537.311.33(049.3)

СПЕКТРЫ И ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

И. М. Цидильковский. Электроны и дырки в полупроводниках (Энергетический спектр и динамика). М., «Наука» (Главная редакция физико-математической литературы), 1972, 640 с.

В монографии И. М. Цидильковского «Электроны и дырки в полупроводниках» излагаются методы и результаты теоретических и экспериментальных исследований электронных энергетических спектров полупроводников. Большое внимание уделено важнейшей характеристике энергетического спектра и динамики носителей заряда — эффективной массе. Рассмотрение всех затронутых в книге вопросов проведено с исключительной полнотой — от основ зонной теории до наиболее современных данных, причем подробно разъясняются экспериментальные и теоретические методы, с помощью которых эти данные получены. Появление мощных экспериментальных методов и развитие вычислительной техники привели за последние годы к большим успехам в области исследования зонных структур. Многочисленные результаты разбросаны в различных периодических изданиях в виде статей и редких обзоров. Читатели, по существу, не имели книги, излагающей на современном уровне этот ключевой вопрос физики полупроводников. Именно такой книгой является рецензируемая монография И. М. Цидильковского. Можно только пожалеть, что она не была издана ранее.

Книга рассчитана на физиков-экспериментаторов. Этим обусловлена одна из главных ее отличительных особенностей — физичность и наглядность изложения. В то же время в ней не обойдены ни трудные теоретические вопросы, ни кропотливые расчетные приемы. Поэтому она представляет значительный интерес и для теоретиков. Круг ее читателей очень широк — преподаватели вузов и студенты старших курсов, научные сотрудники (от молодых до самых квалифицированных) и инженеры, работающие с полупроводниковыми материалами. Книга, несомненно, может быть положена в основу ряда спецкурсов, читаемых на полупроводниковых кафедрах университетов и других вузов.

Введение к монографии следует признать весьма удачным. Оно вводит читателя в круг основных идей современной физики полупроводников, показывая, что проблема энергетического спектра носителей заряда и, в частности, вопрос об эффективных массах действительно являются ключевыми.

Изложение основ зонной теории в первой главе (несмотря на наличие такой *вступительной главы во многих других книгах*) получилось *свежим, нестандартным*. Соблюдены разумные пропорции между математической строгостью и физическим содержанием. Упор сделан на физическое обоснование и истолкование упрощающих приближений. С исключительной ясностью прослежен путь перехода от общей многоэлектронной постановки задачи к одноэлектронному приближению. Тщательно разобраны предельные случаи слабой и сильной связи. Отметим в особенности применение метода сильной связи к вырожденным состояниям. Описание интерполяционной схемы Слэтера — Костера в разделе о сильной связи (а не в гл. 2) вполне уместно. Будучи достаточно краткой, гл. 1 отличается в то же время и полнотой, и ювелирным подходом к тонким вопросам. Так, в ней показано, что блоховский множитель $u_{\mathbf{k}}$, в отличие от полной волновой функции $\psi_{\mathbf{k}}$, не является периодическим в обратной решетке.

Вторая глава посвящена методам расчета структуры энергетических зон. Следует признать, что в широком фронте отечественных работ по физике твердого тела вообще и по физике полупроводников в особенности это самое слабое место. Возник разрыв между потоком экспериментальных работ, с одной стороны, и глубокими теоретическими исследованиями, — с другой. Связующее звено в виде машинных методов зонных расчетов представлено у нас пока всего несколькими небольшими группами. В отечественной *монографической литературе методы расчета зонных спектров практически* не отражены. Вторая глава книги И. М. Цидильковского восполняет этот пробел. В ней собраны и скрупулезно описаны все наиболее употребительные методы расчета энергетических зон, выявлены их возможности, трудности, ограничения. Особо следует отметить подробное изложение впервые в отечественной литературе **kp**-метода. Этот метод, дающий аналитические выражения для законов дисперсии, оказался в то *же время полезным как интерполяционный в машинных расчетах. Для состояний*, лежащих вблизи краев энергетических зон (в том числе для вырожденных состояний; см. § 13), **kp**-метод наиболее точный и удобный. В книге, посвященной главным образом структуре краев зон, ему заслуженно уделено большое внимание — освещены работы Зейтца, Шокли, Дрессельхауза — Кипа — Киттеля, Кейна, Кардоны. Можно надеяться, что пропаганда расчетных методов будет содействовать их более широкому

