроводимость;
- б) разогрев электронного газа;
- в) эффект Холла.

10. В сильнолегированном полупроводнике состояние свободных носителей вырождено и уровень Ферми находится в разрешенных зонах. В каких приборах применяется р-п переход на вырожденных полупроводниках:

- а) выпрямительный диод;
- б) туннельный диод;
- в) полупроводниковый лазер.

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

1. Образец кремния *n*-типа, находящийся в состоянии термодинамического равновесия при температуре 300 К, характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление 5 Ом·см; подвижность электронов 1600 см²/В·с; подвижность дырок 600 см²/В·с; собственная концентрация носителей $1,4 \cdot 10^{10}$ см⁻³; эффективная плотность уровней в зоне проводимости 10^{19} см⁻³. Известно, что $E_c - E_d = 50$ мэВ. Определите:

- а) концентрацию электронов и дырок;
- б) положение уровня Ферми;
- в) вероятность событий, состоящих в том, что донорный уровень занят и свободен.

2. Процесс инжекции носителей приводит к разделению квазиуровней Ферми, относящихся к электронам и дыркам. Покажите, что при нарушении термодинамического равновесия произведение концентраций носителей остается тем же, что и в равновесном состоянии, если вместо ширины запрещенной зоны E_g использовать параметр $E_g - (E_{Fn} - E_{Fp})$.

3. Пусть градиент потенциала в образце кремния собственной проводимости оставляет 400 В/м, а подвижность электронов и дырок равны 0,12 и 0,025 м²/В·с соответственно. Определите для этого образца:

- а) скорости дрейфа электронов и дырок;
- б) удельное сопротивление кремния собственной проводимости, полагая, что концентрация собственных носителей тока $2,5 \cdot 10^{16}$ м⁻³;
- в) полный дрейфовый ток, если площадь поперечного сечения образца равна $3 \cdot 10^{-6}$ м².

4. Покажите, что проводимости материала *n*- и *p*-типа определяются приближенными выражениями

$$\sigma_n = eN_d\mu_n \quad \text{и} \quad \sigma_p = eN_a\mu_p,$$

где N_d и N_a – концентрации доноров и акцепторов (м⁻³).

5. Имеется образец кремния *p*-типа длиной 5 мм, шириной 2 мм и толщиной 1 мм. Вычислите концентрацию примеси в образце, если электрическое сопротивление образца 100 Ом. Подвижность электронов и дырок равны 0,12 и 0,025 м²/В·с, а концентрация собственных носителей $2,5 \cdot 10^{16}$ м⁻³. Определите отношение электронной проводимости к дырочной.

6. Чистый кристаллический германий содержит $4,5 \cdot 10^{28}$ атомов/м³. При температуре 300 К один атом из каждых $2 \cdot 10^9$ атомов ионизирован. Подвижность электронов и дырок при этой температуре равны 0,4 и 0,2 м²/В·с. Определите проводимость чистого германия. Определите проводимость при 300 К германия, легированного элементом III группы, причем на каждые 10^7 атомов германия приходится 1 примесный атом.

7. Пластина из германия *n*-типа имеет удельное сопротивление $\rho = 0,1$ Ом·см и ширину $d = 10^{-2}$ см. К пластине приложена разность потенциалов $U = 1$ В. Вычислите:

- а) плотность тока;
- б) время, которое потребуется для того, чтобы носитель заряда пересек пластину;
- в) отношение плотностей токов дырок и электронов.

Положите, что $\mu_n = 3900$ см²/В·с; $\mu_p = 1900$ см²/В·с; $n_i = 2,4 \cdot 10^{13}$ см⁻³.

8. Имеется *p-n*-переход, в котором концентрация примеси в дырочной области больше концентрации примеси в электронной области; *p*-область перехода имеет удельное сопротивление 0,013 Ом·см; *n*-область – 44,5 Ом·см. Подвижность дырок $\mu_p = 480$ см²/В·с, электронов – 1400 см²/В·с. Концентрация собственных носителей составляет $1,6 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Найдите контактную разность потенциалов.

9. Определите толщину германиевого электронно-дырочного перехода, сформированного методом сплавления акцепторной примеси в полупроводник *n*-типа с концентрацией доноров 10^{15} см⁻³. Обратное напряжение на переходе – 100 В; относительная диэлектрическая проницаемость германия – 16. Концентрация акцепторов в рекристаллизованной области – 10^{19} см⁻³.

