

Используя формулу $U = \Psi + TS$, получаем отсюда плотность внутренней энергии $U = E^2/(8\pi)$. Как и следовало ожидать, результат совпадает с результатом (36.9), полученным ранее термодинамическим путем.

5. Определить изменение температуры газообразного диэлектрика с полярными молекулами при адиабатическом выключении электрического поля, если объем газа во время процесса выключения поддерживается постоянным (электрокалорический эффект).

Решение. Как показывает формула (36.7), для таких диэлектриков справедливо соотношение

$$\frac{(\epsilon - 1) T}{\tau} = \text{const}, \quad (36.15)$$

откуда

$$\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial T}\right)_\tau = -\frac{\epsilon - 1}{T}.$$

Подставляя это значение в формулу (31.16) и выполнив интегрирование по E , получим

$$T_2 - T_1 = -\frac{\epsilon - 1}{8\pi C_E} E^2,$$

где E — начальное значение напряженности электрического поля. (При интегрировании изменением ϵ с температурой мы пренебрегли.) Здесь C_E означает теплоемкость единицы объема диэлектрика при постоянных объеме и напряженности электрического поля. Зависимость теплоемкости от напряженности поля можно пренебречь. Тогда

$$C_E = \frac{C_V \mathcal{V}}{RT},$$

где C_V — теплоемкость моля газа при постоянном объеме. С помощью соотношения $C_P - C_V = R$ величину C_E можно выразить через адиабатическую постоянную $\gamma = C_P/C_V$. Сделав это и подставив результат в формулу для $T_2 - T_1$, получим

$$T_2 - T_1 = -\frac{(\epsilon - 1)(\gamma - 1)}{8\pi \mathcal{V}} E^2 T. \quad (36.16)$$

Используя формулу (36.7), а также соотношение $\mathcal{V} = nkT$, преобразуем эту формулу к виду

$$T_2 - T_1 = -\frac{(\gamma - 1) p_0^2}{24\pi k^2 T} E^2. \quad (36.17)$$

Таким образом, при адиабатическом выключении электрического поля диэлектрик охлаждается. Понижение температуры $T_2 - T_1$ обратно пропорционально абсолютной температуре T . Для примера возьмем $\gamma = 1,4$, $p_0 = 10^{-18}$ СГСЭ-ед., $E = 100$ СГСЭ-ед., $T = 100$ К. Тогда по формуле (36.17) найдем $T_2 - T_1 \approx 3 \cdot 10^{-5}$ К.

§ 37. Пьезоэлектричество

1. Во многих кристаллах при растяжении и сжатии в определенных направлениях возникает электрическая поляризация. В результате этого на их поверхностях появляются электрические заряды обоих знаков. Это явление, получившее название *прямого пьезоэлектрического эффекта*, было открыто в 1880 г. братьями Пьером и Жаком Кюри. Оно наблюдалось затем на кристаллах турмалина, цинковой обманки, хлората натрия, винной кислоты, тростникового сахара, селитровой соли, титаната бария и многих других веществ. Пьезоэлектрическими свойствами могут обладать только *ионные кристаллы*. Если кристаллические ре-

шетки положительных и отрицательных ионов, из которых построены такие кристаллы, под действием внешних сил деформируются по-разному, то в противоположных местах на поверхности кристалла выступают электрические заряды разных знаков. Это и есть пьезоэлектрический эффект. При однородной деформации пьезоэлектрический эффект наблюдается при наличии в кристалле одной или нескольких *полярных осей* (направлений). Под полярной осью (направлением) кристалла понимают всякую прямую, проведенную через кристалл, оба конца которой неравноценны, т. е. взаимозаменяемы. Иными словами, при повороте кристалла на 180° вокруг любой оси, перпендикулярной к полярной, он не совмещается сам с собою. Вообще, для существования пьезоэлектрического эффекта при однородной деформации необходимо *отсутствие у кристалла центра симметрии*. Действительно, если бы недеформированный кристалл имел центр симметрии, то последний сохранился бы и при однородной деформации кристалла. С другой стороны, в электрически поляризованном кристалле есть особое направление, а именно направление вектора поляризации. При наличии такого кристалл не может иметь центр симметрии. Получившееся противоречие и доказывает наше утверждение. Из 32 кристаллических классов не имеет центра симметрии 21 класс. У одного из них, однако, сочетание других элементов симметрии делает пьезоэлектрический эффект также невозможным. Таким образом, пьезоэлектрические свойства наблюдаются у 20 кристаллических классов.

