

где α_T — полный коэф. поглощения тела. Радиация П. измеряет темп-ру начиная с 200 °С. В промышленности этот тип П. широко применяют в системах контроля и управления температурными режимами, разл. техн. процессов.

Лит. см. при ст. *Пирометрия оптическая.*

ПИРОЭЛЕКТРИКИ — кристаллич. диэлектрики, на поверхности к-рых при изменении темп-ры T возникает электрич. заряды. Появление электрич. зарядов связано с изменением спонтанной поляризации.

Историческая справка. В нач. 18 в. в Европу были завезены кристаллы турмалина («пейлонский магнит»), обладающие свойством при нагревании оказывать силовое воздействие на частицы пепла. Ф. У. Т. Эпинус (F. U. Th. Aepinus, 1756) установил причину — образование на концах нагретого кристалла зарядов противоположного знака. Термин «пироэлектричество» был введен Д. Брюстером (D. Brewster, 1824). Кельвин (W. Thomson, Lord Kelvin) связал пироэлектрич. эффект с изменением электрич. поляризации при изменении T . Аккерманн (W. Ackermann, 1915) исследовал пироэлектрический эффект в ряде кристаллов в широком интервале T и обнаружил тенденцию к убыванию пироэлектрич. эффекта при понижении T . Первая микроскопич. теория создана С. А. Богуславским (1915). В дальнейшем было установлено, что у сегнетоэлектриков величина эффекта весьма велика вблизи точки фазового перехода.

Спонтанная поляризация P_0 может существовать только при достаточно низкой симметрии кристалла. Иметь зависящую от T спонтанную поляризацию, т. е. быть П., могут лишь кристаллы, в к-рых есть полярное направление, не изменяющееся при всех преобразованиях симметрии (полярные диэлектрики и к и): вдоль этого направления располагается вектор P_0 . Таким полярным направлением обладают кристаллы 10 точечных групп симметрии: 1, 2, 3, 4, 6, m , $mm2$, $3m$, $4mm$, $6mm$ (рис. 1). В группах 1 и m беско-

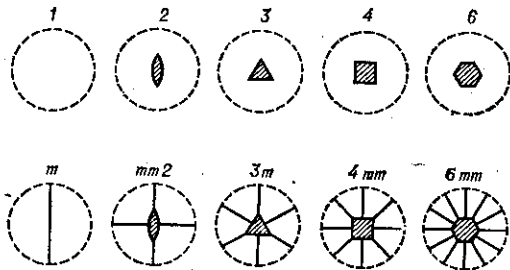


Рис. 1. Возможные точечные группы симметрии пироэлектриков, показаны оси симметрии кристаллов.

нечно много таких направлений и направление P_0 не predetermined. В остальных группах это оси симметрии.

Спонтанная поляризация проявляется в виде связанного заряда в тех местах кристалла, где P_0 зависит от координат:

$$-\rho_{св} = \text{div} P_0,$$

$\rho_{св}$ — объемная плотность связанного заряда. Т. о., на поверхности П. возникает связанный поверхностный заряд, плотность к-рого равна нормальной компоненте P_0 . При этом внутри кристалла и вне его возникает электрич. поле E_0 . В бесконечной пластине, вырезанной перпендикулярно P_0 ,

$$E_0 = -4\pi P_0.$$

В общем случае поле E_0 и полная энергия П. зависят от его формы.

В реальном П. поле E_0 внутри и вне его равно 0 (хотя P_0 сохраняется). Причина — электропроводность — свободные заряды, перемещаясь к поверхностям, нейт-

рализуют связанный заряд. Поэтому пироэлектрич. свойства можно наблюдать только при достаточно быстром изменении темп-ры кристалла.

Свойства П. Ур-ние, связывающее изменение P_0 и T , имеет вид:

$$\Delta P_{0i} = \gamma_i \Delta T,$$

где γ_i — пироэлектрич. коэф., к-рые можно рассматривать как компоненты вектора $\gamma(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$. В П. всех классов симметрии, кроме 1 и m , вектор γ направлен вдоль оси симметрии, к-рая является одной из координатных осей (z), т. е. $\gamma(0, 0, \gamma_3)$. В группе m вектор γ лежит в плоскости симметрии: $\gamma(\gamma_1, \gamma_2, 0)$. В группе 1 направление γ произвольно относительно координатных осей: $\gamma(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$.

Пироэлектрич. коэф. γ зависит от механич. условий: образец может быть «свободен» (механич. напряжение отсутствует) либо «закан», когда внешние механич. напряжения σ_{ij} обеспечивают отсутствие механич. деформаций u_{ij} , возникающих за счет теплового расширения при изменении T . При одноврем. изменении T , E термодинамич. потенциал Φ кристалла (при пост. механич. напряжении) изменяется на величину

$$d\Phi = -SdT - P_i dE_i,$$

где S — энтропия кристалла. Т. к. $P_i = -(\partial\Phi/\partial E)_T$, $S = -(\partial\Phi/\partial T)_{E_i}$, $\partial^2\Phi/\partial T\partial E_i = \partial^2\Phi/\partial E_i\partial T$, то

$$\gamma_i = \frac{\partial P_i}{\partial T} = \frac{\partial S}{\partial E_i}.$$

Т. о., пироэлектрич. коэф. определяет и изменение энтропии кристалла под действием электрич. поля:

$$\Delta S = \gamma_i E_i.$$

Это означает, что темп-ра П., находящегося в состоянии адиабатич. изоляции, при наложении электрич. поля вдоль полярной оси изменится на величину

$$\Delta T = \frac{T\Delta S}{C} = \frac{T\gamma_i E_i}{C},$$

где C — теплоемкость кристалла при постоянных механич. напряжениях и электрич. поле (электрокалорический эффект). Изменение T для линейных П. с $\gamma = 10^{-4}$ Кл/м²·К и $C = 10^3$ Дж/кг·К в полях $E \sim 10^8$ В/м имеет порядок 10^{-4} К, в сегнетоэлектриках $1-10^{-2}$ К.

Все П. являются пьезоэлектриками, поэтому изменение темп-ры «свободного» кристалла, приводящее к его тепловому расширению или сжатию (деформации), вызовет добавочную электрич. поляризацию:

$$\Delta P_{0i}'' = e_{ijk} \alpha_{jk} \Delta T = \gamma'' \Delta T.$$

Здесь e_{ijk} — тензор 3-го ранга пьезоэлектрич. модулей, α_{jk} — компоненты тензора коэф. теплового расширения, а суммарная поляризация

$$\Delta P_{0i} = \Delta P_{0i}' + \Delta P_{0i}'' = (\gamma_i' + \gamma_i'') \Delta T.$$

Здесь γ_i' — коэф. «первичного», γ_i'' — «вторичного» пироэлектрич. эффекта. Для разл. кристаллов соотношение между γ_i' и γ_i'' варьируется в широких пределах: вторичный эффект может превышать первичный, иметь др. знак и т. д. «Третичный» пироэлектрич. эффект связывают с изменением P в неоднородно нагретом пьезоэлектрике.

Микроскопическая теория П., позволяющая выяснить природу пироэлектрич. эффекта и описать свойства П., основана на рассмотрении ангармонизма колебаний кристаллической решетки. Температурная зависимость пироэлектрич. коэф. в области низких темп-р удовлетворительно описывается соотношением

$$\gamma = \gamma_\infty^D \left(\frac{\theta_D}{T} \right) + \sum_{i=1}^r \gamma_i^0 \left(\frac{\theta_i}{T} \right).$$