

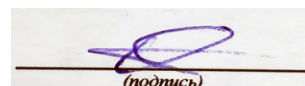
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Кафедра микроэлектроники и общей физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета



И.С.Огнев

« 23 » мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины  
«Физическая кинетика полупроводников»**

Направление подготовки  
11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)  
«Интегральная электроника и нанoeлектроника»

Форма обучения  
очная

Программа рассмотрена  
на заседании кафедры  
от «17» апреля 2023 года, протокол № 5

Программа одобрена НМК  
физического факультета  
протокол № 5, от «25» апреля 2023 года

Ярославль

## **1. Цели освоения дисциплины**

Целью освоения дисциплины «Физическая кинетика полупроводников» является: формирование у студентов способности к применению аппарата физической кинетики для решения актуальных научных задач микро- и нанoeлектроники.

## **2. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина «Физическая кинетика полупроводников» относится к части, формируемой участниками образовательных отношений Блока 1 и является частью, формируемая участниками образовательных отношений.

Данная дисциплина использует знания, полученные при изучении дисциплин «Физика конденсированного состояния», «Физика полупроводников и низкоразмерных систем», «Микроэлектроника».

Дисциплина «Физическая кинетика полупроводников» создает предпосылки для более глубокого освоения последующих дисциплин: «Физика диэлектриков», «Нанотехнологии в электронике», «Методы анализа поверхности».

## **3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ООП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>		
<p><b>ПК-1.</b> Готов формулировать цели и задачи научных исследований в соответствии с тенденциями и перспективами развития электроники и нанoeлектроники, а также смежных областей науки и техники, способностью обоснованно выбирать теоретические и экспериментальные методы и средства решения сформулированных задач</p>	<p><b>ИД_ПК-1.1.</b> Знает принципы построения и функционирования изделий микро- и нанoeлектроники.</p>	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- кинетическое уравнение Больцмана для электронов в кристалле в квазиклассическом приближении, условия его применимости</li> <li>- уравнение Больцмана в приближении времени релаксации;</li> <li>- кинетическую теорию стационарных явлений переноса в полупроводниках с простой зонной структурой: электропроводность, гальваномагнитные, термоэлектрические и термомагнитные явления;</li> <li>- методику вычисления кинетических коэффициентов для случая вырожденного и невырожденного электронного газа;</li> <li>- механизмы учета классических размерных эффектов в задачах микро- и нанoeлектроники.</li> </ul>
	<p><b>ИД_ПК-1.2.</b> Осуществляет расчет предельно-допустимых и предельных режимов работы изделий микро- и нанoeлектроники.</p>	<p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- находить вид неравновесной функции распределения для невырожденного электронного газа в случае сферически-симметричной энергетической зоны;</li> <li>- самостоятельно выполнять промежуточные математические преобразования при вычислении кинетических коэффициентов в приближении невырожденного электронного газа.</li> </ul>

	<p><b>ИД_ПК-1.3.</b>  Демонстрирует умение  выбора теоретических и  экспериментальных  методов исследования  изделий микро- и  наноэлектроники.</p>	<p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- понятийным аппаратом и терминологией в области кинетической теории полупроводников;</li> <li>- методами кинетического описания явлений переноса;</li> <li>- навыками расчета кинетических коэффициентов в простейших стационарных задачах, приближенной оценки порядка физических величин;</li> <li>- навыками самостоятельной работы с источниками информации.</li> </ul>
--	---	---

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 акад. часа.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Контактная работа						
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационн	самостоятель ная работа	
1	Статистика носителей заряда в металлах и полупроводниках	2	2	2				4	Задание для самостоятельной работы
2	Кинетическое уравнение Больцмана для электронов в кристалле	2	4	4				6	Коллоквиум
3	Кинетические процессы (явления переноса) в полупроводниках	2	8	8		2		10	Задание для самостоятельной работы
4	Размерные эффекты. Высокочастотная электропроводность тонкой проволоки.	2	4	4		2		11,7	Задание для самостоятельной работы
							0,3		Зачет
	<b>Всего</b>		<b>18</b>	<b>18</b>		<b>4</b>	<b>0,3</b>	<b>31,7</b>	

## **Содержание разделов дисциплины**

### **1. Статистика носителей заряда в полупроводниках и металлах.**

1.1. Статистика носителей заряда в полупроводниках и металлах. Функция распределения Ферми-Дирака. Сильно вырожденный электронный газ. Невырожденный электронный газ.

