

$= 297 \text{ К}$, $\theta_{\text{нижн}} = 255 \text{ К}$. При температуре, равной верхней точке Кюри, силы взаимодействия между диполями уже не в состоянии противодействовать тепловому движению, вследствие чего нарушается ориентация в областях спонтанной поляризации. Вблизи точки Кюри в сегнетоэлектриках наблюдается резкое возрастание теплоемкости вещества. На рис. 6.10 приведена зависимость c_p от температуры для титаната бария.

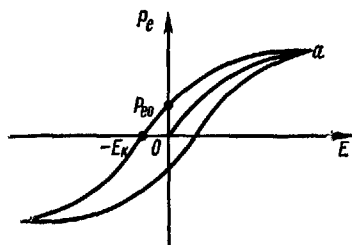


Рис. 6.13

Превращение сегнетоэлектрика в обычный полярный диэлектрик, происходящее в точке Кюри, является примером фазового перехода. Выше точки Кюри существует неупорядоченная фаза, причем в отсутствие внешнего поля диэлектрик не поляризован. Ниже точки Кюри имеется упорядоченная фаза, характеризующаяся наличием спонтанной поляризации в доменах.

Спонтанная поляризация доменов исчезает при нагреве сегнетоэлектрика до верхней точки Кюри либо скачком — фазовый переход 1-го рода (например, у титаната бария), либо плавно уменьшаясь по мере приближения к этой температуре — фазовый переход 2-го рода (например, у сегнетовой соли).

7. Для сегнетоэлектриков характерно явление диэлектрического гистерезиса («гистерезис» по-гречески значит «запаздывание»). Как видно из рис. 6.13, с увеличением напряженности E внешнего электрического поля числовое значение вектора поляризации сегнетоэлектрика растет и достигает насыщения (в точке a). Если затем постепенно напряженность внешнего поля довести до нуля, то вектор поляризации, уменьшаясь, достигает значения P_{e0} (остаточная поляризация). Лишь при наложении некоторого поля обратного направления ($-E_K$) поляризация исчезает полностью. Величина E_K называется **коэрцитивной силой**. При периодическом изменении поляризации диэлектрика затрачивается электрическая энергия, которая расходуется на нагревание сегнетоэлектрика. Площадь петли гистерезиса пропорциональна плотности этой энергии (т.е. электрической энергии, превращающейся во внутреннюю энергию в единице объема сегнетоэлектрика за один цикл). Легко убедиться в том, что размерность $P_e E$ или DE совпадает с размерностью плотности энергии.

8. Сегнетоэлектрики имеют большое практическое значение в современной электро- и радиотехнике. Их используют для изготовления конденсаторов большой емкости и малых размеров, для модуляции частоты электромагнитных колебаний и т. д.

§ 6.5. Пьезоэлектрический эффект

1. Пьезоэлектрический эффект, открытый в 1880 г. братьями Жаком и Полем Кюри, состоит в том, что на гранях некоторых кристаллов при их сжатии или растяжении появляются заряды,

подобные поляризационным. К таким кристаллам относятся кварц, турмалин, сегнетова соль, сахар, цинковая обманка, титанат бария и др.

2. Рассмотрим пьезоэлектрические свойства кристалла кварца (рис. 6.14). Главная ось кристалла Z называется **оптической**, а оси X_1 , X_2 и X_3 , перпендикулярные ей, — **электрическими** осями.

Для изучения пьезополяризационных зарядов кристалла проведем следующий опыт. Закрепив кристалл кварца так, как показано на рис. 6.15, будем сжимать его в направлении одной из электрических осей. При сжатии кристалла на его ребрах возникают заряды, знаки которых указаны на рис. 6.15. Для количественного исследования зарядов к граням кристалла прикрепляют узкие станиоловые полоски — электроды K_1 и K_2 , соединенные с чувствительным электрометром. Опыты показывают, что поверхностная плотность пьезополяризационных зарядов $\sigma_{pp} = q_{pp}/S$ пропорциональна упругому напряжению в кристалле.

