

диэлектрики получили название *электретов*. Электретное состояние может быть создано различными методами. В соответствии с этим электреты делятся на *термо-, фото-, электро-, магнито-, трибо-, механо- и радиоэлектреты*.

Термоэлектреты получают следующим образом. При повышенной температуре диэлектрик поляризуется в сильном внешнем поле, а затем в этом же поле охлаждается. В результате такой обработки поляризованное состояние оказывается «замороженным», поскольку время релаксации медленных тепловых механизмов при уменьшении T снижается в тысячи и миллионы раз

$$\tau \sim \exp\left(-\frac{U}{k_B T}\right).$$

Поляризованное состояние термоэлектрета может сохраняться в течение многих лет. Электрет создает в окружающем пространстве постоянное электрическое поле, подобно магниту, являющемуся источником постоянного магнитного поля. Электретное состояние является метастабильным. Нагрев термоэлектрета при $E=0$ приводит его к деполяризации.

Фотоэлектреты формируют из диэлектриков, обладающих повышенной фотопроводимостью, при одновременном воздействии электрического поля и света. Фотоэлектретное состояние может быть ликвидировано сильным электрическим полем.

При одновременном воздействии электрического и магнитного поля может быть получен магнитоэлектрет.

Электро-, трибо-, механо- и радиоэлектреты получают при воздействии лишь одного фактора: соответственно, сильного электрического поля, трения, механической деформации и радиационных воздействий.

9.12. СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

Выше отмечалось, что в ряде диэлектрических кристаллов существует спонтанная поляризация, т. е. кристалл поляризован даже в отсутствие внешнего электрического поля. Спонтанная поляризация проявляется в пьезоэлектрическом эффекте, обусловленном тепловым разупорядочиванием диполей. В обычных линейных пьезоэлектриках величина поляризации P уменьшается с ростом температуры. При этом никакие электрические поля вплоть до полей, при которых наступает пробой, не могут изменить направление вектора спонтанной поляризации. Существует, однако, большая группа диэлектриков, для которых характерно явление самопроизвольной поляризации, обладающих нелинейной зависимостью поляризации от напряженности поля и способностью к переполяризации. Такие

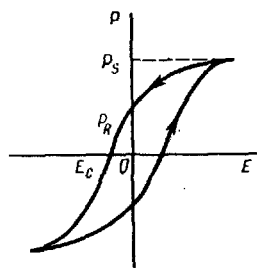


Рис. 9.13. Петля гистерезиса сегнетозэлектрика

нелинейные пьезоэлектрики называются сегнетозэлектриками.

Сегнетозэлектрики получили свое название от названия сегнетовой соли $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ — минерала, для которого впервые наблюдалась нелинейность зависимости $\vec{P}(\vec{E})$. Наиболее детальные исследования сегнетовой соли были выполнены в 1930—1934 гг. И. В. Курчатовым с сотрудниками. Большой вклад в изучение сегнетозэлектриков внесли советские физики

под руководством Б. М. Вула. В 1944—1946 гг. Б. М. Вул и И. М. Гольдман открыли новый сегнетозэлектрик — титанат бария (BaTiO_3). Выполненное ими исследование свойств этого материала дало очень многое для понимания природы сегнетозэлектричества.

Наиболее характерной особенностью сегнетозэлектриков является то, что зависимость их поляризации \vec{P} от поля \vec{E} имеет вид петли гистерезиса (рис. 9.13). Существование гистерезиса в сегнетозэлектриках связано с наличием сегнетозэлектрических доменов — объемных областей, в каждой из которых дипольные моменты ориентированы одинаково, но в соседних доменах векторы \vec{P} направлены различно. Такие домены были обнаружены экспериментально в титанате бария.

Возникновение доменов можно представить себе следующим образом. Взаимодействие между соседними диполями приводит к их упорядочению в кристалле. Это стремление к упорядочению передается от диполя к диполю, так что целые макроскопические области твердого тела становятся поляризованными в определенном направлении. Однако энергетически выгодным является образование не однодоменной структуры, а многодоменной. Однодоменный кристалл создает в окружающем пространстве электрическое поле, которое, как было отмечено выше, называют деполяризующим (рис. 9.14, а). Из рис. 9.14, б видно, что уже в двухдоменном кристалле энергия деполяризующего поля будет меньше. Дальнейшее снижение энергии деполяризации наблюдается при образовании многодоменной структуры (рис. 9.14, в). Таким образом, деление сегнетозэлектрика на домены приводит к снижению энергии деполяризации. В то же время при этом возрастает энергия, связанная с образованием границ доменов — тонких слоев, разделяющих области с различным направлением поляризации. На рис. 9.14 изображены домены, в которых угол между векторами \vec{P} со-

