

Б. М. АСКЕРОВ

**Кинетические
эффекты
в полупроводниках**

АДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Б. М. Аскеров

**Кинетические
эффекты
в полупроводниках**



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
Ленинградское отделение
Ленинград
1 9 7 0

УДК 621.38

Аскеров Б. М. Кинетические эффекты в полупроводниках.
Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л., 1970, 1—303.

Излагается современная теория гальваномагнитных и термомагнитных явлений в полупроводниках. Рассмотрены случаи параболической и непараболической зон, а также зоны со многими минимумами. В книге большое место занимает квантовая теория кинетических эффектов. Учитывается влияние непараболичности зоны проводимости на кинетические эффекты в квантующем магнитном поле. Подробно излагаются основные выводы теории осцилляции Шубникова—де Гааза и магнитофононной осцилляции. Развита квантовая теория эффекта Нернста—Эттингсгаузена. В отличие от существующих книг, посвященных кинетической теории полупроводников, здесь изложены классическая и квантовая теории гальваномагнитных и термомагнитных явлений, охвачены все практически важные модели энергетических зон. Библ. — 365 назв., илл. — 25, табл. — 11.

Ответственный редактор

С. С. ШАЛЫТ

3-3-12
282-69 (I)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Исследование явлений переноса заряда и тепла в полупроводниках является важным средством получения информации как о структуре энергетического спектра носителей тока, так и о механизме их рассеяния в полупроводниковом кристалле. Благодаря тому, что кинетические процессы в полупроводниках в сильной степени зависят от типа, количества и распределения примесей и очень чувствительны к изменениям температуры, освещенности и напряженности электрического и магнитного полей, эти процессы являются физической основой многочисленных применений полупроводников в современной технике. Поэтому кинетическими явлениями в полупроводниках интересуются в настоящее время как ученые-исследователи для решения теоретических вопросов, так и инженеры-практики, разрабатывающие и совершенствующие методы прикладного использования полупроводников.

Теория кинетических явлений, протекающих в полупроводниках, превратилась в настоящее время в обширный раздел физики твердого тела. В ряде монографий, изданных на русском языке,* разные аспекты этой теории освещены неравномерно и без достаточной детализации отдельных конкретных случаев. Поэтому эти издания не могут полностью удовлетворить исследователя-экспериментатора, которому нужна удобная для работы, система-

* В. Шокли. Теория электронных полупроводников. ИЛ, М., 1953; А. Ф. Иоффе. Физика полупроводников. Изд. АН СССР, Л., 1957; Д. Райт. Полупроводники. ИЛ, М., 1957; И. М. Цидильковский. Термомагнитные явления в полупроводниках. Физматгиз, М., 1960; А. И. Ансельм. Введение в теорию полупроводников. Физматгиз, М.—Л., 1962; Р. Смит. Полупроводники. ИЛ, М., 1962; Ф. Д. Блатт. Теория подвижности электронов в твердых телах. Физматгиз, М.—Л., 1963; Д. Драбл, Г. Гольдсмит. Теплопроводность полупроводников. ИЛ, М., 1963; Д. Блекмор. Статистика электронов в полупроводниках. Изд. «Мир», М., 1964; Л. С. Стилбанс. Физика полупроводников. Изд. «Сов. радио», М., 1967; В. И. Фистуль. Сильно легированные полупроводники. Изд. «Наука», М., 1967; Ю. И. Равич, Б. А. Ефимова, И. А. Смирнов. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца. Изд. «Наука», М., 1968.

тизированная сводка теоретических формул. Такие формулы имеются, но они разбросаны по различным отечественным и зарубежным монографиям и научным статьям мировой периодики по физике и технике полупроводников. Ряд важных вопросов кинетической теории получил теоретическое освещение в отдельных научных статьях и в монографиях еще не описан. Поэтому у физиков и инженеров, занимающихся экспериментальными исследованиями, появилась потребность в издании, в котором содержалась бы возможно более полная сводка формул, описывающих кинетические явления в полупроводниках при разнообразных конкретных физических условиях, число которых в настоящее время велико. Для того чтобы экспериментатор мог легко вычислить кинетические коэффициенты, такое издание должно быть дополнено таблицей численных значений сложных интегралов, фигурирующих в теоретических формулах.

В предлагаемой монографии Б. М. Аскерова сделана попытка удовлетворить такие запросы экспериментаторов. В ней рассмотрен очень широкий круг вопросов теории кинетических явлений в классической и квантовой области. К сожалению, в настоящем издании недостаточно освещен эффект увлечения, играющий очень важную роль в термоэлектрических и термомагнитных явлениях при низких температурах.

Настоящая книга, рассчитанная на лиц, знакомых с основами физики полупроводников, имеет своей целью лишь кратко напомнить физическую картину обсуждаемых явлений и указать те конкретные физические условия, при которых та или иная формула может быть использована.

Автор предлагаемой монографии Б. М. Аскеров — специалист, известный своими работами по теории кинетических явлений в полупроводниках, хорошо знаком с запросами экспериментаторов, и можно надеяться, что его труд получит в их кругу одобрительное признание.

