1980 г. Март *Том 130, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

БИБЛИОГРАФИЯ

537.311.33(049)

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников.—М.: Наука. Гл. ред. физ.-матем. лит-ры, 1979.— 413 с.

Исследование неупорядоченных материалов, частный случай которых представляют собой легированные полупроводники, занимает одно из центральных мест в современной физике конденсированной среды. Тому есть немало достаточно очевидных причин — как принципиального, так и прикладного характера.

Экспериментальные и теоретические работы по физике легированных полупроводников ведутся уже немало лет с неослабевающей интенсивностью. Появилось и несколько книг и обзоров на эту тему (в том числе и в отечественной литературе). Рецензируемая книга удачно их дополняет. Авторы ее — известные в своей области специалисты. Ими опубликован ряд интересных оригинальных работ, привлекших внимание как теоретиков, так и экспериментаторов (отметим, в частности, исследования по теории протекания и по теории сильно легированных и сильно компенсированных материалов). Поэтому появление книги представляется вполне естественным и закономерным.

Книга состоит из двух не равных по величине частей, посвященных слабо и сильно легированным полупроводникам.

Как говорят сами авторы, она «... задумана не только как монография для специалистов, но и как продолжение обычного курса теории полупроводников, охватывающее новый круг вопросов». В соответствии с этим первая часть предваряется разделом, содержащим изложение некоторых основных методических приемов и идей, широко используемых в дальнейшем. Это — гл. 1, посвященная энергетическим уровням, создаваемым отдельными мелкими донорами или акцепторами, а также § 14, в котором дается сводка ряда экспериментальных данных по примесной проводимости рассматриваемых материалов. В сущности, все содержание гл. 1 лучше всего характеризуется словами «метод эффективной массы». Авторы рассматривают его довольно подробно и «физично», не без основания отсылая читателей за строгими доказательствами к другим книгам, более специального характера. В принципе, против такой манеры изложения возражать, видимо, нельзя (рецензенту она кажется совершенно правильной). К сожалению, перечень дополнительной литературы, рекомендуемой авторами для дальнейшего ознакомления с вопросом, недостаточно полон. В самом деле, очень хорошие обзоры В. Кона и Ф. Бассани и др. не переведены на русский язык и, видимо, не всем возможным читателям в равной мере доступны, хотя бы по соображениям сравнительно малой своей распространенности. Казалось бы, естественным было обратить внимание читателей и на учебное пособие А. И. Ансельма «Физика полупроводников», а также на монографию С. И. Пекара «Исследования по электронной теории ионных кристаллов». Указание на последнюю книгу было бы тем более обоснованным, что «метод эффективной массы» был предложен ее автором.

В связи с этим следует с сожалением заметить, что подбор литературных ссылок в книге вообще не всегда понятен. Так, в гл. 2 при обсуждении энергетического спектра одномерных неупорядоченных систем почему-то отсутствует ссылка на известную работу Л. А. Пастура (1975 г.); в гл. 2 никак не упомянуты его же результаты (1972 г.), относящиеся к выводу точных (без квазиклассического приближения!) асимптотических формул для хвостов плотности состояний в случайных полях (в том числе в сильно легированных полупроводниках). В гл. 4, там, где говорится о приоритетных вопросах (с. 125), пропущена ссылка на статью Дж. Займана (1968 г.); в последней, насколько известно рецензенту, впервые было произнесено слово «перколяция» (протекание) в связи с задачами кинетики неупорядоченных систем (между тем, эта работа цитируется в другой связи в гл. 5). Число подобных примеров можно было бы и умножить.

