

СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Из всего многообразия физических свойств важнейшими свойствами, характеризующими вещество как диэлектрик, являются электрические — *поляризация, электропроводность, диэлектрические потери* и т. д. Многие годы диэлектрики применялись в основном как изоляторы. Поэтому наибольшее значение имели их малые электропроводности и диэлектрические потери, высокая электрическая прочность. В современных условиях диэлектрики используют не только в качестве пассивных элементов различных электрических схем. С их помощью осуществляют преобразование механической и тепловой энергии в электрическую (пьезоэлектрики и пироэлектрики). Ряд диэлектриков находит применение для детектирования, усиления, модуляции электрических и оптических сигналов. При этом важную роль играют такие свойства, как фотоэффект, электрооптические и гальваномангнитные явления.

9.1. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Еще в экспериментах Фарадея было установлено, что при заполнении диэлектриком пространства между пластинами конденсатора емкость последнего увеличивается в ϵ раз. Значение величины ϵ , которую называют *диэлектрической проницаемостью*, зависит только от свойств диэлектрика. Емкость C конденсатора связана с зарядом Q на его пластинах и разностью потенциалов V соотношением

$$C = Q/V. \quad (9.1)$$

Таким образом, увеличение емкости при постоянном заряде на электродах означает, что разность потенциалов уменьшается. (Предполагается, что конденсатор не подключен к источнику тока и электропроводность диэлектрика равна нулю, так что заряды не стекают.) Отсюда следует сделать вывод, что электрическое поле внутри конденсатора стало меньше, несмотря на то, что заряд на пластинах не изменился. Уменьшение напряженности поля можно объяснить, допустив, что на одной поверхности диэлектрика индуцируется положительный заряд, а на другой — отрицательный. Эти заряды нейтрализуют часть полного заряда на обкладках конденсатора, что и уменьшает напряженность поля в диэлектрике по сравнению с вакуумом (рис. 9.1).

Каков механизм появления поверхностных зарядов? Этот вопрос мы детально обсудим ниже, а сейчас введем некоторые

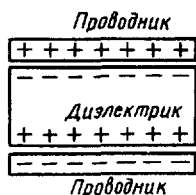


Рис. 9.1. Плоский конденсатор, заполненный диэлектриком

макроскопические параметры, характеризующие поляризацию диэлектрика в электрическом поле.

Под действием электрического поля частицы, составляющие диэлектрик (атомы, ионы, молекулы), превращаются в диполи. Это связано со смещением в направлении поля и против положительных и отрицательных зарядов, из которых построены эти частицы. Положительные полюса всех диполей оказываются сдвинутыми в направлении поля, а отрицательные — в

противоположном направлении. Таким образом, в диэлектрике, помещенном в электрическое поле, возникает *электрический момент (дипольный момент)*, который связан с дипольными моментами отдельных частиц и их плотностью. Величину, равную отношению электрического момента диэлектрика к его объему, называют *поляризуемостью*. В общем случае

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^N \vec{p}_i, \quad (9.2)$$

где \vec{p}_i — элементарные электрические моменты, возникающие в диэлектрике под действием поля; N — объемная плотность диполей.

В изотропных диэлектриках все элементарные дипольные моменты имеют одно и то же направление — направление поля. В этом случае векторную сумму в (9.2) можно заменить скалярной. Если смещение зарядов составляет Δx , то

$$P = N e \Delta x. \quad (9.3)$$

Таким образом, поляризуемость можно вычислить, если известны значения элементарных дипольных моментов и плотность диполей.

Кроме поляризуемости вводят еще такие макроскопические характеристики, как напряженность \vec{E} электрического поля в диэлектрике и электрическая индукция \vec{D} . Векторы \vec{D} , \vec{E} и \vec{P} связаны соотношениями:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}, \quad (9.4)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (9.5)$$

Здесь ϵ_0 — электрическая постоянная ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Для большинства диэлектриков в слабых и умеренных полях ϵ не зависит от \vec{E} (по крайней мере, в полях с напряженностью до $\sim 10^6$ В/м). В таком случае из (9.4) и (9.5) получим

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon - 1) \vec{E}. \quad (9.6)$$

Величину $\chi = \epsilon - 1$ называют *относительной диэлектрической восприимчивостью*. В изотропных диэлектриках векторы \vec{D} , \vec{E} и \vec{P} имеют одно и то же направление, так что χ и ϵ — простые числа.

В анизотропных кристаллах диэлектрическая проницаемость различна в разных направлениях. (Например, в кристалле титаната бария, имеющего тетрагональную структуру, в направлении оси четвертого порядка, в переменном поле частоты 1 кГц $\epsilon = 200$, тогда как в любом направлении, перпендикулярном этой оси, $\epsilon = 4000$). Анизотропия диэлектрической проницаемости описывается тензором второго ранга ϵ_{ij} . Это следует из уравнения (9.4), в котором \vec{D} и \vec{E} — векторы, т. е. тензоры первого ранга. В тензорной записи это уравнение имеет вид

$$\epsilon_0^{-1} D_i = \epsilon_{ij} E_j; \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (9.7)$$

или в развернутом виде:

$$\begin{aligned} \epsilon_0^{-1} D_1 &= \epsilon_{11} E_1 + \epsilon_{12} E_2 + \epsilon_{13} E_3, \\ \epsilon_0^{-1} D_2 &= \epsilon_{21} E_1 + \epsilon_{22} E_2 + \epsilon_{23} E_3, \\ \epsilon_0^{-1} D_3 &= \epsilon_{31} E_1 + \epsilon_{32} E_2 + \epsilon_{33} E_3. \end{aligned} \quad (9.8)$$

В уравнениях (9.8) тензор ϵ_{ij} содержит девять компонентов. Однако даже для кристаллов с низкой симметрией только шесть из девяти компонентов являются независимыми: тензор ϵ_{ij} является симметричным ($\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}$).

Очевидно, что макроскопические свойства диэлектрических материалов обусловлены микроскопическими процессами, происходящими в них при наложении электрического поля. Существует несколько таких процессов, приводящих к возникновению поляризации: смещение электронных оболочек атомов и ионов, смещение положительных ионов относительно отрицательных, ориентация в электрическом поле молекул, обладающих постоянным дипольным моментом, и др.

Для того, чтобы характеризовать различные виды поляризации, необходимо знать не только природу частиц, обуславливающих поляризацию, но и особенности межатомных и межмолекулярных взаимодействий. Если силы, стремящиеся вернуть в исходное положение смещенные электрическим полем частицы, носят квазиупругий характер, то говорят об *упругой поляризации*. Если же электроны, ионы или диполи при смещении в поле за счет тепловой энергии преодолевают потенциальные барьеры, то поляризацию называют *тепловой*. Рассмотрим эти процессы более подробно.

9.2. ЭЛЕКТРОННАЯ УПРУГАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Электронная упругая поляризация является наиболее общим видом поляризации. Она наблюдается во всех диэлектриках независимо от их агрегатного состояния (газ, жидкость,