При сжатии или растяжении кристалла заряды появляются всегда на концах какой-либо из электрических осей. Поэтому для пьезоэлектрических опытов из кристалла вырезают плоскопараллельные пластинки так, чтобы одна пара граней у каждой из них была перпендикулярна одной из электрических осей (рис. 6.16).

Пусть плоскопараллельная пластинка вырезана таким образом, что ее ребро d (толщина) направлено параллельно электрической оси X , ребро b (высота) — параллельно оптической оси Z , а ребро l (длина) — параллельно оси Y , перпендикулярной осям X и Z . Если подвергнуть эту пластинку деформациям сжатия и растяжения в направлениях осей X , Y и Z , то можно прийти к следующим выводам:

а) сжатие вдоль оси X вызывает появление разноименных зарядов на обеих гранях, нормальных к оси X (**продольный прямой пьезоэлектрический эффект**);

б) растяжение вдоль оси Y вызывает появление разноименных зарядов на обеих гранях, нормальных к оси X (**поперечный прямой пьезоэлектрический эффект**);

в) при растяжении пластинки вдоль оси X или сжатии ее вдоль оси Y знаки зарядов на указанных гранях изменяются на противоположные;

г) сжатие или растяжение вдоль оси Z не вызывает пьезоэлектрического эффекта.

Пьезоэлектрический эффект используется для измерения напряжений, возникающих в отдельных частях машин, зданий и других сооружений.

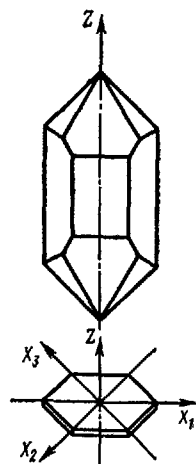


Рис. 6.14

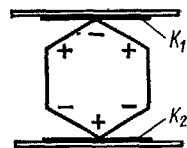


Рис. 6.15

3. Наблюдается явление, обратное пьезоэлектрическому эффекту. В этом случае также различают продольный и поперечный эффекты, которые состоят в следующем: при внесении кварцевой пластинки в электрическое поле, направленное вдоль оси X , пластинка деформируется не только в направлении оси X (**продольный обратный пьезоэлек-**

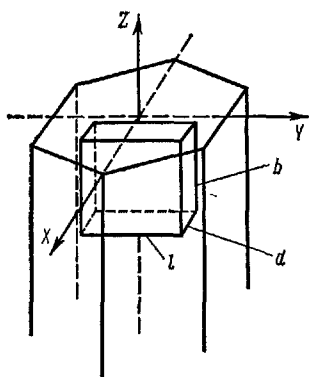


Рис. 6.16

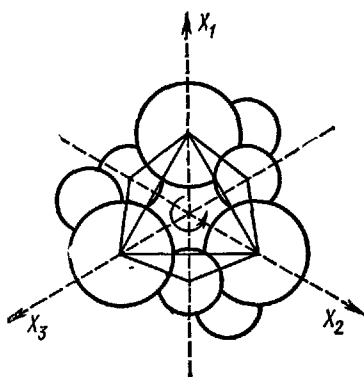


Рис. 6.17

трический эффект), но и в направлении оси Y (**поперечный обратный пьезоэлектрический эффект**), причем растяжение пластинки вдоль оси X сопровождается ее сжатием вдоль оси Y . Изменение направления электрического поля вызывает изменение характера деформации вдоль осей X и Y .

4. Чем же объясняются пьезоэлектрические свойства кварца? Рассмотрим этот вопрос с молекулярной точки зрения. Результаты рентгеноструктурного исследования кварца (SiO_2) позволяют в первом приближении представить размещение ионов кремния и кислорода в шестиугольных структурных ячейках так, как это показано на рис. 6.17, плоскость которого перпендикулярна оптической оси Z кристалла. Большие кружки обозначают ионы Si , маленькие — ионы O .

