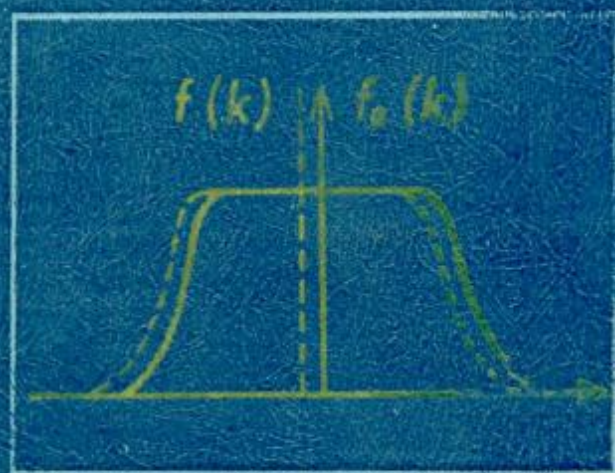


Б. М. АСКЕРОВ

ЭЛЕКТРОННЫЕ  
ЯВЛЕНИЯ  
ПЕРЕНОСА  
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ



Б. М. АСКЕРОВ

ЭЛЕКТРОННЫЕ  
ЯВЛЕНИЯ  
ПЕРЕНОСА  
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ



МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1985

ББК 22.379  
А 90  
УДК 537.22

Аскеров Б. М. **Электронные явления переноса в полупроводниках.**— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985.— 320 с.

Посвящена систематическому и подробному изложению линейной теории стационарных электронных явлений переноса в полупроводниках. Излагаются как классическая, так и квантовая теории гальвано- и термомагнитных эффектов. Рассмотрены различные реальные модели зон: пропильная изотропная и анизотропная непараболическая зоны, а также зона типа дырочного германия. Учтено увлечение носителей тока фононами в произвольном неквадрующем магнитном поле. Большое место занимает теория рассеяния носителей. Отдельная глава посвящена размерным эффектам в пленках.

Для научных работников, инженеров и аспирантов, занимающихся исследованием полупроводников, а также студентов старших курсов физических и инженерно-физических специальностей.

Табл. 13. Ил. 41. Библиогр. 358 назв.

Рецензент

доктор физико-математических наук профессор В. Л. Воич-Бругвич

А 1704060000—166 100-85  
053(02)-85

© Издательство «Наука».  
Главная редакция  
физико-математической  
литературы, 1985

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Кинетические свойства, как известно, лежат в основе многих технических применений полупроводников. Кроме того, эти свойства чувствительны к законам дисперсии носителей тока и к природе взаимодействия носителей с различными дефектами кристаллической решетки. Поэтому многие традиционные методы изучения полупроводниковых веществ основываются на исследовании различных кинетических эффектов. Они становятся особенно эффективными в некоторых экстремальных условиях: при низких температурах, в сильных магнитных полях, в полупроводниках с сильно непараболической зоной и т. д. Хорошие и надежные результаты получаются тогда, когда исследование проводится комплексно и учитываются выводы теории электронных явлений переноса. Однако в существующих изданиях теория кинетических эффектов излагается в пределах одной — двух глав.

Настоящая книга посвящена систематическому и подробному изложению линейной теории стационарных электронных явлений переноса в полупроводниках. Излагаются как классическая, так и квантовая теории гальвано- и термомагнитных явлений. Рассмотрены произвольная изотропная и анизотропная непараболическая зоны, а также зона типа дырочного германия. Учтено увлечение носителей заряда фононами в произвольном неквадрупольном магнитном поле. Подробно изложена теория рассеяния, где учитывается и влияние блоховских амплитуд.

Основную часть книги составляют три важных раздела: статистика носителей тока в полупроводниках, классическая теория и квантовая теория электронных явлений переноса.

Статистика носителей тока, когда отсутствует квантование спектра энергии, изложена во второй главе. В квантующем магнитном поле и при размерном квантовании статистика носителей рассмотрена в главах 6 и 7 соответственно.

Классической теории электронных явлений переноса, построенной на основе решения кинетического уравнения, посвящены главы 3—5. Подробно проанализированы пределы применимости самого кинетического уравнения и его решения. Изложена теория рассеяния носителей заряда в полупроводниках с произвольной изотропной зоной. Для полупроводников типа дырочного германия вычислены время релаксации и подвижность с учетом переходов между зонами легких и тяжелых дырок. В главе 5

рассмотрены явления переноса в многодолинных полупроводниках, где учтена и анизотропия рассеяния. Результаты этой главы могут быть применены к электронному германию и кремнию, а также к полупроводниковым соединениям халькогенидов свинца. В последних, как известно, зона проводимости не только анизотропна, но и непараболична.

Квантовой теории электронных явлений переноса посвящена шестая глава, где исследуются гальвано- и термомагнитные эффекты в поперечном квантующем магнитном поле в полупроводниках с изотропной зоной. Рассмотрены условия осцилляций Шубникова — де Гааза и магнетофононного резонанса. Особое внимание уделено термо-э. д. с. в квантовой области магнитных полей и влиянию непараболичности зоны.

В последней — главе 7 изложены классические и квантовые размерные эффекты. Для пленок, толщина которых сравнима с длиной свободного пробега носителей заряда, решено кинетическое уравнение с учетом граничных условий для функции распределения. Получены общие компактные выражения для тензоров проводимости в пленках. Показана возможность отрицательного магнетосопротивления в пленках с изотропной зоной при полном вырождении электронного газа. Размерное квантование в пленках изложено в заключительном параграфе, где рассмотрена термо-э. д. с. в сильном поперечном магнитном поле.

