

Киттель Чарльз

**Введение в физику твердого
тела**

Учебное пособие по физике

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 37-053.2
ББК 74.27я7
К45

К45 **Киттель Чарльз**
Введение в физику твердого тела: Учебное пособие по физике / Киттель Чарльз – М.: Книга по Требованию, 2012. – 789 с.

ISBN 978-5-458-33656-7

В книге содержатся основные сведения из области физики твердого тела - металлов и сплавов, полупроводников, диэлектриков, знание которых необходимо для широкого круга инженерно-технических работников. Приведенные в книге данные лежат в основе работ по созданию новых типов электронных приборов, специальных сплавов, магнитных, изоляционных и прочих твердых материалов для атомной техники, ракетных двигателей, электроники и т.д. В основу книги положен курс лекций, которые автор ряд лет читает в Калифорнийском университете.

ISBN 978-5-458-33656-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2012

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2012

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ОТ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Настоящую книгу и ее автора, американского физика Ч. Киттеля, нет нужды подробно представлять нашим читателям, поскольку первые два ее издания уже выходили в русском переводе (в 1957 и в 1962 гг.). Хорошо известны другие книги автора: «Квантовая теория твердых тел» (русский перевод вышел в 1967 г.), «Элементарная статистическая физика» (1960 г.), «Статистическая термодинамика» (1977 г.) и, наконец, оригинальный курс общей физики, подготовленный в Калифорнийском университете в Беркли (США) под руководством Ч. Киттеля и при его непосредственном участии (имеется в русском переводе). Все эти издания, отражающие опыт одного из лучших вузов США, в силу их высоких научных достоинств приобрели заслуженную популярность у студентов, преподавателей вузов и молодых научных работников. Видимо, нелишне также напомнить о том, что автор — крупный специалист в области физики твердого тела, хорошо известен нашим физикам и инженерам по своим оригинальным исследованиям, особенно по теории магнитных явлений.

Настоящий перевод сделан с четвертого американского издания «Введения в физику твердого тела». Книга была значительно переработана автором уже в третьем издании (появились новые главы и разделы, около 300 новых рисунков и фотографий, освежены данные в таблицах и библиография). В четвертом издании, как сообщает автор в своем предисловии, текст третьего издания подвергся дальнейшей модернизации, в ходе которой почти половина текста третьего издания была написана заново, добавлено еще 140 новых иллюстраций, появились новые таблицы, литература и т. д. Таким образом, по сравнению со вторым изданием (русский перевод вышел в 1962 г.) мы имеем практически полностью новую книгу. Сохранился лишь общий план построения, тематическая последовательность изложения материала. При переработке автор учел критические замечания своих коллег и сотрудников по Калифорнийскому университету и, что очень важно, студентов — слушателей курса, читаемого автором в этом университете в течение многих лет. Этот курс лежал в основе книги, и, как выразился автор, «обратная связь» с аудиторией во многом способствовала совершенствованию изложения материала.

Хотя объем книги по сравнению с предыдущими изданиями значительно вырос, он тем не менее оставался «ограниченным сверху» программой лекционного курса и требованиями издательства, а поскольку число научных

фактов, новых идей и открытий все возрастало, то автору пришлось опустить ряд вопросов, которые были освещены в предыдущих изданиях. К их числу относятся, например, термоэлектронная эмиссия, так называемый аномальный спин-эффект в металлах, процессы рекомбинации и диффузии в полупроводниках, ионная поляризуемость диэлектриков и др.

Разумеется, невозможно в рамках однотомного учебного курса изложить такой ныне столь обширный предмет, как физика твердого тела. Тем не менее жаль, что в книге их нет — этих опущенных разделов.

Перевод книги дается полностью, без каких-либо сокращений или изменений. При этом по ряду причин пришлось отказаться от попыток ее дальнейшей модернизации в русском издании, даже в рамках редакционных примечаний и библиографических дополнений. Кстати, в этом и не было особой необходимости. Те упоминаемые автором книги и сборы, которые имеются в русском переводе, заменены в библиографии на советские издания.

