

Особенности распространения упругих волн в пьезоэлектрических кристаллах. В кристаллах, обладающих пьезоэффектом, волна деформации сопровождается переменным электрич. полем, к-рое, в свою очередь, приводит к дополнит. механич. напряжениям, изменяющим деформацию в волне. В плоской волне напряжённость электрич. поля волны параллельна волновой нормали n и выражается через смещение u , а компоненты вектора смещения связаны между собой ур-ниями, совпадающими с ур-ниями (1) для непьезоэлектрич. среды, но с перенормированным за счёт пьезоэлектрич. взаимодействия тензором Кристоффеля—Грина:

$$\Gamma_{ij} \rightarrow \tilde{\Gamma}_{ij} = C_{ijkl} n_l n_m + \frac{4\pi}{\epsilon_{\parallel}} e_i e_j,$$

где $e_i = e_{ilm} n_l n_m$, e_{ilm} — тензор пьезоэлектрич. постоянных, $\epsilon_{\parallel} = \epsilon_{ijn} n_j$ — продольная диэлектрич. проницаемость. В целом для пьезоэлектрич. кристаллов картина распространения объёмных акустич. волн остаётся такой же, как и в непьезоэлектрических. Степень влияния пьезоэффекта на скорость распространения определяется квадратом константы электромеханич. связи $K_U^2 = 4\pi (e_i U)^2 / \rho \epsilon_{\parallel}$, где U — поляризация волны. За счёт пьезоэффекта фазовая скорость c всегда больше величины скорости c_0 , определяемой только упругими модулями: $c = c_0 (1 + \frac{1}{2} K_U^2)$. Разница между скоростями c и c_0 наблюдается, напр., в пьезополупроводниках, где повышение концентрации свободных носителей позволяет исключить влияние пьезоэффекта: при больших концентрациях носители экранируют электрич. поле волны. Константа электромеханич. связи анизотропна, что увеличивает анизотропию акустич. свойств кристалла. В кристаллах имеются т. н. непьезоактивные направления, для к-рых константа электромеханич. связи равна нулю и влияние пьезоэффекта на распространение данной моды отсутствует.

Отражение и преломление акустических волн на границе раздела кристаллических сред. Анизотропия кристаллов усложняет характер отражения и преломления упругих волн на границе раздела сред. Направления волновых нормалей отражённой и преломлённой волн, как и в изотропном случае, определяются законами Снелля. Однако вследствие того что фазовая скорость зависит от направления волновой нормали, между углами падения, отражения и преломления нет простых соотношений (типа «угол падения равен углу отражения»), характерных для изотропной среды. При одном и том же угле падения углы отражения и преломления зависят от ориентации границы раздела относительно кристаллографич. осей. Направления лучей значительно отклоняются от направлений соответствующих нормалей, в результате акустич. энергия после отражения (или преломления) переносится в направлениях, существенно отличающихся от направлений, определяемых законами Снелля (подробнее см. *Отражение звука*).

Затухание акустических волн в кристалле. В кристаллах затухание акустич. волн обусловлено поглощением звука и рассеянием звука на микронеоднородностях. Для разл. групп кристаллов существуют специфич. механизмы поглощения, возникающие за счёт взаимодействия УЗ-волны с др. видами возбуждений в кристаллах. В полупроводниках и металлах важную роль играет поглощение, связанное с *акустоэлектронным взаимодействием* упругой волны со свободными носителями. В магн. кристаллах значит. вклад в поглощение УЗ вносит *спин-фононное взаимодействие*. В сегнетоэлектрич. кристаллах упругие волны взаимодействуют с НЧ-ветвью поперечных оптич. фононов (т. н. мягкой модой), что приводит к специфич. возрастанию УЗ-поглощения вблизи точки фазового перехода. В ферромагнетиках и сегнетоэлектриках возможно также дополнит. поглощение, обусловленное движением доменных стенок в УЗ-поле. Каждому из этих механизмов

присуща своя зависимость коэф. поглощения от частоты УЗ-волны, направления её распространения и параметров кристалла.

Для большинства кристаллов характерно поглощение, обусловленное взаимодействием акустич. волны с дефектами кристаллов, в первую очередь — дислокац. поглощение. Под действием звуковой волны возникает колебат. движение сети дислокаций, петли к-рой закреплены в местах пересечения дислокаций и на точечных дефектах. Поглощение возникает за счёт диссипации энергии движущейся сети дислокаций (амплитудно-независимое поглощение), за счёт отрыва сетель дислокаций с мест их закрепления на точечных дефектах (амплитудно-зависимое поглощение) и, наконец, за счёт взаимодействия дислокаций непосредственно с кристаллич. решёткой, в результате чего появляются низкотемпературные пики поглощения — пики Бордони. Частотная зависимость для амплитудно-независимого поглощения носит резонансный характер, для поглощения вблизи пиков Бордони — релаксационный. Коэф. амплитудно-зависимого поглощения от частоты не зависит. Амплитудно-независимое поглощение характерно для гиперзвуковых частот и малых амплитуд колебаний; на более низких частотах и при достаточно больших звуковых интенсивностях осн. роль играет амплитудно-зависимое поглощение.

Поглощение акустич. волн имеет место даже в совершенных кристаллах. Оно обусловлено взаимодействием упругой волны с тепловыми колебаниями решётки (т. н. решёточное, или фононное, поглощение). Для не слишком низких темп-р воздействие акустич. волны сводится к нарушению ея равновесного распределения фононов и к процессу релаксации в фононной системе (т. н. механизм Ахвезера). Макроскопически диссипация упругой энергии в рамках такого механизма описывается введением наряду с упругими напряжениями (1) вязких напряжений $\sigma_j = \eta_{ijlm} \partial u_{lm} / \partial t$, пропорциональных скорости деформации $\partial u_{lm} / \partial t$. Коэф. пропорциональности η_{ijlm} составляет тензор решёточных, или фононных, вязкостей. Коэф. решёточного поглощения α_U квадратично зависит от частоты и пропорционален величине $\eta_U = \eta_{ijlm} U_i U_j n_l n_m$ (где η_{ijlm} — тензор вязкости):

$$\alpha_U = \frac{1}{2} \frac{\eta_U}{\rho c^3} \omega^2.$$

Анизотропия решёточного поглощения определяется структурой тензора вязкостей. Кроме того, в кристаллах, обладающих значит. теплопроводностью (напр., в металлах), важную роль играет поглощение, обусловленное теплообменом между разл. участками кристалла, по-разному нагретыми за счёт объёмных деформаций в звуковой волне (т. н. термоупругая диссипация). Термоупругая диссипация также приводит к квадратичной зависимости коэф. поглощения звука от частоты. При низких (гелиевых) темп-рах на высоких (гиперзвуковых) частотах осн. роль играет непосредственное нелинейное взаимодействие акустич. волн с тепловыми фононами — т. н. механизм Ландау—Румера (см. *Фонон-фононное взаимодействие*).

Поверхностные акустические волны в кристаллах. На свободной поверхности кристаллов распространяются поверхностные волны, являющиеся аналогами *Рэлея волн* в изотропном твёрдом теле. Волны рэлеевского типа в кристаллах образуются загущающими в глубину кристалла неоднородными волнами. Частицы среды в такой волне движутся по эллипсам, плоскость к-рых наклонена к поверхности кристалла под углом, зависящим от ориентации среза и направления распространения поверхностной волны в плоскости среза. Упругая анизотропия сказывается на характере распространения поверхностных волн точно так же, как и объёмных; возникает зависимость фазовой скорости от направления распространения и ориентации среза;