

где  $A_1$  — постоянная. При  $\mathcal{E} \rightarrow 0$  это выражение (с учетом (10.1)) переходит в формулу (7.13). Поправка, определяемая вторым слагаемым в фигурных скобках в (10.3), оказывается осциллирующей функцией частоты света. Заметим, однако, что условия применимости последнего результата могут оказаться довольно жесткими. Дело в том, что, поднявшись достаточно высоко над нижним краем зоны проводимости, электрон получает возможность участвовать в ряде процессов рассеяния — как упругих, так и неупругих. В результате их рассматриваемое состояние электрона становится нестационарным, что приводит к «размазыванию» осцилляционных пиков коэффициента поглощения.

Как видно из формулы (10.2), коэффициент поглощения света в области  $\hbar\omega < E_g$  сильно зависит от разности  $E_g - \hbar\omega$ . Это позволяет, измеряя  $\gamma(\omega, \mathcal{E})^*$ , определять ширину запрещенной зоны. Такой способ применим и к «непрямым материалам»; там он дает ширину «прямой зоны», т. е. энергетическое расстояние между потолком валентной зоны и уровнем зоны проводимости, находящимися в той же точке зоны Бриллюэна. Формулы (10.1) — (10.3) позволяют также, зная  $E_g$ , определять приведенную эффективную массу.

## § 11. Модуляционная спектроскопия

Чувствительность рассмотренных в предыдущем параграфе методов исследования резко повышается, если модулировать постоянное поле сравнительно слабым переменным. При этом модулированной окажется и интенсивность света, прошедшего через образец или отраженного от него. Выделяя переменную составляющую интенсивности, мы получим сигнал, пропорциональный производной коэффициента поглощения (или отражения) по напряженности поля  $\mathcal{E}$ .

В сущности, не обязательно модулировать именно напряженность электрического поля. В принципе можно периодически варьировать любую величину, от которой зависит коэффициент поглощения (как в присутствии, так и в отсутствие постоянного поля). Выделяя переменную составляющую интенсивности прошедшего или отраженного света, мы найдем производную  $\gamma$  или  $R$  по этой величине. Эта идея лежит в основе метода модуляционной спектроскопии. Кроме электроотражения, используются еще следующие методики:

а) *Пьезоотражение*. Модулируется (например, акустически) механическое напряжение на образце. В результате периодически изменяются значения всех энергетических зазоров — ширины запре-

\*) Непосредственно измеряют чаще коэффициент отражения, вычисляя затем  $\gamma$  по формулам (1.23) и (1.11).

щенной зоны, расстояния между потолком валентной зоны и подзоной, отщепленной благодаря спин-орбитальному взаимодействию, и т. д. Исследование переменной составляющей интенсивности отраженного света дает в этом случае информацию о зависимости ширины запрещенной зоны и других величин от давления.

б) *Термоотражение*. Модулируется температура образца. При этом будут периодически изменяться и все энергетические зазоры (с разными, вообще говоря, коэффициентами). В результате получается информация о температурной зависимости названных величин.

в) *Оптическая модуляция отражения (фотоотражение)*. Эффект Келдыша—Франца имеет место в электрическом поле любого происхождения — лишь бы оно достаточно плавно изменялось в пространстве (т. е. могло рассматриваться как почти однородное). Это относится и к полю, возникающему вблизи поверхности благодаря изгибу зон. Величину его можно изменять, варьируя концентрацию носителей заряда вблизи поверхности. Последнее достигается оптической инжекцией, при которой электроны и дырки создаются сильно поглощаемым светом (не тем, отражение которого изучается). Исследования этого типа дают ту же информацию, что и электроотражение.

г) *Катодоотражение*. Идея этого метода та же, что и фотоотражения. Разница состоит в том, что теперь электронно-дырочные пары создаются пучком быстрых электронов («катодных лучей»).

д) *Модуляция длины волны*. При этом определяется производная от коэффициента отражения (поглощения) по частоте, что полезно при обнаружении критических точек. Действительно, согласно формулам (7.7) и (8.7) в критической точке производная  $dy/d\omega$  имеет резкий пик.

Подробное рассмотрение методов модуляционной спектроскопии и изложение результатов исследования, полученных таким путем, можно найти в книге [7].

## § 12. Магнетооптика

Влияние магнитного поля на оптические свойства полупроводника связано как с квантованием Ландау, так и с чисто классическими эффектами. С одним из магнетооптических явлений — диамагнитным резонансом — мы уже встречались в гл. IV. Отметим еще две группы эффектов.

а. *Магнетоплазменные эффекты*. Газ свободных носителей заряда в полупроводнике представляет собой частный случай плазмы — в целом нейтральной системы заряженных частиц (в монополярном материале нейтральность достигается за счет компенсирующего заряда примесей). Магнетоплазменными называют оптические эффекты, обусловленные влиянием некваंटующих магнитных