

§ 6.4. Сегнетоэлектрики

1. Относительная диэлектрическая проницаемость большинства кристаллических диэлектриков почти не изменяется с изменением температуры. Это означает, что диэлектрические свойства твердых тел связаны с перераспределением зарядов внутри молекул и не зависят от теплового движения последних. Другими словами, в

твердых диэлектриках имеет место индуцированная электронная поляризация. Ориентационная поляризация, как правило, не наблюдается даже в кристаллах, построенных из дипольных молекул¹. Дело в том, что молекулы в кристаллах весьма сильно взаимодействуют друг с другом и при обычных по величине напряженностях полярные молекулы не в состоянии поворачиваться вдоль поля. Поэтому относительная диэлектрическая проницаемость вещества в твердом состоянии обычно меньше, чем в жидком. Например, для воды при 18°C $\epsilon = 80,4$, а для льда при -18°C $\epsilon = 3,2$.

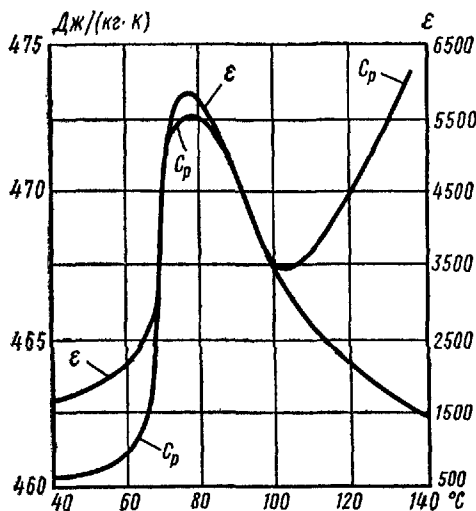


Рис. 6.10

2. Существует группа кристаллических диэлектриков, называемых **сегнетоэлектриками**, которые обладают рядом своеобразных электрических свойств. Своё название они получили по первому исследованному веществу этого типа — сегнетовой соли ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Свойства сегнетовой соли были изучены группой работников под руководством И. В. Курчатова. Представителем сегнетоэлектриков является также титанат бария (BaTiO_3), исследованный Б. М. Вулом и его сотрудниками.

3. Характерной особенностью сегнетоэлектриков является резкое возрастание относительной диэлектрической проницаемости в определенном интервале температур. На рис. 6.10 приведена температурная зависимость ϵ для титаната бария. При температурах порядка 120°C ϵ имеет значения, близкие к 2000. При понижении температуры до некоторого значения θ (для BaTiO_3 $\theta = 80^\circ\text{C}$) ϵ резко возрастает, достигая нескольких тысяч после чего вновь уменьшается с понижением температуры.

¹ Одним из немногих исключений являются кристаллы соляной кислоты. Как показал И. В. Курчатов, в кристаллах HCl происходит ориентационная поляризация.

4. Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и диэлектрическая восприимчивость χ сегнетоэлектриков зависят от напряженности E поля в веществе, тогда как в остальных диэлектриках ϵ и χ являются их характеристиками, не зависящими от E . На рис. 6.11 приведена кривая $\epsilon = \epsilon(E)$. Аналогичный вид имеет и кривая $\chi = \chi(E)$. Поэтому в сегнетоэлектриках отсутствует прямая пропорцио-



Рис. 6.11

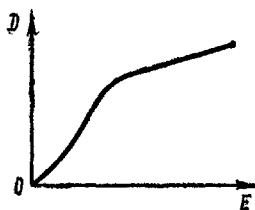


Рис. 6.12

нальность между вектором поляризации P_e и напряженностью электрического поля E . Для сегнетоэлектриков, так же как и для диэлектриков с полярными молекулами, характерно явление насыщения, состоящее в том, что начиная с некоторого достаточно большого значения напряженности поля E вектор поляризации не изменяется (см. рис. 6.5).

На основании рис. 6.11 можно сказать, что при не очень сильных полях зависимость электрического смещения D от напряженности поля E в сегнетоэлектрике нелинейная. Нелинейное возрастание D с ростом E сменяется линейным лишь при очень больших значениях E (рис. 6.12).

5. Большие значения относительной диэлектрической проницаемости, наблюдаемые у сегнетоэлектриков, обусловлены особенностями процесса поляризации в этих веществах. Оказалось, что монокристалл сегнетоэлектрика разбит на ряд самопроизвольно поляризованных областей — доменов. Эта самопроизвольная (спонтанная) поляризация является результатом ориентации дипольных моментов всех молекул внутри домена в некотором определенном направлении. Однако при отсутствии внешнего поля области спонтанной поляризации располагаются так, что электрические дипольные моменты различных доменов компенсируют друг друга и средняя поляризация достаточно большого монокристалла или поликристалла равна нулю. При внесении кристалла сегнетоэлектрика во внешнее электрическое поле происходит переориентация электрических моментов доменов и весь кристалл оказывается поляризованным.

6. Опыт показывает, что спонтанная ориентация дипольных моментов, ведущая к образованию доменов, происходит у сегнетоэлектриков в определенном температурном интервале между так называемыми точками Кюри — верхней и нижней¹. Для сегнетовой соли $\theta_{\text{верхн}} =$

¹ Свое название эти температуры получили по аналогии с точкой Кюри ферромагнитных веществ (см. § 20.6).

$= 297 \text{ К}$, $\theta_{\text{нижн}} = 255 \text{ К}$. 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.

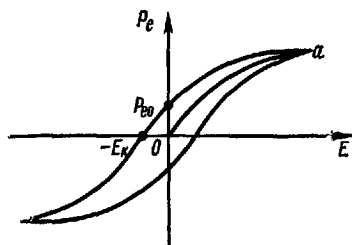


Рис. 6.13

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,