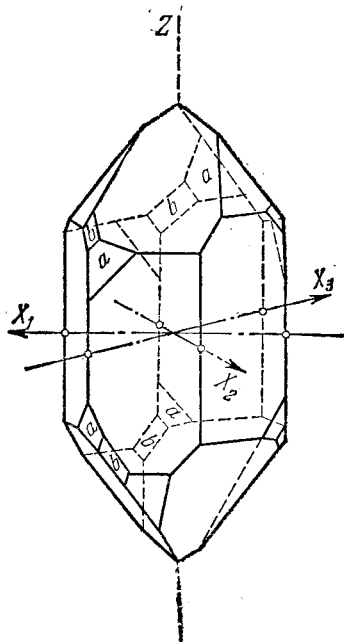


Рис. 95.

2. Рассмотрим пьезоэлектрический эффект на примере кристалла кварца — важнейшего пьезоэлектрического кристалла, нашедшего широкие научно-технические применения благодаря своим превосходным механическим и электрическим свойствам. При обычных температурах и давлениях кварц встречается в так называемой α -модификации. Кристалл α -кварца (рис. 95) относится к тригональной системе и имеет три оси симметрии второго порядка, обозначенные на рис. 95 через X_1 , X_2 , X_3 . Они и являются полярными осями кристалла. Каждая из них соединяет противоположные, но неравнозначные ребра шестигранной призмы. Неравнозначность этих ребер видна из того, что к краям одного из них примыкают маленькие грани, обозначенные на рисунке буквами a и b , тогда как у краев другого ребра таких граней нет. Четвертая ось Z является осью симметрии третьего порядка. Ее называют *оптической осью*, так как поворот кристалла вокруг этой оси на любой угол не оказывает никакого влияния на распространение света в кристалле.

При механических воздействиях на кристалл кварца на концах полярной оси (точнее, на перпендикулярных к ней гранях) появляются противоположные электрические заряды. Не обязательно, чтобы приложенные внешние силы действовали в направлении рассматриваемой полярной оси. Необходимо лишь, чтобы в результате действия внешних сил возникло растяжение или сжатие вдоль этой оси.

При температуре до 200°C пьезоэлектрические свойства кварца практически не зависят от температуры. С дальнейшим повышением температуры пьезоэлектрический эффект медленно убывает. При 576°C α -кварц претерпевает фазовое

превращение и переходит в β -модификацию. Кристаллы β -кварца относятся к гексагональной системе, а потому пьезоэлектрические явления в них не наблюдаются в согласии с тем, что было сказано выше. При обратном понижении температуры первоначальная структура кварца восстанавливается, причем это восстановление происходит при температуре, несколько более низкой, чем исходная (гистерезис). Ниже всюду речь идет об α -кварце.

3. Возникновение пьезоэлектрического эффекта легко понять с помощью модельного рассмотрения, предложенного Мейсснером. Химическая формула кварца имеет вид SiO_2 . Его кристаллическая решетка состоит из положительных ионов кремния и отрицательных ионов кислорода. Каждый ион кремния несет четыре, а каждый ион кислорода — два элементарных заряда. В первом приближении можно представить, что ионы кремния и кислорода расположены в шестигранных ячейках, одна из которых изображена на рис. 96, если смотреть на кристалл вдоль оптической оси (перпендикулярной к плоскости рисунка). Ионы кремния изображены большими шариками 1, 2, 3, ионы кислорода — маленькими. Те и другие ионы расположены по спирали, направление вращения которой определяется тем, какой взят кварц: левый или правый (рис. 95 и 96 относятся к левому кварцу). Ион кремния 3 лежит несколько глубже иона 2, а ион 2 — глубже иона 1. Расположение ионов кислорода не требует дополнительных разъяснений. В целом ячейка электрически нейтральна и не имеет дипольного электрического момента.

Для упрощения рассуждений заменим каждую пару соседних ионов кислорода одним отрицательным ионом с удвоенным зарядом. Мы приходим к упрощенной модели ячейки, изображенной на рис. 97, а. Если подвергнуть такую ячейку сжатию вдоль полярной оси X_1 (рис. 97, б), то ион кремния 3 и ион кислорода 4 вклинятся между окружающими их боковыми ионами. В результате на плоскости А пластинки появится отрицательный, а на плоскости В — положительный заряды (*продольный пьезоэлектрический эффект*).