### **2. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов в кристалле.**

2.1. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов в кристалле. Уравнение Больцмана в приближении времени релаксации. Условия применимости кинетического уравнения.

2.1. Неравновесная функция распределения для электронов проводимости в случае сферически-симметричной энергетической зоны.

### **3. Кинетические процессы (явления переноса) в полупроводниках.**

3.2. Электропроводность невырожденных полупроводников с простой зонной структурой. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры.

3.3. Гальваномагнитные явления в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой. Эффект Холла и магнетосопротивление в полупроводниках n-типа проводимости и в полупроводниках со смешанным типом проводимости.

3.4. Эффект Холла и магнетосопротивление в полупроводниках со смешанным типом проводимости.

3.4. Термомагнитные явления в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой. Термоэлектродвижущая сила. Эффект Томсона и эффект Пельтье.

### **4. Размерные эффекты. Высокочастотная электропроводность тонкой цилиндрической проволоки.**

4.1. Влияние характера поверхностного рассеяния носителей заряда на кинетические процессы. Решение кинетического уравнения с учетом диффузно-зеркальных граничных условий.

4.2. Высокочастотная электропроводность тонкой цилиндрической проволоки из металла при произвольном соотношении между длиной свободного пробега носителей заряда и радиусом поперечного сечения проволоки (решение кинетической задачи).

4.3. Высокочастотная электропроводность тонкой цилиндрической проволоки из металла в продольном магнитном поле.

## **5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

**Академическая лекция** (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

**Консультации** – групповые занятия, на которых по просьбе студентов дополнительно рассматриваются наиболее сложные моменты, а также даются ответы на вопросы студентов по изучаемым разделам.

## **66. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTeX;
- Adobe Acrobat Reader.

## **7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php).

## **8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины**

### **а) основная литература:**

1. Кузнецова И. А. Основы кинетической теории полупроводников. Ярославль.: ЯрГУ. 2015. <http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20150701.pdf> (электронный ресурс)

2. Физика твердого тела: учебное пособие под ред. Рудого А.С., Проказникова А.В. Ярославль.: ЯрГУ, 2009.

**б) дополнительная литература**

1. Шалимова К. В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.

**9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для предоставления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор:

старший преподаватель кафедры микроэлектроник  
и общей физики , кандидат ф.-м.н.

Романов Д.Н.



**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Физическая кинетика полупроводников»**

**Фонд оценочных средств  
для проведения текущего контроля успеваемости  
и промежуточной аттестации студентов  
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,  
используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

**Задания для самостоятельной работы**

*(данные задания выполняются студентом самостоятельно и преподавателем в обязательном порядке проверяются, проверка сформированности ПК-1, индикаторы ИД\_ПК-1.1, ИД\_ПК-1.2, ИД\_ПК-1.3)*

**Задания по теме № 1 «Статистика носителей заряда в металлах и полупроводниках»:**

1. Записать функцию распределения Ферми-Дирака, построить схематически ее график в случае низких температур ( $T \rightarrow 0$ ) и в случае произвольных температур ( $T > 0$ ). Найти производную функции Ферми-Дирака и изобразить схематически ее график в указанных выше случаях.
2. Записать условие сильного вырожденного электронного газа. Найти выражение для химического потенциала при условии сильного вырождения.
3. Записать условие невырожденного электронного газа. Найти выражение для химического потенциала для невырожденного электронного газа.

