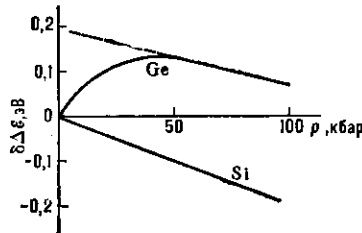


Лит.: Физическая акустика, под ред. У. Мазона, пер. с англ., т. 1, ч. Б. М., 1967; Пьезополупроводниковые преобразователи и их применение, М., 1973. Е. К. Грищенко.

ПЬЕЗОСПЕКТРОСКОПИЯ — прецизионный метод исследования зависимости свойств твёрдых тел от внеш. давления методами оптич. спектроскопии. Особенно эффективна П. для изучения электронных свойств полупроводников, зависящих от их зонной структуры, в частности от ширины запрещённой зоны \mathcal{E}_g . Т. к. \mathcal{E}_g зависит от межатомного расстояния (межатомной связи), то с увеличением давления p можно было бы ожидать роста \mathcal{E}_g . Оказалось, что в прямозонных полупроводниках \mathcal{E}_g действительно обычно растёт (исключение — Те и халькогениды Pb). В кристаллах с нек. минимумами ф-ции $\mathcal{E}(p)$ в зоне проводимости (\mathcal{E} — энергия электрона, p — его импульс) для одних минимумов \mathcal{E}_g растёт, для других — убывает. Напр., при увеличении давления \mathcal{E}_g в Ge увеличивается с градиентом $7,5 \cdot 10^{-3}$ эВ/кбар (в InSb и GaAs — $12 \cdot 10^{-3}$ эВ/кбар), но при $p \geq 50$ кбар X-минимум зоны проводимости становится ниже L-минимума, что означает уменьшение \mathcal{E}_g с ростом давления (рис.). Т. о.,

Изменение ширины запрещённой зоны \mathcal{E}_g в зависимости от давления для Si и Ge.



отрицат. значение $\Delta \mathcal{E}_g$ означает, что величину \mathcal{E}_g начинают определять др. минимум, чем при нормальном давлении.

Теория, описывающая влияние давления на электронный спектр, построена для ковалентных и ионных кристаллов. Отражение и поглощение света в полупроводнике (а также *фотопроводимость*) определяются зависимостью диэлектрич. проницаемости от частоты ω (см. *Диэлектрики*). Действительная ϵ' и мнимая ϵ'' части ф-ции $\epsilon(\omega)$ связаны с коэф. поглощения α и преломления n света соотношениями

$$\alpha^2 = \mu [-\epsilon' + (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2}] / 2,$$

$$n^2 = \mu [\epsilon' + (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)^{1/2}] / 2$$

(μ — магн. проницаемость). Зависимость $\epsilon(\omega)$ определяется электронами и ионами кристалла. Электронная часть диэлектрич. проницаемости $\epsilon_3(\omega) = \epsilon_3^0(\omega) + i\epsilon_3^0(\omega)$. В случае, когда энергия светового кванта $\hbar\omega$ превышает ширину запрещённой зоны \mathcal{E}_g полупроводника, $\epsilon_3^0(\omega)$, определяемое *Крамерса—Кронига соотношением*, меняется с давлением незначительно, а изменения ϵ_3^0 даются ф-лой

$$\epsilon_3^0(\omega) = \frac{2^{1/2} e^2}{m^2 \omega^2} |eP|^2 \frac{(M_1 M_2 M_3)^{1/2}}{n^3} (\hbar\omega - \mathcal{E}_g)^{1/2}.$$

Здесь m — масса электрона, M_1, M_2, M_3 — гл. компоненты тензора приведённой массы $M = (m_3^{-1} + m_d^{-1})^{-1}$, m_3, m_d — гл. компоненты тензора *эффективной массы* электрона и дырки, e — заряд электрона, P — вектор поляризации света, e — матричные элементы операторов импульса электронов (дырок). Множитель $(\hbar\omega - \mathcal{E}_g)^{1/2}$ отражает зависимость *плотности состояний* в зоне проводимости (валентной зоне) от энергии кванта. Матричные элементы e слабо зависят от давления (как и постоянная решётки). Незначительно меняются и эфф. массы носителей, т. е. M . Осн. влияние давления связано со сдвигом электронных уровней, определяющих плотность состояний. Давление позволяет не только сдвигать электронные уровни, но и изменять электронный спектр.