Все рассмотренные вопросы теории явлений переноса доведены до конкретных формул, и для удобства использования их при анализе экспериментальных результатов указаны условия, при выполнении которых они применимы.

Ссылки на оригинальные статьи в основном относятся к теоретическим работам, список которых к каждой главе приведен в конце книги. Этот список не претендует на полноту.

Считаю своим приятным долгом выразить искреннюю признательность В. Л. Бонч-Бруевичу за ценные замечания и советы при обсуждении рукописи книги, во многом улучшившие ее содержание.

Выражаю благодарность Б. И. Кулиеву и С. Р. Фигаровой за просмотр рукописи, а также за участие в обсуждениях некоторых вопросов теории явлений переноса в пленках.

Хочу выразить особую признательность И. Н. Аскеровой за большое терпение, выдержку и помощь во время работы над книгой.

Благодарен всем сотрудникам кафедры физики твердого тела Азербайджанского государственного университета им. С. М. Кирова и всем тем, кто помогал в работе над книгой.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	5
<b>Глава 1. Энергетический спектр носителей тока в полупроводниках</b>	<b>7</b>
§ 1. Движение электрона в идеальной кристаллической решетке	7
§ 2. Энергетические зоны в твердых телах. Зоны Бриллюэна	10
§ 3. Структура краев энергетических зон некоторых полупроводников. Основные модели зон . . . . .	15
<b>Глава 2. Статистика носителей заряда в полупроводниках . . . . .</b>	<b>32</b>
§ 4. Концентрация электронов в зоне проводимости и уровень Ферми. Зависимость эффективной массы от концентрации	32
§ 5. Статистика носителей заряда в собственных полупроводниках и полуметаллах . . . . .	46
§ 6. Статистика носителей заряда в примесных полупроводниках	52
<b>Глава 3. Решение кинетического уравнения. Механизмы рассеяния</b>	<b>67</b>
§ 7. Феноменологическое определение кинетических коэффициентов и их взаимная связь . . . . .	67
§ 8. Кинетическое уравнение и условия его применимости	71
§ 9. Решение кинетического уравнения для произвольной сферически-симметричной зоны в приближении времени релаксации . . . . .	78
§ 10. Рассеяние носителей заряда в полупроводниках с произвольной изотропной зоной. Примесное рассеяние . . . . .	89
§ 11. Рассеяние носителей заряда на фононах в полупроводниках с произвольной изотропной зоной . . . . .	100
§ 12. Теория рассеяния носителей заряда в полупроводниках с учетом блоховских волновых функций . . . . .	123
<b>Глава 4. Электронные явления переноса в полупроводниках с изотропной зоной . . . . .</b>	<b>136</b>
§ 13. Общие выражения основных кинетических коэффициентов	136
§ 14. Явления переноса в отсутствие магнитного поля . . . . .	141
§ 15. Явления переноса в магнитном поле . . . . .	156
§ 16. Явления переноса в полупроводниках типа $p$ -Ge . . . . .	187
§ 17. Увлечение носителей заряда фононами в полупроводниках с произвольной изотропной зоной . . . . .	197
<b>Глава 5. Явления переноса в полупроводниках с анизотропной непараболической зоной. Анизотропное рассеяние . . . . .</b>	<b>206</b>
§ 18. Решение кинетического уравнения для анизотропной зоны в приближении тензора времени релаксации . . . . .	207
§ 19. Тензоры проводимости в полупроводниках с анизотропным законом дисперсии . . . . .	210
§ 20. Основные кинетические эффекты в кубических полупроводниках с анизотропным законом дисперсии . . . . .	214

Глава 6. Явления переноса в квантующих магнитных полях	223
§ 21. Энергетический спектр и статистика носителей заряда в квантующих магнитных полях . . . . .	224
§ 22. Гальваномагнитные явления в квантующем магнитном поле	243
§ 23. Термомагнитные явления в поперечном квантующем магнитном поле . . . . .	262
Глава 7. Электронные явления переноса в полупроводниковых пленках. Размерные эффекты . . . . .	278
§ 24. Решение кинетического уравнения в пленках с учетом граничных условий . . . . .	278
§ 25. Явления переноса в пленках с произвольным изотропным законом дисперсий . . . . .	285
§ 26. Квантовые размерные эффекты . . . . .	294
Список литературы . . . . .	310

*Бахрам Махрали оглы Аскеров*

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА  
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

Редактор *Т. С. Решетина*

Художественный редактор *Т. К. Кольченко*

Технический редактор *В. Н. Кондакова*

Корректоры *Г. В. Подвольская, Г. И. Сурова*

ИБ № 12638

Сдано в набор 15.04.85. Подписано к печати 11.11.85. Т-22310.  
Формат 60×90/16. Бумага тип. № 3. Гарнитура обыкновенная новая. Печать высокая. Усл. печ. л. 20. Усл. кр.-отт. 20.  
Уч.-изд. л. 21,22. Тираж 3350 экз. Заказ № 691. Цена 3 р. 50 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»  
Главная редакция физико-математической литературы  
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

4-я типография издательства «Наука»  
630077 г. Новосибирск 77, Станиславского. 25