

## 7 СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

В разделе 5 мы рассмотрели два основных класса диэлектриков: неполярные и полярные, а также изучили механизмы их поляризации. Однако существует группа химических соединений, относящихся к полярным диэлектрикам, которые в твёрдом состоянии имеют весьма необычные и интересные диэлектрические свойства. Эти вещества получили название сегнетоэлектриков. **Сегнетоэлектрики** - это такие диэлектрики, которые в определенном интервале температур могут быть самопроизвольно поляризованы, то есть могут иметь отличный от нуля вектор поляризации в отсутствие внешнего электрического поля. Такая поляризация называется **спонтанной**. На границах этого интервала при некоторой температуре, называемой **температурой Кюри**, происходит фазовый переход, и сегнетоэлектрик превращается в обычный полярный диэлектрик. Свойства сегнетоэлектриков объясняются сильным взаимодействием дипольных моментов соседних молекул и образованием вследствие этого **диэлектрических доменов** - областей спонтанной поляризации. В пределах каждого домена дипольные моменты всех частиц кристалла самопроизвольно устраниваются в одном направлении, параллельно друг другу. Обычно размеры доменов малы по сравнению с размерами всего кристалла, тогда направления поляризованности в разных доменах являются различными, так что результирующий дипольный момент всего образца равен нулю. Такая направленность доменов соответствует минимуму энергии, так как в противном случае вокруг сегнетоэлектрика возникло бы электрическое поле, которое обладало бы дополнительной энергией.

**Первое свойство сегнетоэлектриков** состоит в том, что их относительная диэлектрическая проницаемость может достигать очень больших значений ( $\epsilon_r \sim 10^2 - 10^4$ ). Это свойство объясняется тем обстоятельством, что под действием внешнего электрического поля происходит переориентация не отдельных дипольных моментов, а каждого домена целиком. Поэтому вектор поляризации быстро увеличивается при возрастании электрического поля, то есть диэлектрик обладает большой диэлектрической восприимчивостью  $\kappa$  и большой относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 1 + \kappa$ . Следовательно, неравенство (5.8) можно обобщить следующим образом

$$\kappa_{\text{неполярн}} < \kappa_{\text{полярн}} < \kappa_{\text{сегнетоэл}} \quad (7.1)$$

**Второе свойство сегнетоэлектриков** заключается в том, что электрическое смещение  $D$  оказывается не пропорциональным напряжённости поля  $E$ . Значит, диэлектрическая проницаемость зависит от значений электрического поля. Зависимость  $\epsilon_r$  от  $E$  описывается формулой

$$\varepsilon_r(E) = 1 + \frac{P(E)}{\varepsilon_0 E}, \quad (7.2)$$

где  $P(E)$  - поляризованность сегнетоэлектрика, зависящая от напряжённости поля.

Зависимость  $\varepsilon_r(E)$  графически представлена на рисунке 13.

При значительном возрастании напряженности электрического поля диэлектрик переходит в **состояние насыщения поляризации** ( $P = const$ ). В таком состоянии все домены переориентированы вдоль внешнего электрического поля. Из выражения (7.2) следует, что после перехода сегнетоэлектрика в состояние насыщения поляризации относительная диэлектрическая проницаемость монотонно стремится к 1. Таким образом, сегнетоэлектрические свойства образца проявляются при сравнительно небольших напряженностях электрического поля  $E \leq E_{кр}$ . Максимальных значений относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r$  достигает при критическом значении напряженности электрического поля  $E_{кр}$ .

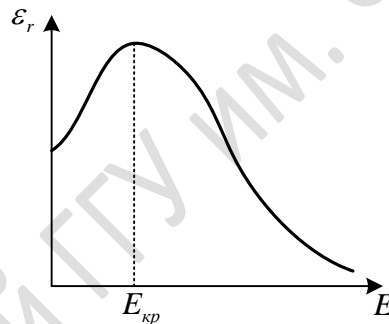


Рисунок 13 - Зависимость относительной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля

**Третье свойство сегнетоэлектриков** проявляется в том, что значения поляризованности  $P$ , а значит, и смещения  $D$  отстают от напряжённости поля  $E$ . В результате  $P$  и  $D$  определяются не только величиной  $E$  в данный момент, но и предшествующими состояниями сегнетоэлектрика, то есть значениями  $E$  в более ранние моменты времени. Это явление называется **гистерезисом, или запаздыванием поляризации**. При этом зависимость электрической индукции от напряженности  $D = f(E)$  является нелинейной и неоднозначной и имеет вид **петли гистерезиса** (рисунок 14).