внедрению в практику. Большим подспорьем для читателей-экспериментаторов являются страницы, на которых сообщаются необходимые сведения из теории симметрии (§ 6).

В третьей главе подробно описаны структуры энергетических зон наиболее изученных полупроводниковых материалов. Начинается глава с обстоятельного рассмотрения зонных структур германия и кремния. В основу этого рассмотрения положены качественные соображения двоякого рода. В соответствии с известной идеей А. Ф. Иоффе убедительно показана роль, которую играет в генезисе зон гомеополярный характер химической связи в этих веществах. С другой стороны, читателю предоставлена возможность проследить, как влияет симметрия кристаллов на энергетический спектр электронов и дырок и на их волновые функции. Использованы все необходимые литературные данные — от известной работы Е. Кейна по германию и кремнию до мало известных результатов К. Я. Штивельмана (необычный вид изоэнергетических поверхностей тяжелых дырок в кремнии; рис. 39). Полупроводники со структурой цинковой обманки рассмотрены kp-методом с полным учетом соображений симметрии. В своем изложении И. М. Цидильковский следует здесь другой широко известной статье Кейна — по сурьмянистому индию. Существенной заслугой автора монографии является исчерпывающее изложение теории Кейна; это, если так можно выразиться, развернутая «кейниана». Для всех рассмотренных полупроводниковых материалов автором собраны наиболее достоверные литературные данные о зонных параметрах. Этот огромный и кропотливый труд уже заслужил признание читателей. Нам хочется особо отметить увлекательно изложенную историю открытия зонной структуры серого олова и халькогенидов ртути. Это яркий рассказ о том, как накапливающиеся экспериментальные данные навязали теории своеобразную модель Гроувса — Пола.

В четвертой главе «Электрон в возмущенном периодическом поле» дано фундаментальное изложение метода эффективной массы. Довольно подробно рассмотрен вопрос о температурной зависимости запрещенного зазора и эффективной массы электронов, которому обычно в монографиях не уделялось внимания. Изложение метода Кона — Латтинжера разбито на две части: в одном параграфе дано каноническое преобразование для эффективной массы, в следующем — физические соображения и результаты при наличии примесей (как для невырожденной, так и для вырожденной зонных структур) и внешнего магнитного поля. Такое разбиение облегчает усвоение метода, содержащего довольно много математических выкладок. Большое внимание уделено динамическим свойствам электронов. Весьма наглядно вводится понятие о дырке; то же можно сказать и об описании динамики дырок. Наглядность при этом нигде не приводит к потере строгости. Особняком стоит в этой главе, да и во всей книге, параграф о сильно легированных полупроводниках. Параграф этот весьма полезен, так как в нем описаны основные идеи и ряд результатов теории (без деталей математических выкладок), подробное изложение которой имеется лишь в сравнительно трудно доступных изданиях.