При сжатии в боковом направлении, т. е. перпендикулярно к полярной и оптической осям (рис. 97, в), ионы кремния 1 и 2 получают одинаковые, но противоположно направленные смещения внутрь ячейки. Так же ведут себя ионы кислорода 5 и 6. При этом сохраняется симметрия ячейки относительно плоскости, проходящей посередине между плоскостями С и D, и на этих плоскостях не возникает никаких зарядов. Однако ион кремния 3 и ион кислорода 4 смещаются наружу. Благодаря этому возникает дипольный момент, направленный в положительную сторону полярной оси X_1 . На плоскости А появляется положительный, а на плоскости В — отрицательный заряды (*поперечный пьезоэлектрический эффект*). Знаки зарядов в продольном и поперечном эффектах, таким образом, противоположны.

Из рассматриваемой модели видно также, что замена сжатия растяжением приводит к изменению знаков электрических зарядов при пьезоэлектрическом эффекте и что поляризация пропорциональна деформации кристалла (когда деформации малы). А так как между деформацией и силой согласно закону Гука (1635—1703) существует прямая пропорциональность, то поляризация кристалла при пьезоэлектрическом эффекте должна быть пропорциональна также приложенной силе. Наконец, из модели видно, что сжатие или растяжение кристалла в направлении оптической оси никакими пьезоэлектрическими эффектами не сопровождается. Все эти заключения подтверждаются опытом.

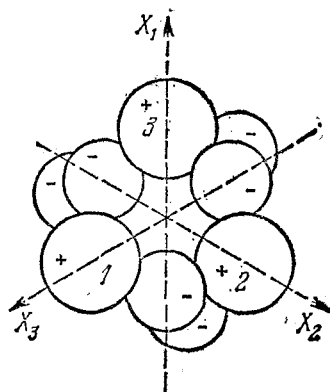


Рис. 96.

4. Согласно изложенному для получения максимальных электрических зарядов кристалл кварца надо растягивать или сжимать в направлении одной из полярных осей. В соответствии с этим кварцевые пластинки и стержни, применяемые в пьезоэлектрических опытах и приборах, вырезаются обычно так, чтобы пара плоскостей, образовавшихся при срезе, была перпендикулярна к одной из

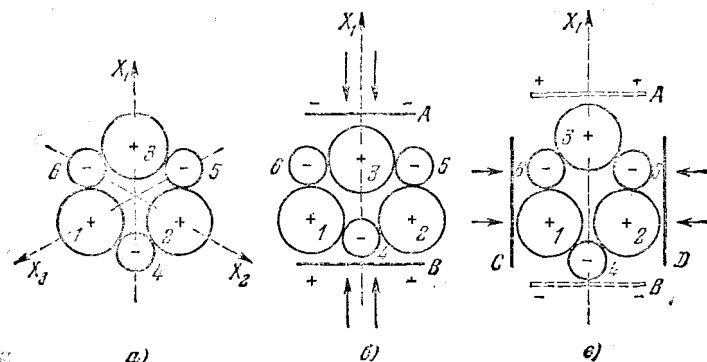


Рис. 97.

полярных осей. Такая ось называется также *электрической осью* или *пьезоосью* и обозначается обычно через X . Оптическая ось принимается за ось Z соответствующей правой системы координат. Ось Y такой системы координат называют *механической осью кристалла*. На рис. 98 изображена пластинка, вырезанная указанным образом. Длины ребер пластинки обозначены через l (длина), b (ширина), h (толщина).

В соответствии с приведенным выше наглядным объяснением при растяжении или сжатии пластинки в направлении оптической оси Z пьезоэлектрический эффект не возникает. При растяжении вдоль электрической оси X нижняя поверхность пластинки электризуется положительно, а верхняя — отрицательно. То же самое наблюдается при сжатии пластинки в направлении механической оси Y . При замене сжатия растяжением и наоборот знаки зарядов меняются на противоположные. Если нет касательных напряжений, то поляризация кварцевой пластинки при растяжении или сжатии определяется выражением