Книга содержит обширный иллюстративный материал, представляющий существенный интерес. Часть этого материала подобрана из источников, которые не вошли в список литературы, а часть предоставлена автору различными учеными специально для данного издания книги. В этих случаях мы в подписях к иллюстрациям воспроизводим по оригиналу фамилии лиц, которых Ч. Киттель с благодарностью отмечает как авторов данных иллюстраций.

Главным достоинством книги является последовательно проводимый, внимательный и глубокий анализ микроскопического механизма физических явлений в твердых телах, убедительно и умело сочетаемый с адекватными средствами арсенала теоретической физики. Эта сторона изложения, четко наметившаяся в предыдущих изданиях, в настоящем издании значительно усовершенствована. Это именно тот фундамент, который необходим начинающим специалистам для сознательного и целеустремленного продвижения в науке, для быстрого и эффективного анализа бесчисленных приборных, технических и технологических проблем, решение которых овеществляет на практике научные открытия и достижения.

Можно надеяться, что настоящая книга будет встречена с интересом нашими читателями, избравшими своей специальностью научные исследования и применения одной из самых практических наук нашего времени — физики твердого тела.

А. Гусев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга содержит элементарное изложение основных разделов физики твердого тела. Она написана в качестве учебника физики твердого тела и материаловедения для студентов старших курсов естественнонаучных и инженерных факультетов и для начинающих самостоятельную работу специалистов. Необходимым фундаментом книги является курс современной атомной физики.

Физика твердого тела сводится, в сущности, к установлению связи между свойствами индивидуальных атомов и молекул и свойствами, обнаруживаемыми при объединении атомов или молекул в гигантские ассоциации в виде регулярно-упорядоченных систем — кристаллов. Эти свойства можно объяснить, опираясь на простые физические модели твердых тел. Реальные кристаллы и аморфные твердые тела значительно сложнее, но эффективность и полезность простых моделей едва ли можно переоценить.

При подготовке четвертого издания примерно половина текста третьего издания была написана заново, при этом было добавлено 140 новых иллюстраций. Основные направления изменений сводятся к следующим.

1. Параллельно с гауссовой системой единиц СГС введена международная система единиц СИ. В результате те разделы, которые первоначально были написаны с использованием лишь единиц системы СГС, стали, так сказать, двуязычными. Необходимые в связи с этим пояснения даются ниже. Заметим попутно, что система СИ в основном совпадает с известной практической системой единиц МКС.

2. В виде новых разделов или в резюме к главам или в задачи включены: описание твердотельных лазеров, джозефсоновских переходов и переходов Мотта, квантования потока, теории ферми-жидкости, зинеровского туннелирования, эффекта Кондо, геликонов и некоторых применений магнитного резонанса. Диэлектрический формализм вводится в качестве единого подхода при трактовке распространения электромагнитных волн, оптических фононов, плазмонов и при трактовке экранирования и поларитонов.

3. Главы о дифракции в кристаллах, энергетических зонах, сверхпроводимости и магнитном резонансе в значительной мере переработаны. При этом во всех случаях предпринимались усилия к тому, чтобы сделать изложение более ясным, понятным, наглядно иллюстрированным, наиболее отвечающим интересам студентов. Я старался прояснить все трудные вопросы, с которыми ко мне обращались студенты.

4. Таблицы числовых характеристик твердых тел значительно расширены и пересмотрены. Сорок таблиц, содержащих наиболее часто используемые данные, перечислены (с указанием страниц книги) в отдельном списке после оглавления.

Важные результаты, полученные в исследованиях энергетических зон, сверхпроводимости, магнитного резонанса и в разработке методов, основанных на рассеянии нейтронов, освещены в тексте в тех же разделах, где эти вопросы излагались в третьем издании. Особое внимание уделено элементарным возбуждениям — фононам, плазмонам, поляронам, магнонам и экситонам.

