

В379.35 я173
А К89
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

И.А. Кузнецова

Физическая кинетика полупроводников

Учебное пособие

Рекомендовано

*Научно-методическим советом университета
для студентов специальности Микроэлектроника и
полупроводниковые приборы и направления Физика*

Чит. зал

Ярославль 2006

273445

2/3

А

УДК 531.3+537.311.322

ББК В379.35я73

К 89

Рекомендовано

Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2006 года

Рецензенты:

кафедра общей физики ЯГПУ им. К.Д. Ушинского;
д-р физ.-мат. наук В.К. Смирнов

К 89 Кузнецова, И.А. Физическая кинетика полупроводников: Учеб. пособие / И.А. Кузнецова; Яросл. гос. ун-т. – Ярославль: ЯрГУ, 2006. – 104 с.

ISBN 5-8397-0502-0(978-5-8397-0502-9)

Основное внимание в учебном пособии уделено изложению линейной классической теории стационарных явлений переноса в полупроводниках. Рассмотрен наиболее простой случай сферически-симметричной энергетической зоны. Отдельная глава посвящена размерным эффектам в тонких проволоках в переменном электрическом поле. Пособие написано на основе лекционного курса, читаемого автором в течение ряда лет для студентов физического факультета ЯрГУ. Вместе с тем пособие не является конспектом лекций, поскольку содержит дополнительный материал для желающих изучить предмет более глубоко.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 510400 Физика и по специальности 014100 Микроэлектроника и полупроводниковые приборы (блок ОПД, дисциплина «Физическая кинетика полупроводников»), очной формы обучения.

УДК 531.3+537.311.322

ББК В379.35я73

ISBN 5-8397-0502-0(978-5-8397-0502-9)

© Ярославский
государственный
университет, 2006
© И.А. Кузнецова, 2006

БИБЛИОТЕКА ЯрГУ.
ОСНОВНОЙ ФОНД

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение | 6 |
| 1. Статистика носителей заряда в металлах и полупроводниках | 8 |
| 1.1. Функция распределения Ферми-Дирака | 9 |
| 1.2. Сильно вырожденный электронный газ | 11 |
| 1.3. Невырожденный электронный газ | 14 |
| 2. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов в кристалле | 16 |
| 2.1. Явления переноса и кинетическое уравнение Больцмана для невырожденного электронного газа | 17 |
| 2.1.1. Уравнение Больцмана в приближении времени релаксации | 23 |
| 2.1.2. Время релаксации при рассеянии носителей тока на ионах примеси | 27 |
| 2.2. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов в кристалле | 32 |
| 2.3. Условия применимости кинетического уравнения | 36 |
| 3. Кинетические процессы (явления переноса) в полупроводниках | 41 |
| 3.1. Определение неравновесной функции распределения для электронов проводимости в случае сферически-симметричной зоны | 42 |

| | |
|---|----|
| 3.2. Электрический ток в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой | 46 |
| 3.3. Электропроводность невырожденных полупроводников с простой зонной структурой | 51 |
| 3.4. Гальваномагнитные явления в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой | 55 |
| 3.4.1. Эффект Холла и магнетосопротивление в примесном полупроводнике <i>n</i> -типа проводимости | 56 |
| 3.4.2. Эффект Холла и магнетосопротивление в полупроводниках со смешанной проводимостью | 60 |
| 3.5. Термоэлектрические явления в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой | 64 |
| 3.5.1. Термоэлектродвижущая сила | 64 |
| 3.5.2. Эффект Томсона и эффект Пельтье | 67 |
| 3.6. Терромагнитные явления в невырожденных полупроводниках с простой зонной структурой | 72 |
| 3.6.1. Эффект Нернста-Эттингсгаузена в примесном полупроводнике <i>n</i> -типа проводимости | 72 |
| 3.6.2. Эффект Нернста-Эттингсгаузена в полупроводнике со смешанной проводимостью | 74 |
| 3.7. Явления переноса в полупроводниках с простой зоной при произвольном вырождении | 76 |
| 3.7.1. Электропроводность примесного полупроводника <i>n</i> -типа проводимости | 78 |
| 3.7.2. Термоэлектрические явления в примесных полупроводниках <i>n</i> -типа проводимости | 79 |
| 3.7.3. Гальваномагнитные явления в примесных полупроводниках <i>n</i> -типа | 81 |
| 3.7.4. Терромагнитные явления | 83 |

| | |
|---|------------|
| 4. Электропроводность тонкой цилиндрической проволо- | |
| ки в переменном электрическом поле | 85 |
| 4.1. Уравнение Больцмана для вырожденного электронного | |
| газа в слабом переменном электрическом поле | 86 |
| 4.1.1. Граничные условия | 89 |
| 4.1.2. Неравновесная функция распределения | 90 |
| 4.2. Расчет проводимости | 93 |
| 4.3. Обсуждение результатов | 96 |
| Приложения | 100 |
| Литература | 103 |

Введение

Явления переноса, или кинетические эффекты, лежат в основе многих технических применений полупроводников. Общая причина этих явлений заключается в том, что электроны проводимости при своем движении переносят связанные с ними физические величины: массу, электрический заряд, энергию и др. Вследствие этого, при определенных внешних воздействиях, возникают направленные потоки указанных величин, приводящие к ряду электрических, магнитных и тепловых эффектов.

Кинетические свойства весьма чувствительны к законам дисперсии носителей тока и к природе взаимодействия носителей с различными дефектами кристаллической решетки. Поэтому многие традиционные методы исследования полупроводниковых веществ основываются на исследовании различных кинетических эффектов.

Настоящее пособие посвящено изложению линейной теории электронных явлений переноса в полупроводниках в квазиклассическом приближении. Рассматривается наиболее простой случай сферически-симметричной энергетической зоны. Подробнее анализируются предельные случаи вырожденного и невырожденного электронного газа, что позволяет минимизировать математические выводы при расчете кинетических коэффициентов.

Пособие состоит из четырех глав. Статистике носителей заряда в полупроводниках, когда отсутствует квантование спектра энергии посвящена первая глава. Кинетическое уравнение Больцмана для электронов в кристалле, пределы его применимости и его решение в при-

ближении времени релаксации рассматриваются во второй главе. Основную часть пособия составляет третья глава, в которой излагается стационарная кинетическая теория наиболее важных явлений переноса: электропроводности, гальваномагнитных, термоэлектрических и термомагнитных явлений. В четвертой главе рассматриваются классические размерные эффекты на примере тонких проволок, находящихся в слабом периодическом электрическом поле. Для цилиндрических проволок, радиус которых сравним с длиной свободного пробега электронов, решено кинетическое уравнение Больцмана с учетом диффузно-зеркальных граничных условий для функции распределения. Вычислена высокочастотная проводимость проволок.

Подробный вывод основных соотношений при ограниченном объеме пособия заставил отказаться от изложения ряда важных вопросов и от подробного сравнения теории с экспериментом.