Гл. 2 посвящена одному из важнейших и вместе с тем труднейших вопросов современной теории неупорядоченных систем — так называемой андерсоновской локализации. Трудность предмета, видимо, оправдывает здесь несколько более сложный, чем в большей части книги, характер изложения. Скорее, как это ни парадоксально, следовало бы упрекнуть авторов за недостаточно подробное изложение одного важного пункта. Именно, во введении к рассматриваемой главе в нескольких фразах рассматривается вопрос об определении плотности состояний. Как известно, это понятие употребляется в литературе в разных смыслах. Авторы не только не упоминают об этом, но и не указывают, что интересующая их величина определяется как результат полного усреднения по всем конфигурациям примеси (или, что эквивалентно,— как характеристика оптимальной конфигурации). Между тем, из дальнейшего текста явствует, что имеется в виду именно такое определение (в этом случае иногда говорят о сглаженной плотности состояний). Поскольку, однако, это уже не оговорено, дальнейшее утверждение о свойствах плотности состояний в известной мере лишается точного содержания; фактически оно правильно или неправильно в зависимости от того, что́ именно имеется в виду. Рецензенту казалось бы, что плотность состояний — эта, по словам авторов и по общему признанию, важнейшая характеристика примесной зоны — заслуживала бы более внимательного обсуждения. Оно, кстати, было бы вполне в интересах читателей — «... экспериментаторов, аспирантов и инженеров, знающих основы физики твердого тела» (с.5). Здесь проявляется один из немногих существенных, на наш взгляд, недостатков книги: в некоторых случаях (особенно в части второй) истинная сложность и глубина задачи должным образом не отмечаются, а одни лишь рассуждения «на пальцах» (сами по себе, разумеется, полезные и необходимые, если их дополнить хотя бы указанием на имеющиеся сложности) могут создать впечатление ложной простоты, там, где ее на самом деле нет. Этот недостаток тем более обиден, что авторы умеют доступно излагать далеко не простые вещи, не скрывая при этом их сложности. Убедительный пример тому дает прекрасно в педагогическом отношении написанная гл. 5, посвященная теории протекания (по мнению рецензента, эта глава — лучшая в книге). Авторы внесли серьезный вклад в развитие этой теории; вместе с тем характер изложения материала в данной главе почти лишен оттенка субъективности.

Гл. 3 и 4 посвящены соответственно структуре примесной зоны и элементарной теории прыжковой проводимости слабо легированных полупроводников. В целом эти главы, особенно четвертая, кажутся написанными довольно удачно, и материал, в них содержащийся, бесспорно будет полезен читателям разных категорий.

В гл. 6 и 7 обсуждается прыжковая проводимость слабо легированных полупроводников в зависимости от концентрации примесей, деформации кристалла и магнитного поля. Полнота исследования и систематическое сопоставление теоретических результатов с опытом делает эти главы весьма полезными. Хорошее впечатление оставляют также гл. 8 и 9, посвященные соответственно энергии активации прыжковой проводимости и проводимости с переменной длиной прыжка. Отметим особенно § 31, в котором (в основном на основании оригинальных работ одного из авторов) рассматривается важная и интересная задача о прыжковой проводимости тонких аморфных пленок. Вместе с тем несколько разочаровывает некоторая краткость и неполнота изложения материала в последнем параграфе гл. 9 (§ 32). Речь идет о далеко не тривиальной и до конца еще не решенной проблеме предэкспоненциального множителя в формуле для прыжковой проводимости.

Вторая часть книги (гл. 11—13) посвящена сильно легированным полупроводникам. Гл. 11 (и § 42 гл. 12) мало что добавляют к уже имеющейся книжной литературе. Зато очень интересны основная часть гл. 12 и гл. 13. В гл. 12 довольно подробно описывается метод оптимальной флуктуации в применении к задаче о примесном полупроводнике. Изложение основано на оригинальных работах авторов, обобщивших метод И. М. Лифшица на случай систем заряженных частиц. С точностью до одной оговорки, которая будет ниже сделана, рассмотрение задачи о плотности состояний «просится» в учебник. Оговорка состоит в том, что не грех бы обсудить, в какой мере условие применимости основной аппроксимации, сводящейся, в сущности, к неравенству $Z \gg 1$, согласуется с условием применимости метода эффективной массы. В гл. 13 рассматриваются сильно легированные и сильно компенсированные полупроводники. Авторам книги принадлежит здесь ряд интересных и красивых результатов, нашедших себе применение в ряде экспериментальных работ. Центральное место здесь занимает представление о крупномасштабных флуктуациях потенциальной энергии электронов. Выдвинутое, по-видимому, впервые Фриче и вытекающее, как следствие, из некоторых общих теорем о существовании дискретных флуктуационных уровней, это представление было доведено авторами до полной физической «прозрачности» и использовано для интерпретации ряда экспериментальных данных.

Резюмируя все сказанное, следует высказать уверенность в том, что книга Б. И. Шкловского и А. Л. Эфроса появилась вовремя и окажется полезной.

В. Л. Бонч-Бруевич