Новизна и энциклопедичность книги И. М. Цидильковского в вопросе об эффективных массах особенно ярко выступают в пятой главе «Эффективные массы для конкретных законов дисперсии». По существу, весь материал этой главы впервые появляется в монографиях как отечественных, так и зарубежных. Наряду с эффективными массами плотности состояний и проводимости для каждого вида закона дисперсии, встречающегося в полупроводниках, особенно подробно рассмотрена циклотронная эффективная масса. Основательно разобраны отклонения от стандартной формы энергетических зон как в сторону непараболичности, так и в сторону анизотропии. Венчает эту главу параграф о работах Х. Крёмера по отрицательным эффективным массам. Этот экзотический материал изложен в книге со вкусом и с большой полнотой: приведены конкретные примеры носителей заряда (дырок) с отрицательными массами, описаны циклотронный резонанс и идея усилителя (немага) на таких носителях. Высокий теоретический уровень книги проявляется, в частности, во включении в пятую главу специального параграфа о влиянии высших зон на эффективные массы электронов и дырок и на их g-факторы.

Обсуждение экспериментальных методов исследования зонной структуры сосредоточено в последней главе монографии. Автор активно работает в этой области; результаты работ И. М. Цидильковского и его сотрудников широко известны у нас и за рубежом. Таким образом, часть материала читатель получает здесь «из первых рук». Шестая глава представляет собой как бы отдельную книгу об электрофизических свойствах полупроводников и о том, как исследование этих свойств позволяет устанавливать вид и параметры энергетических зон. Особенно хорошо и подробно рассмотрены осцилляционные явления (в первую очередь — осцилляции Шубникова — де Гааза и магнитофононные осцилляции). Именно эти эффекты, наблюдаемые в сильных магнитных полях, привлекали в последние годы наибольшее внимание автора книги. Из оптических методов в книге рассмотрены все те, которые позволяют определить эффективные массы, расщепления и другие параметры краев зон (в частности, описаны и новые методы — электро- и пьезооптические). Не отраженные в книге

методы исследования зонной структуры в широком энергетическом интервале (ультрафиолетовая и рентгеновская спектроскопия, различные виды электронной эмиссии) не обладают пока достаточной точностью для получения информации о краях зон. Что же касается исследования краев зон, а именно это является предметом книги,— то обзор экспериментальных методов отличается полнотой. Среди новых методов, впервые рассматриваемых в отечественной монографической литературе, заслуживает отдельного упоминания модуляционная оптическая спектроскопия. Этот метод позволяет с высокой точностью определять различные расщепления зон и коэффициенты, характеризующие чувствительность зонной структуры к внешним воздействиям (электрическому и магнитному полям, давлению, температуре).

К сожалению, в рецензируемой книге имеется большое число досадных опечаток и мелких неточностей, являющихся результатом недостаточного редактирования. Так, например, на стр. 24 утверждается, что константа C в формуле (1.8) не влияет на движение ионов, тогда как она зависит от координат ионов. На стр. 81 говорится, что величины $m_\alpha = (1/m_\alpha)^{-1}$ «не являются компонентами тензора» вместо утверждения, что они «также являются компонентами тензора». На рис. 76 изображение дырки перемещается под действием электрического поля в направлении, противоположном тому, которое следует из уравнения движения. И. М. Цидильковский проделал большую работу по выявлению погрешностей текста, некоторая часть которых опубликована в письме автора в ФТП (7, 1858, 1973).

Представляется, несомненно, целесообразным переиздать эту во многом уникальную книгу, очень быстро исчезнувшую с прилавков магазинов (тираж 6600 экземпляров). При переиздании было бы весьма желательно сделать следующие дополнения:

1) посвятить отдельный параграф зонной структуре важных для практики смешанных кристаллов типа «теллурид ртути — теллурид кадмия», у которых наблюдается непрерывный переход при изменении состава от бесщелевого к щелевому состоянию;

2) дополнить параграф о теллуре и селене появившимися новыми данными о зонных параметрах;

3) ввести в книгу параграф о материалах со структурой вюрцита, химические связи в которых подобны связям в структуре сфалерита.

Актуальность книги будет сохраняться и даже возрастать, если к моменту переиздания в нее будут внесены как указанные выше дополнения, так и те, которые будут соответствовать быстро накопляющимся экспериментальным и теоретическим знаниям.

Л. Э. Гуревич, В. П. Жузе