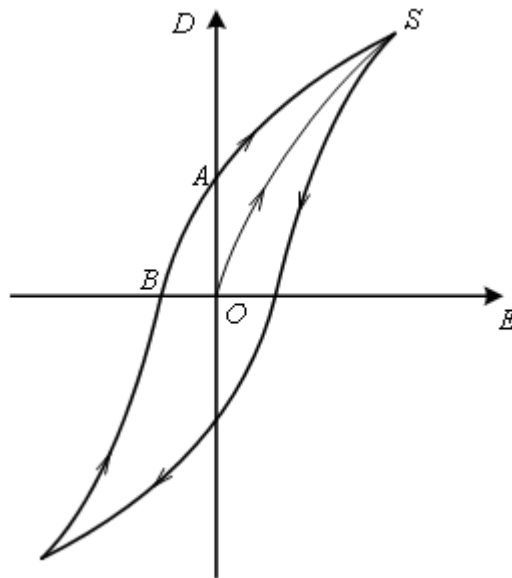


Рисунок 14 - Зависимость электрической индукции от напряженности поля для сегнетоэлектрика (петля гистерезиса)

Явление гистерезиса объясняется свойствами доменов, которые частично сохраняют направление поляризации при изменении внешнего электрического поля. Допустим, что сегнетоэлектрик приобрёл некоторую поляризованность под действием электрического поля. Этот процесс поляризации сегнетоэлектрика, который первоначально был не поляризован, можно представить кривой  $OS$  на рисунке 14. Затем, при уменьшении напряжённости электрического поля, индукция поля в среде будет убывать с задержкой, по другой ветви зависимости  $D = f(E)$ , а именно по кривой  $SB$ . Говорят, что индукция запаздывает относительно напряженности. Отрезок  $OA$  характеризует **остаточную поляризацию**, а отрезок  $OB$  – **коэрцитивную (задерживающую силу)**. Коэрцитивная сила - это напряженность такого поля, которое нужно приложить в противоположном направлении, чтобы избавиться от остаточной поляризации.

**Четвёртое свойство сегнетоэлектриков** состоит в наличии одной или нескольких точек Кюри, при которых происходит фазовый переход. Для сегнетоэлектриков выполняется **закон Кюри – Вейсса**

$$\kappa = \frac{C}{T - T_k}, \quad (7.3)$$

где  $\kappa$  - диэлектрическая восприимчивость;

$C$  - некоторая постоянная;

$T$  - абсолютная температура образца;

$T_k$  - **верхняя точка Кюри**, при которой происходит фазовый переход сегнетоэлектрика в неполяризованное состояние.

Формула (7.3) является справедливой при  $T > T_k$  и показывает, что для температур, превышающих температуру Кюри, диэлектрическая

восприимчивость сегнетоэлектрика быстро уменьшается при нагревании образца.

Возможны случаи, когда сегнетоэлектрик имеет также **нижнюю точку Кюри**, то есть низкотемпературную границу состояния со спонтанной поляризацией. Вблизи этой температуры закон Кюри – Вейсса принимает вид

$$\kappa = \frac{C'}{T_k - T}, \quad (7.4)$$

где  $C'$  - некоторая новая константа;

$T_k$  - нижняя температура Кюри.

Соотношение (7.4) выполняется, если абсолютная температура сегнетоэлектрика удовлетворяет неравенству  $T < T_k$ .

Типичными представителями сегнетоэлектриков являются титанат бария ( $BaTiO_3$ ) и сегнетова соль. Например, для сегнетовой соли температуры Кюри приблизительно равны  $+24^\circ\text{C}$  и  $-18^\circ\text{C}$ , и сегнетоэлектрические свойства проявляются только при температурах, лежащих между этими двумя точками.