10. Какая часть резкого электронно-дырочного перехода расположена в базе диода, если концентрации примесей в прилегающих областях различаются на 4 порядка?

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

1. Вычислите значение контактной разности потенциалов на электронно-дырочном переходе, сформированном в кристалле германия с концентрацией доноров 10^{16} см⁻³, путем сплавления акцепторов с концентрацией 10^{18} см⁻³. Собственная концентрация носителей заряда в германии 10^{13} см⁻³.

2. Удельная проводимость *p*-области полупроводникового диода равна $\sigma_p = 100$ Ом⁻¹·см⁻¹; *n*-области $\sigma_n = 1$ Ом⁻¹·см⁻¹; поперечное сечение $0,5 \times 1$ мм²; длина диода 2 мм. Переход находится посередине. Тепловой ток составляет 5 мкА при 300 К. Вычислить напряжения, при которых ток диода будет равен 1 и 10 мА. Уточнить результаты, учтя падение напряжения на объемных сопротивлениях *p*- и *n*-областей.

3. Найти тепловой ток для германиевого плоскостного диода при комнатной температуре (300 К), если площадь поперечного сечения $S = 4$ мм²; $\sigma_p = 1$ Сим/см; $\sigma_n = 1$ Сим/см; $L_p = L_n = 0,15$ см. Концентрация собственных носителей $n_i = 2,5 \cdot 10^{13}$ см⁻³; подвижность электронов $\mu_n = 3900$ см²/В·с; подвижность дырок $\mu_p = 1900$ см²/В·с.

4. Некоторый диод имеет тепловой ток $I_s = 10$ мкА, приложенное к диоду напряжение равно 0,5 В. Пользуясь упрощенным уравнением ВАХ диода, найти отношение прямого тока к обратному при комнатной температуре.

5. Имеется кремниевый диод со следующими параметрами: $N_a = 9 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $N_d = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $S = 10^{-3} \text{ м}^2$; $\mu_p = 0,03 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\mu_n = 0,05 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ мкс}$; $T = 300 \text{ К}$; $n_i = 1,48 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Найти связь между током и напряжением.
6. Имеется идеальный p - n -переход при температуре 300 К. Требуется определить:
- какое прямое смещение необходимо, чтобы получить прямой ток, равный тепловому току I_S ;
 - какое прямое смещение необходимо для получения тока, в 100 раз большего, чем тепловой ток I_S .
7. Для идеального p - n -перехода требуется определить:
- при каком напряжении обратный ток будет достигать 90 % величины теплового тока при комнатной температуре;
 - отношение тока при прямом напряжении $U_{np} = 0,05 \text{ В}$ к току для той же самой величины обратного напряжения.
8. Имеется планарный p - n -переход, выполненный из кремния: $\rho_n = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $\tau_p = 1 \text{ мкс}$ в n -области и $\rho_p = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $\tau_n = 5 \text{ мкс}$ в p -области. Найти:
- отношение дырочного тока к электронному;
 - плотность тока, протекающего через прямой переход при прямом смещении 0,3 В.
- Учесть, что собственная концентрация носителей $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$; подвижности $\mu_n = 1400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\mu_p = 500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.
9. В идеальном p - n -переходе при температуре 300 К прямое смещение в 0,1 В вызывает определенный ток носителей заряда. Какое необходимо прямое смещение, чтобы ток увеличился в 2 раза?
10. В собственном полупроводнике (Si) с концентрацией свободных носителей $n_i^2 = p_i^2 = 1,2 \cdot 10^{32} \text{ м}^{-6}$ ($T = 300 \text{ К}$) ввели доноры с концентрацией $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Примесь считать полностью ионизированной. Межзонными переходами пренебречь. Найти концентрации электронов n и дырок p .

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

- Фазовое пространство. Число состояний.
- Квантовые системы из одинаковых частиц
- Принцип тождественности одинаковых микрочастиц.
- Симметричные и несимметричные состояния.
- Вырожденные и невырожденные системы частиц
- Плотность числа квантовых состояний. Энергия Ферми
- Нормальные колебания решетки
- Акустические и оптические колебания атомов кристаллической решетке.
- Функции распределения в квантовой статистике
- Функции распределения Ферми-Дирака и Бозе-Энштейна.
- Температура Дебая. Теплоемкость кристалла при низких и высоких температурах.
- Квантовая теория свободных электронов в металлах.
- Распределение Ферми-Дирака для вырожденного электронного газа в металлах.