Каждый ион Si обладает положительным зарядом $+4e$, а каждый ион O — зарядом $-2e$, где e — элементарный электрический заряд. В ячейке (рис. 6.17) заряды всех ионов взаимно компенсируются, и в целом она электрически нейтральна. Если для упрощения рассматривать каждую пару ионов O как одну частицу с зарядом $-4e$, то ячейка, изображенная на рис. 6.17, принимает форму, показанную на рис. 6.18, а.

Предположим теперь, что такая структурная ячейка сжимается в направлении электрической оси X_1 (рис. 6.18, б). Тогда ион Si — 1 сдвигается внутрь ячейки и занимает место между ионами O —2 и O —6, а ион O —4 оказывается между ионами Si —3 и Si —5. Вследствие этого на поверхности A ячейки возникает отрицательный заряд, а на поверхности B — положительный, т.е. имеет место продольный прямой пьезоэлектрический эффект. Если же сжатие происходит в

направлении, перпендикулярном оси X_1 (рис. 6.18, в), то ионы Si—3 и O—2 смещаются влево, а ионы Si—5 и O—6 — вправо. На поверхностях C и D добавочные заряды не возникают. На поверхностях A и B появляются заряды, противоположные по знаку тем, которые наблюдались в первом случае, так как теперь ионы Si—1 и O—4 выдвигаются

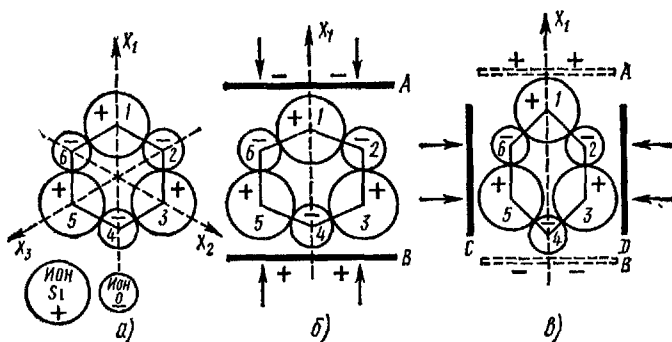


Рис. 6.18

из ячейки. Таким образом, возникает поперечный прямой пьезоэлектрический эффект. На модели структурной ячейки легко объяснить изменение знаков поверхностных зарядов на обратные в случае растяжения, а также тот факт, что сжатие или растяжение вдоль оси Z не может вызвать никакой асимметрии в расположении зарядов в ячейке.

Пользуясь моделью ячейки, можно рассмотреть и обратный пьезоэлектрический эффект. Если внешнее электрическое поле направлено параллельно оси X_1 , то ион Si—1 смещается к поверхности A , а ион O—4 — к поверхности B ; кристалл удлиняется в направлении оси X_1 и сжимается в направлении, перпендикулярном ей (рис. 6.18, в).

5. Если электрическое поле периодически меняется с частотой, равной частоте собственных механических колебаний пластинки пьезокварца, то пластинка приходит в резонансные колебания. Эти колебания передаются окружающей среде и распространяются в ней в виде волн.

При определенных размерах пластинки частота ее резонансных колебаний достигает 10^5 — 10^7 Гц. Такие колебания называются ультразвуковыми (ухо человека слышит звуковые колебания, частоты которых заключены в пределах от 16 до 20 000 Гц). Свойства и применения ультразвуковых волн рассмотрены в третьем томе курса.

Вопросы для повторения

1. Что происходит с неполярными молекулами диэлектриков во внешнем электрическом поле?
2. Как действует электрическое поле на жесткий диполь?
3. В чем состоит различие в поляризации диэлектриков с полярными и неполярными молекулами?
4. Каков физический смысл вектора поляризации?