С. С. Шалыт

ВВЕДЕНИЕ

Пригодность того или иного полупроводникового вещества для решения определенных технических задач определяется главным образом свойствами носителей тока (в частности, их подвижностью и эффективной массой), детальное исследование которых является одной из наиболее важных проблем физики полупроводников.

Одним из эффективных и наиболее распространенных методов исследования свойств полупроводников является измерение кинетических коэффициентов. Этот метод позволяет исследовать как энергетический спектр носителей тока, так и их взаимодействие с кристаллической решеткой. Действительно, оказалось, что, изучая гальвано- и термомагнитные явления, можно получить ценные сведения о характере проводимости, определить параметры, характеризующие данный полупроводниковый кристалл.

Так, например, термомагнитный эффект Нернста—Эттингсгаузена является чрезвычайно чувствительным индикатором механизма рассеяния. Измерение термоэдс в сильном (исквантованном) магнитном поле, когда она не зависит от механизма рассеяния, позволяет достоверно определить эффективную массу электронов проводимости.

Следует отметить, что экспериментальное изучение кинетических эффектов дает важные результаты только тогда, когда оно ведется в содружестве с теорией этих явлений. Поэтому очевидно, насколько необходимо иметь обзор по теории кинетических эффектов в полупроводниках, в котором содержались бы все кинетические коэффициенты, их зависимости от магнитного поля; механизма рассеяния, степени вырождения носителей тока и т. д. Настоящая книга представляет собой попытку такого обзора.

До недавнего времени кинетические эффекты изучались в основном в классической области магнитных полей. Причем результаты экспериментальных работ интерпретировались с помощью теории, в основе которой лежала простая модель энергетической зоны — параболическая зона. Однако дальнейшие исследования

показали, что во многих полупроводниках структура энергетической зоны существенно отличается от параболической модели. Было выяснено, что в некоторых полупроводниках кривизна зоны с ростом энергии уменьшается и поэтому зона не описывается квадратичным законом дисперсии, а имеет место более сложная связь между энергией и волновым вектором. Закон дисперсии, найденный Кэйнном, довольно хорошо описывает зоны полупроводников типа $A^{III}B^V$. Кроме того, было показано, что для некоторых полупроводников, таких как германий, кремний, зона проводимости может быть описана квадратичным законом дисперсии, однако кривизна этой зоны меняется в зависимости от направления волновых векторов. В этих полупроводниках изоэнергетическими поверхностями вблизи минимума энергии являются эллипсоиды вращения.

В настоящей книге будут рассмотрены различные конкретные модели энергетических зон: параболическая, непараболическая и эллипсоидальная. Первая часть (главы I—VI) посвящена классической теории кинетических эффектов на основе кинетического уравнения для указанных моделей зон. В случае параболической зоны все кинетические коэффициенты выражаются через однопараметрические интегралы Ферми, а в случае непараболической зоны — через двух- или трехпараметрические интегралы Ферми.

Получение сильных и сверхсильных магнитных полей позволило исследовать кинетические эффекты в квантующих магнитных полях. При этом появились качественно новые кинетические свойства полупроводников. К таким свойствам относится прежде всего осцилляция сопротивления в магнитном поле — эффект Шубникова—де Гааза. Эти и другие экспериментальные результаты стимулировали развитие квантовой теории гальваномагнитных явлений. В последние годы была создана хорошо обоснованная теория гальваномагнитных явлений в квантующих магнитных полях. В ходе развития этой теории был предсказан новый тип осцилляции магнетосопротивления — так называемые магнетофонные осцилляции, или эффект Гуревича—Фирсова. Эти осцилляции обнаружены на опыте и всесторонне исследованы во многих полупроводниках.

Седьмая глава настоящей книги посвящена квантовой теории гальваномагнитных явлений. В этой главе учитывается непараболическость зоны при вычислении сопротивления в квантующих магнитных полях.

Несомненно большим успехом кинетической теории является построение квантовой теории термомагнитных явлений в полупроводниках, которая отсутствовала до 1960 г. Некоторые результаты этой теории изложены в последней, восьмой главе книги.

В приложении даны таблицы однопараметрических и двухпараметрических интегралов Ферми. Двухпараметрические интегралы табулированы В. Завадским, Р. Ковальчуком и И. Ко-

лодзайчаком. Выражаю искреннюю благодарность этим авторам, приславшим таблицы и разрешившим использовать их в приложении к данной книге.

В книге не рассмотрено влияние механизма увлечения носителей тока фононами на кинетические эффекты. Приведенный список литературы к каждой главе не претендует на полноту.

Автор понимает, что попытка дать систематический обзор по такой широкой области физики полупроводников, как теория кинетических эффектов, не может быть свободна от многих недостатков. Все замечания и пожелания будут приняты с признательностью.

Параграфы 24, 25 и 34 были написаны совместно с Ф. М. Гашимзаде. Я признателен Ф. М. Гашимзаде также за просмотр рукописи и полезные замечания.

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность проф. А. И. Ансельму, академику АН Азерб. ССР Г. Б. Абдуллаеву, проф. С. С. Шалыту и доц. М. С. Соминскому, по инициативе которых написана эта книга.