По спектральной зависимости коэф. поглощения света $\alpha_3(\omega) \sim \epsilon''(\omega)$ можно определить \mathcal{E}_g в исходном и деформированном кристаллах; \mathcal{E}_g изменяется с ростом давления примерно на $\pm 10^{-5}$ — 10^{-6} эВ/кбар.

Вклад ионов в ф-цию $\epsilon(\omega)$ слабо зависит от давления. Изменения ϵ_{ij} отражают в осн. изменения фонового спектра с давлением. В случае ковалентных кристаллов частоты оптич. продольных LO- и поперечных TO-колебаний решётки растут с давлением, а частоты акустич. LA- и TA-колебаний падают (см. *Колебания кристаллической решётки*). Изменение межатомного расстояния под действием давления меняет конфигурацию электронной оболочки колеблющихся атомов, поэтому меняется и эфф. заряд ионов (знак изменения возможен любой).

Все вышеперечисленные эффекты проявляются при однородном гидростатич. давлении. В то время как оно не меняет симметрию решётки, одноосное напряжение понижает симметрию системы и поэтому приводит к расщеплению первоначально вырожденных уровней. Новый тип симметрии кристалла зависит от направления, в к-ром приложено напряжение.

Одноосные напряжения изменяют симметрию зон Бриллюэна. Поскольку нек-рые точки k в зоне становятся при этом неэквивалентными, приложение одноосного напряжения приводит к дополнит. расщеплению уровней. Это детально проверено при исследовании пьезологического света у края межзонного перехода и пьезоотражения в др. критич. точках. Именно так была подтверждена интерпретация края поглощения в Ge и Si, где минимум зоны проводимости расположен в точке L и на оси Δ .

Метод П. эффективен при изучении симметрии примесных и экситонных состояний. В случае мелких примесей или слабосвязанных экситонов прежде всего существенно влияние напряжения на структуру энергетич. зон. Затем устанавливают, как это сказывается на связанных состояниях, происходящих от разл. критич. точек. У глубоких примесей энергия связи зависит больше от конфигурации ближайших атомов и ионов, чем от сдвигов зон. Поэтому влияние одноосного напряжения на примесные уровни тем сильнее, чем глубже потенциал примеси и чем больше локализованы волновые ф-ции.

Лит.: Ансельм А. И., Введение в теорию полупроводников, 2 изд., М., 1978; Бир Г. Л., Пинкус Г. Е., Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках, М., 1972; Martinez G., Optical properties of semiconductors under pressure, в кн.: Handbook on semiconductors, в. 2 — Optical properties of solids, Amst.—[a. o.], 1980; Sharma H. P., Shanker J., Verma M. P., Effect of hydrostatic pressure on the electronic dielectric constant of ionic crystals, «Phil. Mag.», 1976, v. 34, p. 163; Wondel H., Martin R. M., Charge density and structural properties of covalent semiconductors, «Phys. Rev. Lett.», 1978, v. 40, p. 950. С. Е. Есенов.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ — вещества, в к-рых при определённых упругих деформациях (напряжениях) возникает электрич. поляризация даже в отсутствие электрич. поля (прямой пьезоэффект). Следствием прямого пьезоэффекта является обратный пьезоэффект — появление механич. деформаций под действием электрич. поля. Проявления прямого и обратного пьезоэффектов могут быть различными, первый может выражаться, напр., в появлении при деформации электрич. поля в отсутствие поляризации, второй — в возникновении при наложении электрич. поля упругих напряжений в отсутствие деформаций. В общем виде речь идёт о линейной связи между механич. и электрич. переменными (первые — деформация u , напряжение σ ; вторые — поляризация P ,