**Примерные вопросы для проведения коллоквиума по темам 1 и 2.**

1. Функция распределения Ферми-Дирака.
2. Приближение сильно вырожденного электронного газа.
3. Приближение невырожденного электронного газа.
4. Химический потенциал в случаях сильно вырожденного и невырожденного электронного газа.
5. Вывод кинетического уравнения Больцмана для электронов в кристалле.
6. Физический смысл отдельных членов уравнения Больцмана.
6. Уравнение Больцмана в приближении времени релаксации. Смысл времени релаксации.
7. Механизмы рассеяния носителей заряда в кристалле.
8. Пример вычисления времени релаксации.
9. Условия применимости уравнения Больцмана.
10. Неравновесная функция распределения для невырожденного электронного газа в случае сферически-симметричной энергетической зоны.

**Задания по теме № 3 «Кинетические процессы (явления переноса) в полупроводниках»:**

1. Определить вид неравновесной функции распределения для электронов проводимости при малых отклонениях от состояния равновесия для невырожденного электронного газа случае сферически – симметричной энергетической зоны.
2. Получить выражение для плотности электрического тока в невырожденном полупроводнике n-типа проводимости с простой зонной структурой при наличии градиента температуры, электрического и магнитного полей.
3. Получить выражения для электропроводности и подвижности носителей заряда в невырожденном полупроводнике n-типа проводимости с простой зонной структурой при рассеянии электронов на акустических колебаниях в атомном полупроводнике.

4. Получить выражения для электропроводности и подвижности носителей заряда в невырожденном полупроводнике n-типа проводимости с простой зонной структурой при рассеянии электронов на ионах примеси.
5. Получить выражения для электропроводности и подвижности носителей заряда в невырожденном полупроводнике n-типа проводимости с простой зонной структурой при рассеянии электронов на оптических колебаниях в ионных кристаллах.
6. Найти постоянную Холла в примесных полупроводниках в случае слабого магнитного поля при степенной зависимости времени релаксации от энергии.
7. Найти постоянную Холла в примесных полупроводниках в случае сильного магнитного поля при степенной зависимости времени релаксации от энергии.
8. Найти магнетосопротивление в примесных полупроводниках в случае слабого магнитного поля при степенной зависимости времени релаксации от энергии.
9. Найти магнетосопротивление в примесных полупроводниках в случае сильного магнитного поля при степенной зависимости времени релаксации от энергии.
10. Найти дифференциальную термоэдс собственного полупроводника с простой зонной структурой.

**Задания по теме № 4 «Размерные эффекты. Высокочастотная электропроводность тонкой проволоки»:**

1. Найти вид неравновесной функции распределения в задаче о высокочастотной проводимости тонкой цилиндрической проволоки из металла для диффузно-зеркальных граничных условий Фукса.
2. Рассчитать плотность тока в задаче о высокочастотной проводимости тонкой цилиндрической проволоки из металла.
3. Рассчитать безразмерную интегральную проводимость тонкой цилиндрической проволоки из металла.
4. Рассчитать во сколько раз отличается для стационарного случая безразмерная проводимость тонкой проволоки, радиус которой в 10 раз меньше длины свободного пробега электронов, полученная кинетическим методом, от безразмерной проводимости, рассчитанной по формуле Друде (без учета поверхностного рассеяния электронов).
5. Рассчитать во сколько раз отличается для стационарного случая безразмерная проводимость тонкой проволоки, радиус которой в 10 раз меньше длины свободного пробега электронов, для случая диффузного и зеркального отражения электронов от поверхности проволоки.
6. Рассчитать во сколько раз отличается для стационарного случая безразмерная проводимость тонкой проволоки в случае зеркального отражения электронов от поверхности для проволок, радиусы которых равны и в 10 раз меньше длины свободного электронов.