Почти каждое важное уравнение или соотношение выписывается как в системе СИ, так и в системе СГС (если они имеют различный вид). Исключения из этого правила допускаются только в подписях под рисунками, в тексте Приложений (в конце книги), в резюме к главам и в тех разделах, где переход от системы СГС к системе СИ сводится к тривиальной замене c на 1 или 1 на $1/4\pi\epsilon_0$. Числовые значения в таблицах даются в единицах, наиболее удобных для выражения соответствующей физической величины. Перед каждой главой дается ее содержание (по разделам с указанием страниц), а для некоторых глав за содержанием даны замечания и советы о том, как сделать параллельное использование обеих систем единиц наиболее простым и естественным. При решении задач, помещенных в конце каждой главы, выбор системы единиц предоставляется усмотрению читателя или преподавателя.

Я счел целесообразным добавить также кое-какие сведения по истории науки, поскольку физика твердого тела предоставляет много возможностей продемонстрировать непосредственное и весьма успешное применение квантовой теории к окружающему нас миру природы. Однако, опасаясь поверхностности при таких фрагментарных экскурсах, я часто вспоминал строки Хорхе Луиса Борхеа: «Сколько хорошего уже не принадлежит никому больше..., войдя уже в наш язык и в наши представления».

Принятая в этой книге последовательность изложения легко позволяет выбрать материал для односеместрового курса. Таковым может быть материал 1—11 глав с добавлением некоторых разделов из последующих глав или из других источников. Однако выбор вопросов, изложенных в этих главах, не следует рассматривать как попытку отразить современные области научной активности: ни один учебник не может сейчас отразить

весь диапазон творческой деятельности ученых. По вопросам, не затронутым в этой книге, читателю следует обращаться к обзорам, публикуемым в блестящей серии сборников «Физика твердого тела» («Solid State Physics», ed. by F. Seitz, D. Turnbull and N. Ehrenreich), где обычно дается также обширная библиография. По вопросам, освещаемым в этой книге, в литературе опубликовано, видимо, уже свыше 10 тысяч статей высокого научного качества, и все они вполне достойны быть упомянутыми. Я, однако, попытался выбрать лишь немногие, наиболее полезные и притом наиболее доступные для читателей, пользующихся английским языком. В переводах предыдущих изданий этой книги, вышедших на французском, немецком, испанском, японском, русском, польском, венгерском и арабском языках, обычно давались библиографические дополнения, содержащие работы, опубликованные на этих языках.

Более трудные или относительно трудоемкие задачи отмечены звездочкой. Буква e применяется для обозначения заряда протона: $e = 4,80 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ-ед. $= 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл. Крышечка («шляпка») над вектором, например \hat{k} , означает единичный вектор.

Подготовка этого издания оказалась возможной только благодаря помощи многих моих коллег и друзей. Я считаю необходимым указать хотя бы некоторых, так как мне не хватило бы места, чтобы упомянуть всех. Долг обязывает меня по данному изданию отметить следующих лиц: Т. Нагамия, В. Хейне, Д. Ф. Холкомб, Ч. Таунс, А. Верма, Ю. Эсман, Х. Трейбле, П. Монтгомери, К. Гшнейднер (мл.), Х. Фредерикс, У. Кенциг, Ф. Энгель, К. Куэйт, Ч. Фонг, П. Анготт, Дж. Томас, Р. Деблуга, Х. Стенли, С. Геллер, Р. Кап, Р. Грей, П. Ричардс и Л. Фалликов. У. Маклин и Маргарет Геллер просмотрели часть рукописи, а Роберт Клейнберг просмотрел ее целиком.

Я подозреваю, что миссис Мадлен Мур сумела бы подготовить это издание и без меня, но совершенно уверен, что я сам не справился бы с этим делом без ее помощи. Роберту Гоффу я обязан за наглядные и великолепно изготовленные рисунки в этой книге. Я весьма признателен Доналду Денеку и Герхарду Брамсу за постоянное сотрудничество и ценные советы.

В предисловии к третьему изданию я отмечал и благодарил еще ряд лиц; воспроизвожу соответствующую часть этого предисловия в том виде, как это там было изложено.