$$P_x = d_{11}(\tau_x - \tau_y), \quad (37.1)$$

где τ_x и τ_y — механические натяжения, действующие параллельно осям X и Y , а d_{11} — постоянная, называемая *пьезоэлектрическим модулем* (смысл двойного индекса при d выяснится в пункте 9). Для кварца

$$d_{11} = 6,99 \cdot 10^{-8} \text{ дин}^{-1/2} \cdot \text{см.}$$

Допустим, например, что $\tau_x = 10^6 \text{ дин} \cdot \text{см}^{-2}$, $\tau_y = 0$. Тогда на нижней поверхности пластинки появится положительный заряд с плотностью $\sigma = P_x = 6,99 \cdot 10^{-2} \text{ СГСЭ-ед.} = 2,33 \cdot 10^{-2} \text{ Кл/м}^2$. Ему соответствует внутри пластинки электрическое поле $E_x = 4\pi\sigma \approx 0,88 \text{ СГСЭ-ед.} \approx 240 \text{ В/см}$. При толщине пластинки $h = 0,5 \text{ см}$ она заряжается до разности потенциалов $\varphi \approx 120 \text{ В}$.

Для того чтобы использовать поляризационные заряды, появляющиеся на противоположных гранях кварцевой пластинки при ее деформации, эти грани снабжают металлическими обкладками. На таких обкладках индуцируются заряды, равные и противоположные по знаку поляризационным, а во внешних проводах, соединяющих обкладки, возникает электрический ток.

5. Значительно сильнее, чем у кварца, пьезоэлектрические свойства выражены у кристаллов сегнетовой соли. Благодаря этому она применяется во многих пьезоэлектрических приборах. Однако сегнетова соль очень хрупка и имеет низкую температуру плавления ($+63^\circ\text{C}$), что сильно ограничивает возможности ее практического использования. Она удобна для демонстрации прямого пьезоэлектрического эффекта. Пластинка сегнетовой соли слегка зажимается между двумя обкладками из листовой латуни (рис. 99). Обкладки соединены проводами с неоновой лампочкой. Последняя представляет собою стеклянный баллончик, наполненный разреженным неоном. Внутри баллончика введены два металлических электрода. Когда разность потенциалов между электродами превосходит определенную величину (потенциал зажигания), в лампочке возникает газовый разряд, сопровождающийся свечением неона. Если резко ударять резиновым молотком по пластинке сегнетовой соли, то при каждом ударе появляется кратковременная вспышка неоновой лампочки. Вместо сегнетовой соли в описанной демонстрации можно пользоваться пластинкой из титаната бария.

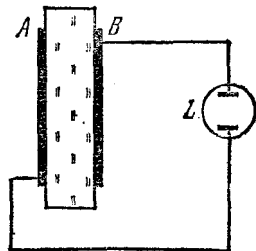


Рис. 99.

6. В 1881 г. Липпман (1845—1922), исходя из термодинамических соображений, предсказал *обратный пьезоэлектрический эффект*, который в том же году и был обнаружен братьями Кюри на кристаллах кварца. Обратный пьезоэлектрический эффект состоит в том, что при внесении пьезоэлектрического кристалла в электрическое поле в кристалле возникают механические напряжения, под действием которых кристалл деформируется.

Допустим, что кварцевая пластинка (см. рис. 98) внесена в электрическое поле, направленное параллельно оси X . Пусть она в направлениях X и Y подвержена также действию механических натяжений τ_x и τ_y соответственно. Если $V = hbl$ — объем пластинки, то элементарная работа, которую надо затратить на ее поляризацию при квазистатическом процессе, определяется выражением $\delta A_{\text{пол}} = VE dP = VE_x dP_x$. Элементарная же механическая работа, совершаемая квазистатическими силами натяжения при удлинении ребер h и l , будет $\delta A_{\text{мех}} = b\tau_x dh + h\tau_y dl$. Применим к рассматриваемому процессу термодинамическое соотношение $dU = T ds + \delta A$. Разделив его на V и обозначив через s и u значения удельной энтропии и внутренней энергии, получим

$$du = T ds + E_x dP_x + \tau_x \frac{dh}{h} + \tau_y \frac{dl}{l},$$

или

$$du = T ds + E_x dP_x + \tau_x d \ln h + \tau_y d \ln l.$$

Введя функцию $g = u - Ts - E_x P_x - \tau_x \ln h - \tau_y \ln l$, преобразуем это соотношение к виду

$$dg = -s dT - P_x dE_x - \ln h d\tau_x - \ln l d\tau_y.$$

Так как выражение справа есть полный дифференциал функции g , то должно быть

$$\left(\frac{\partial P_x}{\partial \tau_x}\right)_T = \left(\frac{\partial \ln h}{\partial E_x}\right)_T = \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial E_x},$$

$$\left(\frac{\partial P_x}{\partial \tau_y}\right)_T = \left(\frac{\partial \ln l}{\partial E_x}\right)_T = \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial E_x},$$