Выражаю свою признательность проф. А. И. Ансельму и доктору физ.-мат. наук Ю. Н. Образцову за неоднократные обсуждения плана книги и за ценные советы.

Благодарен редактору проф. С. С. Шалыту за внимательное отношение к настоящей книге и многочисленные замечания, во многом улучшающие книгу.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Предисловие	3
Введение	5
Г л а в а I. Основы зонной теории твердых тел и равновесие носителей тока в полупроводниках	8
§ 1. Движение свободного электрона	10
§ 2. Движение электрона в идеальной кристаллической решетке	12
§ 3. Энергетические зоны в твердых телах. Зоны Бриллюэна	18
§ 4. Эффективная масса носителей тока	27
§ 5. Структура зон некоторых полупроводников. Различные модели зон	33
§ 6. Статистика носителей тока в полупроводниках	40
§ 7. Вычисление химического потенциала в полупроводниках	48
Г л а в а II. Кинетическое уравнение и время релаксации	54
§ 8. Феноменологическое определение кинетических эффектов и их взаимная связь	54
§ 9. Кинетическое уравнение	60
§ 10. Решение кинетического уравнения для сферически-симметричной зоны	66
§ 11. Различные механизмы релаксации электронов в полупроводниках	70
Г л а в а III. Термоэлектрические явления в полупроводниках	82
§ 12. Подвижность носителей тока в полупроводниках. Электронная часть теплопроводности	82
§ 13. Термоэдс полупроводников с параболической зоной	84
§ 14. Эффект Томсона	86
§ 15. Эффект Пельтье	87
Г л а в а IV. Гальваномагнитные и термомагнитные эффекты в полупроводниках со стандартной зоной	90
§ 16. Примесная проводимость. Кинетические эффекты в слабом магнитном поле	94
§ 17. Примесная проводимость. Кинетические эффекты в сильном магнитном поле	104
§ 18. Смешанная проводимость. Кинетические эффекты в слабом магнитном поле	107
§ 19. Смешанная проводимость. Кинетические эффекты в сильном магнитном поле	111
§ 20. Кинетические эффекты при учете смешанного механизма рассеяния	113

Глава V. Гальваномагнитные и термомагнитные эффекты в полупроводниках со сферической нестандартной зоной	124
§ 21. Кинетические эффекты в отсутствие магнитного поля	125
§ 22. Кинетические эффекты в слабом магнитном поле	130
§ 23. Кинетические эффекты в сильном магнитном поле	132
§ 24. Кинетические эффекты в полупроводниках в трехзонном приближении	135
§ 25. Определение основных параметров вырожденных полупроводников	139
Глава VI. Кинетические эффекты в полупроводниках со многими минимумами	145
§ 26. Решение кинетического уравнения для эллипсоидальной поверхности постоянной энергии	146
§ 27. Тензоры проводимости германия и кремния	148
§ 28. Анизотропия кинетических эффектов в поперечном магнитном поле	153
§ 29. Анизотропия кинетических эффектов в продольном магнитном поле	156
§ 30. Кинетические эффекты в теллуристом висмуте	161
Глава VII. Квантовая теория гальваномагнитных явлений	166
§ 31. Движение электрона в однородном магнитном поле. Уровни Ландау	166
§ 32. Химический потенциал и критерий вырождения электронов проводимости в квантующем магнитном поле	173
§ 33. Поперечное магнетосопротивление. Осцилляции Шубникова—де Гааза	179
§ 34. Поперечное магнетосопротивление в полупроводниках с нестандартной зоной	195
§ 35. Продольное магнетосопротивление в полупроводниках	207
§ 36. Магнетофононные осцилляции в полупроводниках	213
Глава VIII. Квантовая теория термомагнитных явлений	232
§ 37. Продольные термомагнитные эффекты в полупроводниках в квантующем магнитном поле	233
§ 38. Термоэдс в поперечном квантующем магнитном поле	238
§ 39. Квантовая теория эффекта Нернста—Эттингсгаузена в полупроводниках	244
Приложение А	258
Приложение Б₁	259
Приложение Б₂	260
Приложение В	261
Приложение Г	262
Приложение Д	270
Литература	292

Бахрам Мехрали оглы Аскеров

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

*Утверждено к печати
Институтом полупроводников
АН СССР*

Редактор издательства *А. Л. Иванова*
Технический редактор *А. В. Смирнова*
Корректоры *Г. А. Александрова* и *К. И. Видре*

Сдано в набор 1/VIII 1969 г. Подписано к печати 5/VI 1970 г.
Формат бумаги $60 \times 90^{1/16}$. Бумага № 1. Бум. л. $9^{1/2}$. Печ. л.
19 = 19 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 20.01. Изд. № 3979. Тип. зак.
№ 384. М-09859. Тираж 5200.

Цена 1 р. 60 к.

Ленинградское отделение издательства «Наука»
Ленинград, В-164, Менделеевская лин., д. 1

1-я тип. издательства «Наука». Ленинград, В-34, 9 линия, д. 12