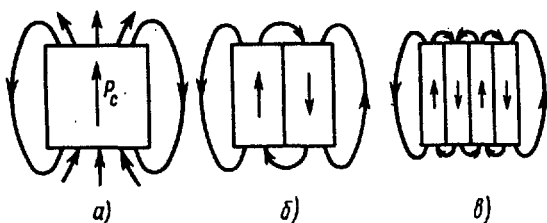


Рис. 9.14. Деление сегнетоэлектрика на домены

ставляет 180° (180-градусные домены). Эти углы могут составлять также 90° или иметь другие значения. Расчеты показывают, что толщина области, разделяющей 180-градусные домены (*доменной стенки*), не превышает нескольких ангстрем. При этом энергия стенки достаточно велика ($\sim 10^{-6}$ Дж/см²). Процесс деления на домены заканчивается, когда уменьшение энергии деполяризующего поля сравнивается с увеличением поверхностной энергии доменных стенок. Суммарная поляризация сегнетоэлектрического кристалла представляет собой векторную сумму поляризаций всех доменов.

Изменение поляризации макроскопического образца сегнетоэлектрика во внешнем электрическом поле может осуществляться за счет следующих процессов: 1) поляризация каждого домена может меняться по величине; 2) векторы поляризации отдельных доменов могут изменять свое направление (поворачиваться в направлении поля); 3) наиболее выгодно ориентированные домены могут увеличиваться в размерах за счет доменов с невыгодной ориентацией, т. е. может наблюдаться смещение границ доменов. Из рис. 9.13 видно, что при определенной

величине поля \vec{E} поляризация достигает насыщения P_s . Если после достижения насыщения поле уменьшается до нуля, то сохраняется поляризация P_R , называемая *остаточной*. Для того, чтобы эту поляризацию свести к нулю, необходимо приложить внешнее поле обратного направления. Это поле E_c называют *коэрцитивной силой*. Остаточная поляризация и коэрцитивная сила зависят как от природы материала, так и от факторов, влияющих на движение доменных стенок, — размеров кристаллитов, примесей, дефектов.

Поскольку поляризация \vec{P} сегнетоэлектриков зависит от внешнего поля \vec{E} нелинейно, определить диэлектрическую проницаемость таких материалов нельзя так просто, как это было сделано выше для несегнетоэлектриков. В этом случае ϵ сама является функцией напряженности поля. Поэтому для сегнето-

Таблица 9.1

Вещество	Химическая формула	Температура Кюри, T_k, K
Ниобат лития	$LiNbO_3$	1500
Ниобат калия	$KNbO_3$	685
Титанат бария	$BaTiO_3$	400
КДР	KH_2PO_4	123
Сегнетова соль	$KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	297
		255

электриков вводится понятие *дифференциальной относительной диэлектрической проницаемости*:

$$\epsilon_{\text{диф}} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial D}{\partial E}. \quad (9.70)$$

Спонтанная поляризация сегнетоэлектриков сильно зависит от температуры. С повышением температуры P уменьшается и при некоторой температуре T_k , называемой *сегнетоэлектрической точкой Кюри*, P обращается в нуль. Таким образом, при $T > T_k$ тепловое движение разрушает сегнетоэлектрическое состояние и сегнетоэлектрик переходит в параэлектрическое состояние. В параэлектрической области зависимость ϵ от температуры описывается законом Кюри—Вейсса:

$$\epsilon = \frac{C}{T - T_k}. \quad (9.71)$$

Значения температуры Кюри для различных сегнетоэлектриков приведены в таблице 9.1. Из таблицы видно, что сегнетоэлектрический эффект в сегнетовой соли существует в очень узкой области температур.

Ряд ионных кристаллов, обладая спонтанной поляризацией, не обладает в то же время постоянным электрическим моментом. Такие кристаллы можно рассматривать как совокупность двух, вставленных одна в другую подрешеток, поляризованных в противоположных направлениях. Они получили название *антисегнетоэлектриков*. При некоторой температуре, называемой *антисегнетоэлектрической температурой Кюри*, они превращаются в параэлектрики.

Так же как пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики находят широкое применение в разнообразных устройствах электронной техники.

9.13. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Потерями называют ту часть электрической энергии, которая превращается в диэлектрике в тепло. Поскольку диэлектрики обладают некоторой проводимостью (хотя и очень незначитель-