

электрич. поле E , электрич. индукция D ; см. *Диэлектрики*). Первое подробное исследование пьезоэффектов проведено Ж. и П. Кюри (J. et P. Curie) (1880) на кристалле кварца. В дальнейшем пьезоэлектрич. свойства были обнаружены более чем у 1500 веществ.

Пьезоэффекты наблюдаются только в кристаллах, не имеющих центра симметрии. (В кристаллах, обладающих центром симметрии, пьезоэффект невозможен.) Наличие др. элементов симметрии (оси, плоскости симметрии; см. *Симметрия кристаллов*) может запрещать появление поляризации в нек-рых направлениях или при деформациях, т. е. также ограничивает число кристаллов — П. В результате П. могут принадлежать лишь к 20 точечным группам симметрии (из 32): $1, 2, 3, 4, 6, m, 2m, 3m, 4m, 6m, 222, \bar{4}, 422, \bar{4}2m, \bar{6}, 622, \bar{6}m2, 32, 23, m\bar{3}$. Кристаллы первых 10 классов — *пьезоэлектрики*, т. е. обладают поляризацией в отсутствие внеш. воздействий. В этих кристаллах пьезоэффект проявляется, в частности, в изменении величины спонтанной поляризации при механич. деформации. Пьезоэлектрич. свойства можно создавать в нек-рых некристаллич. диэлектриках за счёт образования в них т. н. пьезоэлектрич. текстуры, напр. поляризацией в электрич. поле (пьезокерамика), механич. обработкой (древесина) и др. (см. *Пьезоэлектрические материалы*).

Количеством характеристик пьезоэффектов в кристалле является совокупность пьезокоэффициентов (пьезомодулей) — коэф. пропорциональности между электрич. и механич. величинами. При этом одна электрич. величина (напр., P) зависит как от др. электрич. величины (напр., E), так и от механич. величины (u или σ). Напр.: поляризация, возникающая в П. под действием деформации (σ) $P = e\sigma$, где e — пьезомодуль. Полная поляризация с учётом электрич. поля E выражается соотношением

$$P = e\sigma + \chi^* E.$$

Величина χ^* имеет смысл *диэлектрической восприимчивости* при постоянной деформации. Т. к. механич. деформации могут быть представлены как совокупность 6 независимых величин (сжатия и растяжения вдоль 3 осей, а также сдвигов в плоскостях, перпендикулярных осям), а вектор поляризации P имеет 3 компонента, то в наим. симметричных кристаллах может быть 18 разных пьезокоэффициентов.

Симметрия кристалла ограничивает число независимых пьезомодулей, напр. кристалл точечной группы симметрии 422 имеет только одну независимую пьезоконстанту. Пьезокоэффициентами являются также величины d, a, b, λ, s в соотношениях

$$P = d\sigma + \chi E, \quad \sigma = -aP + \lambda u, \quad u = -bP + s\sigma$$

и т. п. Все пьезокоэффициенты связаны друг с другом, так что при описании пьезоэлектрич. свойств можно ограничиться только одной совокупностью констант, напр. e .

Величины пьезокоэффициентов различаются для кристаллов разных типов. Для *ионных кристаллов* порядок величины пьезокоэффициента можно оценить след. образом: пусть при деформации закороченного кристалла ($E = 0$) изменение постоянной решётки (l) равно Δl , так что деформация $u = l + \Delta l/l$. Разноимённые ионы сдвигаются друг относительно друга на величину $\sim \Delta l$, а поляризация $P \sim q\Delta l/l^3$, где q — заряд иона (можно считать равным заряду электрона). Т. о., порядок пьезоэлектрич. константы такой же, как и у атомного электрич. поля $E_a \sim 10^7$ единиц СГСЭ. Существенно больших величин могут достигать пьезокоэффициенты у *сегнетоэлектриков*, т. к. их поляризация может быть связана с перестройкой доменной структуры при механич. деформации.