- 14.Теплоемкость электронного газа.
- 15.Бозоны и фермионы.
- 16.Классическая теория электропроводности.
- 17.Модель свободных электронов.
- 18.Тепловая и дрейфовая скорости.
- 19.Понятие времени релаксации и подвижности носителей заряда. Ограничение модели.
- 20.Вырождение электронной теплоемкости.
- 21.Модель Зоммерфельда. Недостатки модели.
- 22.Квантовая теория полупроводников.
- 23.Электроны в идеальном кристалле.
- 24.Уравнение Шредингера.
- 25.Собственные функции и собственные значения энергии.
- 26.Квантовая теория полупроводников. Адиабатическое приближение.
- 27.Квантовая теория полупроводников. Одноэлектронное приближение.
- 28.Приближение свободных электронов.
- 29.Приближение сильной связи.
- 30.Модель Кронига-Пенни.
- 31.Зонная структура полупроводников.
- 32.Зависимость энергии электрона от волнового вектора.
- 33.Понятие Зоны Бриллюэна.
- 34.Энергетическая структура кремния.
- 35.Энергетическая структура германия.
- 36.Движение электронов в кристаллической решетке.
- 37.Понятие эффективная масса
- 38.Акустические и оптические колебания атомов кристаллической решетки.
- 39.Теплоемкость кристалла при низких и высоких температурах
- 40.Статистика электронов и дырок в полупроводниках.
- 41.Плотность состояний в пространстве импульсов и в энергетическом пространстве.
- 42.Функция распределения Ферми-Дирака.
- 43.Расчет концентрации свободных носителей.
- 44.Вырожденные и невырожденные системы частиц. Интеграл Ферми.
- 45.Собственный полупроводник. Температурная зависимость концентрации свободных носителей и уровня Ферми. Невырожденный случай.
- 46.Примесный полупроводник. Температурная зависимость концентрации свободных носителей и уровня Ферми. Невырожденный случай.
- 47.Компенсированный полупроводник. Температурная зависимость концентрации свободных носителей и уровня Ферми. Невырожденный случай.
- 48.Сильнолегированные полупроводники и полуметаллы. Температурная зависимость концентрации свободных носителей и уровня Ферми.
- 49.Контактные явления в полупроводниках. Р-n переход.
- 50.Энергетическая диаграмма в равновесии, при прямом и обратном смещении. ВАХ р-n перехода.

7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену

Не предусмотрено учебным планом.

7.2.6 Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 5 вопросов и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, задача оценивается в 5 баллов. Максимальное количество набранных баллов – 10.

1. Оценка «Не зачтено» ставится в случае, если студент набрал менее 7 баллов.

2. Оценка «Зачтено» ставится в случае, если студент набрал от 7 до 10 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	Общие сведения о квантовых статистиках	ПК-7	Тест, защита лабораторных работ
2	Функции распределения в квантовой статистике	ПК-7	Тест, защита лабораторных работ
3	Нормальные колебания решетки	ПК-7	Тест, защита лабораторных работ
4	Квантовая теория свободных электронов в металлах	ПК-7	Тест, защита лабораторных работ
5	Элементы зонной теории твердых тел	ПК-7	Тест, защита лабораторных работ
6	Понятие о квантовой теории электропроводности металлов	ПК-7	Тест, защита лабораторных работ
7	Собственные полупроводники	ПК-7	Тест, защита лабораторных работ
8	Примесные полупроводники	ПК-7	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 бу-

мажном 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. **Савельев И.В.** Курс общей физики : в 3 т.: учеб. пособие. Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И.В. Савельев. - СПб. : Лань, 2007. - 320 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0629-6; 978-5-8114-0632-6

2. **Ландау Л.Д.** Теоретическая физика : В 10 т.: учеб. пособие. Т. V; Ч. 1. Статистическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц; под ред. Л.П. Питаевского. - 5-е изд., стереотип. - М.: Физматлит, 2002. - 616 с. - ISBN 5-9221-0053-X. - ISBN 5-9221-0054-8