«Рукопись в целом написана под сильным влиянием обстоятельной критики со стороны Мэрвина Коэна и Майкла Милмена. Им я обязан очень многим. Все рисунки, один за другим, были любезно проверены Чинг Яо Фонгом и Джозефом Риусом, а задачи — Ленардом Сендером. Отдельные главы рецензировали Адольф Пабст, Чарлз Смит, Дэвид Темплтон, Реймонд Бауэрс, Сидни Эйбрахамс, Ирл Паркер, Дж. Томас и М. Тинкхэм; Уолтер Маршалл любезно предоставил мне на выбор обширный

материал по результатам нейтрон-дифракционных исследований. В подготовке вводных исторических справок мне помогали Адольф Пабст, П. Эвальд, Элизабет Хафф, Мюриэл Киттель, Джорджиана Тайтес и работники физической библиотеки Высшей нормальной школы (Париж).

За квалифицированные советы при отборе экспериментальных данных для таблиц, содержащих числовые данные, я искренне признателен Лио Брюэру, Р. Бозорту, Норману Филлипсу, Берду Маттиасу, Вере Комптон, М. Тинкхэму, Чарлзу Смиту, Э. Беретейну, Ф. Джона и С. Стресслеру.

Иллюстрации получили свою окончательную форму благодаря Феликсу Куперу при предварительной помощи Эллис Майерс. Специальной благодарности достойны те, кто предоставил мне отдельные фотографии и рисунки; в их отборе неоценимую помощь оказали мне Роберт ван Нордстранд, Т. Джебел, У. Перриш, Бетси Берлсон, И. Темплтон и Дж. Томас, а также Х. Макскимен, Х. Уильямс, Р. Деблуа, Э. Хан, А. фон Хиппель, Б. Брокхауз, Р. Миллер, Р. Ле Кро, Э. Мюллер, П. Сван, Дж. Бэкон, Дж. Джордон и Алан Холден.»

Беркли, Калифорния

Ч. Киттель

Главы 1 и 2 об анализе структуры кристаллов относятся к числу фундаментальных. Каждое понятие или положение, изложенное в главе 2, существенно используется в главах о зонной энергетической структуре и полупроводниках. Особенно это относится к понятию обратной решетки и зонам Бриллюэна. Общий метод, развитый в Приложении А для дифракции рентгеновских лучей, также изложен в главе 9 в качестве основы для построения теории электронных энергетических зон. Главу 4 при первом чтении можно опустить. В главах 4 и 5 рассмотрены скорость, квантование и взаимодействие упругих волн в кристаллах; к числу вопросов, затронутых в этих главах и используемых позднее, относится определение числа состояний в зоне Бриллюэна и числа состояний на единичный энергетический интервал.

Главы 7—10 посвящены электронам в металлах. Главы 9 и 10 об энергетических зонах — наиболее важные главы книги, здесь способ изложения является несколько новым для учебника, но зато отражает современный уровень исследований в этой области. Центральным для понимания содержания этой главы является доказательство теоремы Блоха. Рассмотрение свойств дырок проводится здесь с таким расчетом, чтобы подготовить читателя к работе над изучением главы 11 о полупроводниках.

Глава 12 о сверхпроводимости содержит основные экспериментальные факты, освещаемые

с точки зрения теории БКШ, но на принятом уровне изложения невозможно дать содержательное изложение самой этой теории и поэтому автор рекомендует обращаться к другой своей книге «Квантовая теория твердых тел» или к книге Дж. Займана «Принципы теории твердого тела».

Главы 13—17 посвящены диэлектрическим и магнитным свойствам твердых тел. Глава 18 посвящена экситонам и оптическим свойствам; в ней также содержится описание твердотельных лазеров.

Последние две главы (19 и 20) касаются в основном дефектов в твердых телах и могут быть прочитаны на любом удобном этапе изучения материала книги.