или с учетом соотношения (37.1)

$$\frac{\partial h}{\partial E_x} = hd_{11}, \quad \frac{\partial l}{\partial E_x} = -ld_{11}. \quad (37.2)$$

Эти формулы и описывают обратный пьезоэлектрический эффект в кварце. В линейном приближении, в котором только и верна излагаемая теория, формулы (37.2) записываются в виде

$$\delta h = d_{11}hE_x = d_{11}\varphi, \quad (37.3)$$

$$\delta l = -d_{11}lE_x = -\frac{l}{h}d_{11}\varphi, \quad (37.4)$$

где δh и δl — абсолютные приращения размеров пластинки при наложении электрического поля E_x , а $\varphi = hE_x$ — разность потенциалов между гранью bl и гранью, ей противоположной (рис. 98).

Формула (37.3) выражает *продольный обратный пьезоэлектрический эффект*, а формула (37.4) — *поперечный*. При наложении электрического поля параллельно электрической оси меняется толщина пластинки (продольный эффект) и ее длина (поперечный эффект). Если толщина h увеличивается, то длина l уменьшается, и наоборот, причем относительные изменения этих размеров по абсолютной величине одинаковы, так что объем пластинки остается неизменным. Абсолютное значение δh не зависит от толщины пластинки, а только от приложенной разности потенциалов φ . При $\varphi = 3000 \text{ В} = 10 \text{ СГСЭ-ед.}$ из формулы (37.3) находим $\delta h = 6,99 \cdot 10^{-7} \text{ см} = 6,99 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}$. Если $l = 10h$, то поперечный эффект при той же разности потенциалов будет в 10 раз больше. Модуль Юнга кварца в направлении электрической оси $\mathcal{E} = 7,87 \cdot 10^{11} \text{ дин/см}^2$. При толщине пластинки $h = 0,5 \text{ см}$ в ней в случае продольного эффекта в приведенном выше примере возникают натяжения или давления $\mathcal{P} = \mathcal{E} \delta h/h \approx 1,1 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2 \approx 1,1 \text{ атм}$.

Термодинамические рассуждения, изложенные выше, проведены в предположении, что температура остается постоянной. Поэтому пьезоэлектрический модуль d_{11} может быть охарактеризован как *изотермический модуль*. Нетрудно видеть, как следует изменить эти рассуждения применительно к адиабатическим процессам. Формулы (37.1), (37.3) и (37.4) остаются верными и для таких процессов. Только изотермический пьезоэлектрический модуль d_{11} надо заменить адиабатическим.

7. Что касается связи между направлениями происходящих изменений в прямом и обратном пьезоэлектрических эффектах, то здесь применим общий принцип Ле Шателье (см. т. II, § 51), как в этом нетрудно убедиться с помощью формул (37.1), (37.3) и (37.4). Например, при растяжении пластинки вдоль оси X (см. рис. 98) или сжатии вдоль оси Y на ее нижней поверхности, как мы видели, возбуждается положительный заряд, а на верхней — отрицательный ($P_x > 0$). Иными словами, в пластинке появляется электрическое поле, направленное вверх ($E_x < 0$). Согласно принципу Ле Шателье появление такого поля можно рассматривать как противодействие системы приложенным растягивающим и сжимающим силам. Это противодействие проявляется в том, что возникают силы, стремящиеся сжать пластинку в направлении оси X и растянуть в направлении оси Y . Если поле E_x усилить, то увеличатся и противодействующие силы. Они появляются и в недеформированной пластинке при внесении ее в электрическое поле. Если электрическое поле направлено вверх ($E_x < 0$), то в направлении оси X пластинка сожмется, а в направлении оси Y — удлинится. Это находится в согласии с формулами (37.3) и (37.4). Так же можно рассуждать и в остальных случаях.