**1.2 Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации**

*Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме зачета.*

*В качестве заданий на зачет выносятся вопросы, которые были разобраны на лекционных и практических занятиях. Проверка сформированности ПК-1, индикаторы ИД\_ПК-1.1, ИД\_ПК-1.2, ИД\_ПК-1.3*

1. Плотность тока, обусловленная неравновесными носителями заряда.
2. Электропроводность невырожденных полупроводников с простой зонной структурой. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры.
3. Гальваномагнитные явления в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой: эффект Холла в примесных полупроводниках в случаях слабого и сильного магнитного поля.

4. Эффект Холла в полупроводниках со смешанной проводимостью в случаях слабого и сильного магнитного поля.
5. Магнетосопротивление в примесных полупроводниках в случаях слабого и сильного магнитного поля.
6. Магнетосопротивление в полупроводниках со смешанной проводимостью в случаях слабого и сильного магнитного поля.
7. Термоэлектрические явления в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой: термоэлектродвижущая сила.
8. Эффект Томсона в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой.
9. Эффект Пельтье в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой.
10. Терромагнитные явления в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой: эффект Нернста-Эттингсгаузена в примесных полупроводниках в случаях слабого и сильного магнитного поля.
11. Явления переноса в полупроводниках с простой зонной структурой при произвольном вырождении: электропроводность примесного полупроводника.
12. Термоэлектрические явления в примесных полупроводниках с простой зонной структурой при произвольном вырождении.
13. Гальваномагнитные явления в примесных полупроводниках с простой зонной структурой при произвольном вырождении в случаях слабого и сильного магнитного поля.
14. Непригодность классической макроскопической теории электропроводности для описания электрических свойств низкоразмерных проводящих материалов. Квазиклассические размерные эффекты на примере электропроводности тонких проволок.
15. Кинетическое описание электропроводности тонкой цилиндрической проволоки: уравнение Больцмана для вырожденного электронного газа в слабом переменном электрическом поле. Граничные условия для неравновесной функции распределения.
16. Решение уравнения Больцмана методом характеристик. Неравновесная функция распределения.
17. Расчет интегральной проводимости тонкой металлической цилиндрической проволоки.
18. Зависимость модуля и фазы безразмерной интегральной проводимости от частоты внешнего электрического поля.
19. Зависимость модуля и фазы безразмерной интегральной проводимости от безразмерной длины свободного пробега носителей заряда.
20. Влияние механизма отражения носителей заряда от внутренней поверхности проволоки на ее электропроводность.

### **Правила выставления оценки**

По итогам зачёта выставляется одна из оценок: «зачет» или «незачет».

**Оценка «зачет»** выставляется студенту, который умеет сформулировать постановку задачи, определить возможные методы ее решения, провести простейший анализ полученного результата, владеет навыками проведения сложных вычислений под руководством преподавателя и самостоятельного выполнения базовых вычислений.

**Оценка «незачтено»** выставляется студенту, у которого не смог сформулировать постановку задачи, определить возможные методы ее решения, провести простейший анализ полученного результата.

## Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Физическая кинетика полупроводников»

### Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Дисциплина «Физическая кинетика полупроводников» проводится в форме лекционных и практических занятий. При изучении данного курса требуется большой объем самостоятельной работы студентов, это связано с тем, что материал спецкурса опирается на различные физические дисциплины (статистическую физику, квантовую механику, физику полупроводников, физическую кинетику), и для целостного восприятия рассматриваемых явлений необходим синтез полученных знаний из указанных курсов. По каждому разделу предусмотрена консультация по разбору наиболее трудных моментов.

Для успешного освоения дисциплины очень важна активная работа, как в аудитории, так и самостоятельно при выполнении домашних заданий. Кроме того, вычисление кинетических коэффициентов математически громоздко и требует от студентов умения самостоятельно выполнять некоторые промежуточные математические преобразования.