3. **Иродов И.Е.** Квантовая физика: Основные законы: учеб. пособие / И.Е. Иродов. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. - 272 с. - ISBN 5-93208-055-8

4. **Шушлебин И.М.** Избранные главы теоретической физики: статистическая физика [Электронный ресурс]: учеб. пособие / И.М. Шушлебин, Л.И. Янченко. - Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2019. - 90 с. - Гарантированный срок размещения в ЭБС до 01.03.2025. - ISBN 978-5-7731-0767-5. URL: <http://www.iprbookshop.ru/93257.html>

5. **Основы квантовой статистики и физики твердого тела** [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Г. Москаленко, М.Н. Гаршина, Е.П. Татьяна. - ФГБОУ ВО «Воронеж. гос. техн. ун-т», каф. физики. - Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. – 109 с.

Дополнительная литература

6. **Рембеза С.И.** Физика твердого тела : учеб. пособие. Ч.1 / С.И. Рембеза. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. – 207 с.

7. **Рембеза С.И.** Физика твердого тела : учеб. пособие. Ч.2 / С.И. Рембеза. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. - 137 с.

8. **Епифанов Г.И.** Физика твердого тела: учеб. пособие / Г.И. Епифанов. - 4-е изд., стереотип. - СПб.: Лань, 2011. - 288 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1001-9

9. **Рембеза Е.С.** Квантовая, атомная и ядерная физика [Электронный ресурс]: курс лекций: учеб. пособие / Е.С. Рембеза, В.С. Железный, А.А. Косякова. - Электрон. текстовые, граф. дан. (3,95 Мб). - Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011.

10. **Вильф Ф.Ж.** Опусы теоретической физики (Opera postuma) [Электронный ресурс] / Ф.Ж. Вильф. – М.: Когито-Центр, 2010. - 688 с. - ISBN 978-5-89353-301-9. URL: <http://www.iprbookshop.ru/15562.html>

11. **Евсюков В.А.** Практика решения задач по физике [Электронный ресурс]: учеб. пособие. Ч.5 :Квантовая физика. - Электрон. текстовые, граф. дан. (2,8 Мб). - Воронеж:

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013.

12. **Методические указания** к лабораторным работам по квантовой физике по дисциплине «Физика» для студентов всех специальностей очной формы обучения / Учебно-лабораторный центр кафедр общей физики; Сост.: А.Г. Москаленко, А.Д. Груздев, О.С.Хабарова, Е.П. Татьяна. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. - 44 с. (№ 210-2010)

13. **Физика. Полупроводники** [Электронный ресурс]: методические указания к изучению темы «Полупроводники» для студентов всех технических направлений и специальностей очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронеж. гос. техн. ун-т», Каф. физики; сост.: А.В. Бугаков. - Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2021. - Электрон. текстовые и граф. данные (1,0 Мб) (№ 200-2021).

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. Лаборатория физики конденсированного состояния ауд. 213/4, 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 16 человек;
автоматическая многоканальная зондовая установка;
осциллограф С 9- 4 А (2 штуки);
измеритель удельного сопротивления ВМП-0,5-001;
микротвердомер ПМТ-3;
частотомер ЧЗ-34;
вольтметр В7-20;
осциллограф С1-67;
вольтметр селективный GMS;
осциллограф МСР ОСУ-10А;
генератор сигналов FG-515;
лабораторный источник питания НУ5003 (2 штуки);
генератор ГЗ-104;
мультиметр АМ-1109;
вольтметр В6-9;
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), оснащенный необходимым оборудованием:

комплект учебной мебели: рабочее место преподавателя (стол, стул);
рабочие места обучающихся (столы, стулья) на 20 человек.
компьютер-сборка каф.9;
компьютер в составе: (Н61/IntelCorei3/Кв/М/20" LCD);
компьютер-сборка каф.7;
компьютер-сборка каф.3;
компьютер в составе: (Н61/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 «Спецглавы физики» читаются лекции, проводятся лабораторные занятия.

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

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 производится 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 ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции.
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 8.2: при осуществлении образовательного процесса по дисциплине используется образовательный портал ВГТУ – https://old.education.cchgeu.ru	31.08.2021	
2			
3			
4			