8. Физический механизм обратного пьезоэлектрического эффекта можно разъяснить на той же модели, которая применялась при рассмотрении прямого эффекта. Если, например, на поверхности A и B (см. рис. 97, б) нанести электрические заряды указанных знаков, то ион кремния 3 притянется к поверхности A , а ион кислорода 4 — к поверхности B , в результате чего ячейка вытянется в направлении оси X_1 . Ионы кремния 1 и 2 будут отталкиваться от поверхности B , а ионы кислорода — от поверхности A , смещаясь при этом внутрь увеличивше-

гося зазора между ионами 3 и 4. Это приведет к сжатию ячейки в поперечном направлении (вдоль механической оси Y).

Обратный пьезоэлектрический эффект имеет внешнее сходство с *электрострикцией* (§ 33). Однако между этими двумя явлениями имеется и существенное различие. Электрострикция имеет место *во всех* диэлектриках при помещении их в *неоднородное* электрическое поле. Обратный пьезоэлектрический эффект наблюдается *только в кристаллах*, да и то не во всех. Он существует *и в однородных* электрических полях. Силы электрострикции возникают в результате действия электрического поля на поляризованный диэлектрик, поляризация которого обусловлена тем же полем. Поэтому электрострикционные силы *квадратичны по полю*. Они не меняются при изменении направления электрического поля на противоположное. Напротив, обратный пьезоэлектрический эффект возникает в результате действия *внешнего электрического поля* на уже имеющиеся противоположно заряженные ионные решетки кристалла. Возникающие здесь силы *линейны по полю*. Они меняют свои направления на противоположные при изменении знака электрического поля.

9. В различных кристаллах пьезоэлектрический эффект может возникать не только под действием нормальных сил давления или натяжения, но и под действием *касательных сил*. Внутреннее состояние упругих напряжений кристалла характеризуется симметричным тензором упругих натяжений (см. т. I, § 74):

$$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}, \tau_{xy} = \tau_{yx}$$

(первый индекс указывает направление внешней нормали площадки, к которой приложена сила натяжения, а второй — направление координатной оси, на которую проектируется эта сила). Для сокращения записи компоненты тензора натяжений принято нумеровать одним индексом, полагая

$$\begin{aligned} \tau_1 &\equiv \tau_{xx}, & \tau_2 &\equiv \tau_{yy}, & \tau_3 &\equiv \tau_{zz}, \\ \tau_4 &\equiv \tau_{yz} = \tau_{zy}, & \tau_5 &\equiv \tau_{zx} = \tau_{xz}, & \tau_6 &\equiv \tau_{xy} = \tau_{yx}. \end{aligned}$$

Опыт показывает, что в случае малых деформаций между компонентами вектора поляризации P и компонентами тензора натяжений существует *линейная связь*. Такая зависимость аналогична известному закону Гука и имеет примерно ту же область применимости. Таким образом, в общем случае можно написать

$$\begin{aligned} P_x &= d_{11}\tau_1 + d_{12}\tau_2 + d_{13}\tau_3 + d_{14}\tau_4 + d_{15}\tau_5 + d_{16}\tau_6, \\ P_y &= d_{21}\tau_1 + d_{22}\tau_2 + d_{23}\tau_3 + d_{24}\tau_4 + d_{25}\tau_5 + d_{26}\tau_6, \\ P_z &= d_{31}\tau_1 + d_{32}\tau_2 + d_{33}\tau_3 + d_{34}\tau_4 + d_{35}\tau_5 + d_{36}\tau_6. \end{aligned} \quad (37.5)$$

Отсюда видно, что в общем случае пьезоэлектрические свойства кристалла характеризуются *восемнадцатью постоянными*. Эти постоянные называются *пьезоэлектрическими модулями*. Впрочем, число независимых пьезоэлектрических модулей уменьшается из-за симметрии кристалла. Чем выше симметрия кристалла, тем меньше число независимых пьезоэлектрических модулей, которыми он характеризуется. Так, в случае кварца $d_{12} = -d_{11}$, $d_{25} = -d_{14}$, $d_{26} = -2d_{11}$, а все остальные пьезоэлектрические модули обращаются в нуль. Таким образом, пьезоэлектрические свойства кварца характеризуются только двумя модулями, за которые можно принять d_{11} и d_{14} . Тогда

$$\begin{aligned} P_x &= d_{11}\tau_1 - d_{11}\tau_2 + d_{14}\tau_4, \\ P_y &= -d_{14}\tau_5 - 2d_{11}\tau_6, \\ P_z &= 0. \end{aligned} \quad (37.6)$$

При этом $d_{14} = -2,0 \cdot 10^{-8}$ дин $^{-1/2}$ ·см. Численное значение модуля d_{11} было приведено выше.