Наличие пьезоэффектов сказывается на характере разл. акустич. явлений. Так, одна из объёмных упру-

гих волн становится поверхностной (Гуляева — Блюштейна волна). Отражение и пропускание упругой волны на границе П. и др. среды могут определяться не только соотношением модулей упругости сред, но и тем, является ли др. среда диэлектриком или проводником. Коэф. усиления звука за счёт дрейфа носителей заряда в полупроводнике имеет разную зависимость от частоты звука в П. и в centrosимметричных кристаллах.

П. используются в технике в качестве преобразователей механич. колебаний в электрические и электрических — в механические. Они являются осн. материалами *акустоэлектроники*.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Най Дж., Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц, пер. с англ., 2 изд., М., 1967; Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П., Основы кристаллофизики, 2 изд., М., 1979; Таганцев А. К., Пьезо-, пьезо-, флексоэлектрический и термополяризационный эффекты в ионных кристаллах, «УФН», 1987, т. 152, в. 3, с. 423.

А. П. Леванюк, Д. Г. Санников.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ — вещества (диэлектрики, полупроводники), обладающие хорошо выраженными пьезоэлектрич. свойствами (см. *Пьезоэлектрики*).

Пьезоэлектрич. кристаллы распространены в природе в виде естеств. минералов (кварц, турмалин, цинковая обманка и др.), большинство практически важных П. м. синтезируют (сегнетовая соль, ниобат лития, пьезокерамика, пьезополимеры).

П. м. используются для изготовления *пьезоэлектрических преобразователей* разл. назначения: в гидролокации, УЗ-технике (см. *Ультразвук*), *акустоэлектронике*, точной механике и др. Для изготовления пьезоэлемента выбирают П. м., сопоставляя их параметры и характеристики, к-рые определяют эффективность и стабильность работы пьезоэлектрич. преобразователя с учётом его назначения и условий эксплуатации. П. м. характеризуются след. величинами (табл.): матрицами пьезомодулей d и относительной диэлектрич. проницаемости ϵ^s , коэф. упругой податливости SE , скоростью распространения звуковых волн c , тангенсом угла диэлектрич. потерь $\text{tg}\delta$, механич. добротностью Q_m , плотностью ρ , предельно допустимой темп-рой θ (темп-ра Кюри для сегнетоэлектриков). Во мн. случаях оценивать П. м. удобнее след. параметрами: 1) коэф. эл.-механич. связи K_{ik} (для квазистатич. режима, когда длина звуковой волны существенно превосходит размеры пьезоэлемента):

$$K_{ik} = \frac{d_{ik}}{\sqrt{\epsilon_{ii}^s \epsilon_0 S_{kk}^E}},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрич. постоянная вакуума; 2) величиной $(d_{ik}/S_{kk}^E)^2$, важной для излучателей звука; 3) величиной $K_{ik}^2/\text{tg}\delta$, к-рая входит в выражение эл.-механич. кпд преобразователей; 4) отношением d_{ik}/ϵ_{ii}^s , характеризующим чувствительность *приёмника звука* в режиме холостого хода; 5) величиной $d_{ik}/\sqrt{\epsilon_{ii}^s}$, определяющей мин. сигнал, к-рый может быть принят приёмником на фоне электрич. шумов схемы; 6) механич. добротностью Q_m , определяющей акустомеханич. кпд излучателя при заданной нагрузке, полюсу частот пропускания эл.-механич. фильтров, качество линий задержки.

Большое значение для мощных излучателей звука имеют предельно допустимое механич. напряжение, к-рое зависит от механич. прочности материала, стабильность свойств относительно разогрева, а также нелинейность свойств, при к-рой происходит перекачка энергии в высшие гармоники и уменьшение эффективности (кпд) на осн. частоте (рис. 1 и 2).

Кристаллы кварца, несмотря на их сравнительно слабые пьезоэлектрич. свойства, применяются в тех