Г л а в а 1. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ

Периодические атомные ряды	20
Трансляции и кристаллические решетки (21). Набор операций симметрии (22). Базис и кристаллическая структура (23). Прimitives ячейки (24).	
Основные типы кристаллических решеток	27
Двухмерные кристаллические решетки (29). Трехмерные кристаллические решетки (33).	
Положение и ориентация плоскостей в кристаллах	37
Положение узлов элементарной ячейки	40
Простые кристаллические структуры	40
Структура хлористого натрия (40). Структура хлористого цезия (42). Гексаго- нальная структура с плотной упаковкой (43). Структура алмаза (45). Куби- ческая модификация структуры сульфида цинка (46). Гексагональная модифи- кация структуры сульфида цинка (47).	
Реальные кристаллические структуры	49
Ось симметрии пятого порядка в кристаллах (49). Произвольная упаковка ато- мов и полипиримид (52). Справочники по структуре кристаллов (53).	
Резюме	56
Задачи	57
Литература	770

Физика твердого тела, как наука, родилась в начале нашего века в связи с развитием атомной физики. Она занимается главным образом изучением кристаллических твердых тел и поведением электронов в этих телах. Сто лет назад кристаллы изучались только с точки зрения их внешней формы и симметричных связей между различными коэффициентами, описывающими физические свойства кристаллов. После открытия дифракции рентгеновских лучей и публикации серии простых и весьма успешных работ с расчетами и предсказаниями свойств кристаллических веществ началось фундаментальное изучение атомной структуры кристаллов.

Кристаллы многих минералов и драгоценных камней были известны и описаны еще несколько тысячелетий назад. Одна из наиболее ранних зарисовок кристаллов содержится в китайской фармакопее одиннадцатого века нашей эры. Кристаллы кварца из императорской короны, сохранившиеся с 768 года нашей эры, находятся в Сёсоне, сокровищнице японских императоров в Нара. Кристаллом называли вначале только лед, а затем и

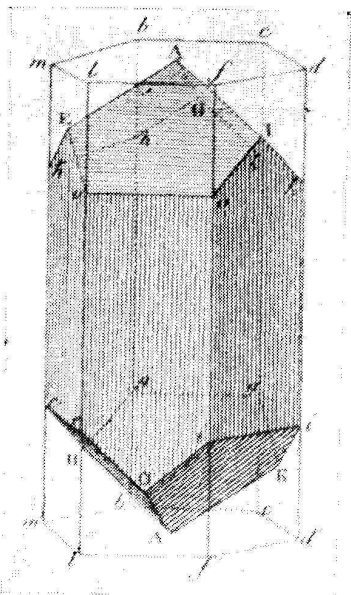


Рис. 1.1. Изображение кристалла, взятое из старого трактата по минералогии. (Гаюи.)

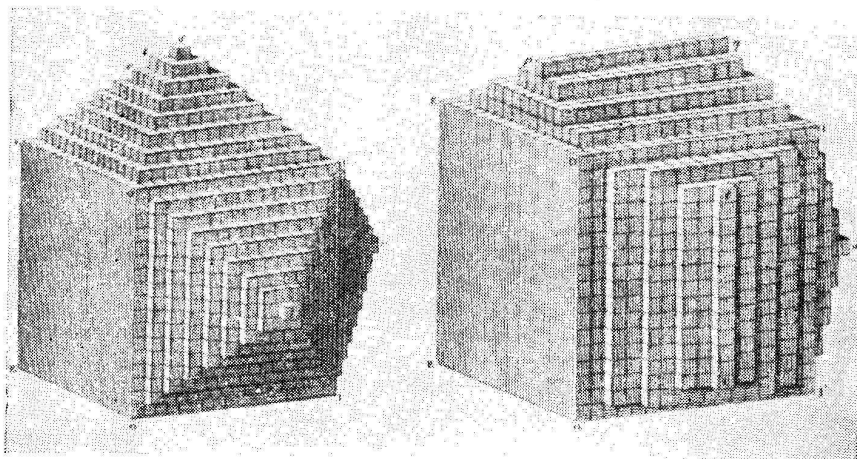


Рис. 1.2. Связь внешней формы кристаллов с формой элементарных структурных элементов. Структурные элементы одинаковы в случаях, изображенных слева и справа, но развитие получают разные грани. (Из атласа к книге Гаюи [3].)