

При правильно выбранных значениях C_s выражение (9.9) хорошо описывает температурную и частотную зависимость коэффициента поглощения в германии и кремнии (вблизи порога). Частотная зависимость вида (9.9') наблюдалась в фосфиде галлия.

§ 10. Электрооптика

При наложении на образец постоянного и однородного электрического поля энергетический спектр носителей заряда претерпевает серьезные изменения (§ IV.6). Соответственно изменяются и спектры поглощения и испускания света полупроводником. Самое характерное их отличие от того, что наблюдается в отсутствие поля, ясно из рис. 4.8: при наложении постоянного и однородного электрического поля становятся возможными междузонные оптические переходы при частоте света, меньшей красной границы *). Это — переходы, неперпендикулярные в плоскости (z, E) . Они связаны с туннельным просачиванием электронов и дырок через запрещенную зону. Из рис. 4.8 видно, что энергия поглощаемого фотона $\hbar\omega$ тем меньше, чем на более далекое расстояние туннелирует электрон. Отсюда следует, что вероятность такого перехода, будучи отличной от нуля при любой частоте ω , должна все же быстро убывать с увеличением разности $E_g - \hbar\omega$. Расчет этой вероятности связан с довольно сложными вычислениями. Мы приведем лишь результат для простейшего случая, когда переходы — разрешенные и происходят без участия фононов, причем главные оси тензора эффективной массы — одни и те же для электронов и для дырок. Напряженность электрического поля будем считать направленной вдоль одной из этих осей (оси Z). Введем характерную энергию

$$E_r = \left(\frac{e^2 \mathcal{E}^2 \hbar^2}{2m_{zr}} \right)^{1/2}, \quad m_{z,r}^{-1} = m_{z,c}^{-1} + m_{z,v}^{-1}. \quad (10.1)$$

Тогда при $\hbar\omega < E_g$ и $E_g - \hbar\omega \gg E_r$ коэффициент поглощения дается выражением [6]

$$\gamma \simeq \frac{AE_r^{3/2}}{\omega(E_g - \hbar\omega)} \exp \left\{ -\frac{4}{3} \left(\frac{E_g - \hbar\omega}{E_r} \right)^{3/2} \right\}, \quad (10.2)$$

где A — постоянная.

В соответствии со сказанным выше коэффициент поглощения действительно оказывается отличным от нуля при $\hbar\omega < E_g$, но все же быстро убывает с увеличением параметра $(E_g - \hbar\omega)/E_r$.

С другой стороны, при $\hbar\omega > E_g$ и $\hbar\omega - E_g \gg E_r$ получается

$$\gamma \simeq \frac{A_1}{\omega} (\hbar\omega - E_g)^{1/2} \left\{ 1 - \frac{E_r^{3/2}}{4(\hbar\omega - E_g)^{3/2}} \cos \left[\frac{4}{3} \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{E_r} \right)^{3/2} \right] \right\}, \quad (10.3)$$

*) Это явление называют эффектом Келдыша—Франца.

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 γ 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 γ по формулам (1.23) и (1.11).