10. Известны сотни веществ, которые в принципе могли бы быть использованы для практического применения пьезоэлектричества. Однако дополнительные требования (большая величина пьезоэффекта, механическая и электрическая прочность, устойчивость к влаге и пр.) резко ограничивают список практически при-

годных кристаллов. Из них на первом месте стоит *кварц*. Он превосходный изолятор, поэтому в нем можно возбуждать сильные поля, порядка 30 000 В/см. Научно-технические применения пьезоэлектрического эффекта (прямого и обратного) весьма многочисленны и разнообразны. Не имея возможности останавливаться на этой стороне вопроса, укажем на *пьезоэлектрический манометр*, широко применяющийся для измерения быстропеременных давлений. В этом приборе кварцевая пластинка, вырезанная определенным образом, помещается внутри исследуемого газа. О давлении газа судят по величине пьезоэлектрических зарядов, появляющихся на пластинке. Укажем далее на разнообразнейшие *пьезоэлектрические преобразователи*: *пьезоэлектрические стабилизаторы* и *фильтры* в радиотехнике, *пьезоэлектрические датчики* в автоматике и телемеханике, *виброметры*, *звукосниматели* в технике звукозаписи, *микрофоны*, *телефоны*, *гидрофоны* в акустике и т. д. Особо важное значение имеют *кварцевые излучатели ультразвука*, предложенные во время первой мировой войны французским физиком Ланжевенем (1872—1946). Смещения, возникающие в кварцевой пластинке при наложении на нее статического электрического поля, ничтожны. Однако их можно увеличить в тысячи, а энергию колебаний — в миллионы раз, если воспользоваться переменным электрическим полем. Для этого следует использовать явление резонанса, т. е. подобрать частоту наложенного электрического поля равной одной из собственных частот механических колебаний кварца. Собственные частоты кварца определяются соотношением

$$h = \frac{\lambda}{2} n_z$$

где λ — длина ультразвуковой волны в кварце, а n — целое число. При $n = 1$ получается основное колебание пластинки, при $n = 2, 3, 4, \dots$ — соответствующие ему обертоны. При резонансной частоте электрического поля кварцевая пластинка, как показал Ланжевен, является мощным источником ультразвука. Такие источники ультразвука и были предложены Ланжевенем для измерения морских глубин и подводной сигнализации. С этого времени началось бурное развитие практических применений пьезоэлектричества.

§ 38. Пирозлектричество

1. У некоторых пьезоэлектрических кристаллов решетка положительных ионов в состоянии термодинамического равновесия смещена относительно решетки отрицательных ионов таким образом, что кристаллы оказываются *электрически поляризованными* даже в отсутствие электрического поля. Такая поляризация называется *спонтанной*, а кристаллы, у которых она наблюдается, — *пирозлектрическими*. Обычно эффект спонтанной поляризации замаскирован свободными поверхностными зарядами, появляющимися в результате оседания ионов из воздуха и их последующего распространения по поверхности кристалла, обладающего хотя и ничтожной, но все же конечной электропроводностью. Однако при нагревании ионные решетки, из которых построен кристалл, смещаются одна относительно другой, вследствие чего на поверхности кристалла появляются электрические заряды противоположных знаков. Возникновение таких зарядов называется *прямым пирозлектрическим эффектом*. Вещества, в которых наблюдается этот эффект, называются *пирозлектриками* («пир» — огонь).

К наиболее известным пирозлектрикам относится турмалин. Кристалл турмалина, помещенный в горячий пепел, сначала притягивает, а затем отталкивает его. В Индии и Шри Ланка (о. Цейлон) это явление, по-видимому, было известно с незапамятных времен. В Европе о нем узнали впервые около 1703 г., когда голландские купцы привезли из Шри Ланка турмалин.

Для обнаружения пирозлектрического эффекта Август Кундт (1839—1894) предложил погружать кристалл турмалина в смесь порошков сурика и серы. В результате трения друг о друга при перемешивании сурик электризуется поло-