Освоить вопросы, излагаемые в процессе изучения дисциплины «Физическая кинетика» самостоятельно студенту крайне сложно. Это связано со сложностью изучаемого материала и громоздкими математическими преобразованиями. Поэтому посещение всех аудиторных занятий является совершенно необходимым. Без упорных и регулярных занятий в течение семестра сдать зачет по итогам изучения дисциплины студенту практически невозможно.

В качестве инновационного метода обучения предлагается знакомство студентов с применением аппарата физической кинетики для решения актуальных научных задач микро- и наноэлектроники, в частности, в предлагаемом пособии в последней главе излагается оригинальная научная задача о высокочастотной проводимости тонких проволок.

Освоить вопросы, излагаемые в процессе изучения дисциплины «Физическая кинетика» самостоятельно студенту крайне сложно. Это связано со сложностью изучаемого материала и громоздкими математическими преобразованиями. Поэтому посещение всех аудиторных занятий является совершенно необходимым. Без упорных и регулярных занятий в течение семестра сдать зачет по итогам изучения дисциплины студенту практически невозможно.

При освоении материала дисциплины рекомендуется следовать следующему плану и обратить внимание на следующие моменты:

#### **1. Неравновесная функция распределения**

1.1 При нахождении общего вида неравновесной функции распределения принимается во внимание наиболее простая зависимость энергии электрона от абсолютной величины волнового вектора  $k$ . Рассматривается невырожденный электронный газ, для которого функция Ферми-Дирака переходит в классическое распределение Максвелла-Больцмана.

1.2 Кинетическое уравнение решается в линейном по внешнему электрическому полю и по градиенту температуры приближении. Для этого в левую часть уравнения Больцмана подставляется функция Ферми-Дирака везде, кроме члена, содержащего магнитное поле.

#### **2. Электропроводность невырожденного полупроводника.**

2.1 Для определения общего вида плотности электрического тока вводится специальный символ усреднения, в котором в качестве переменной интегрирования введена безразмерная энергия.

2.2 При вычислении электропроводности и подвижности учитывается степенная зависимость времени релаксации от энергии. В этом случае введенный для определения

плотности тока символ усреднения сводится к виду Гамма-функции. Используя свойства Гамма-функции для различных механизмов рассеяния удастся получить аналитический результат.

### **3. Гальваномагнитные явления в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой**

3.1 При расчете постоянной Холла и магнетосопротивления в предельном случае слабого магнитного поля

первоначально в постоянной Холла и в магнетосопротивлении при разложении удерживаются члены не выше первой степени по магнитному полю.

На втором этапе вычислений в постоянной Холла и в магнетосопротивлении при разложении удерживаются квадратичные по магнитному полю члены.

3.2 При расчете постоянной Холла и магнетосопротивления в предельном случае сильного магнитного поля

разложение проводится по обратным степеням магнитного поля. Первоначально при разложении удерживаются члены не выше первой степени по величине обратного магнитного поля.

На втором этапе вычислений в постоянной Холла и в магнетосопротивлении при разложении удерживаются квадратичные по обратному магнитному полю члены.

3.3. В полупроводниках со смешанным типом проводимости, когда концентрации электронов и дырок одинаковы ( $n=p$ ), в случае сильного магнитного поля требуется специальное рассмотрение, поскольку в квадратичном по обратному магнитному полю приближении члены, содержащие магнитное поле, обращаются в ноль. Необходимо проводить разложение с учетом следующего порядка малости.

### **4. Термоэлектрические явления в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой.**

4.1 При определении термоэдс необходимо учитывать, что градиент вычисляется не от электростатического потенциала, а от полного химического потенциала (учитывающего внешнее электрическое поле), который не меняется при прохождении контакта, если температуры образцов вблизи контакта одинаковы.

4.2 Необходимо показать, почему термоэдс собственного полупроводника меньше, чем примесного.

4.3. Соотношение Томсона следует получить в случае одинаковых механизмов рассеяния электронов и дырок.