

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,

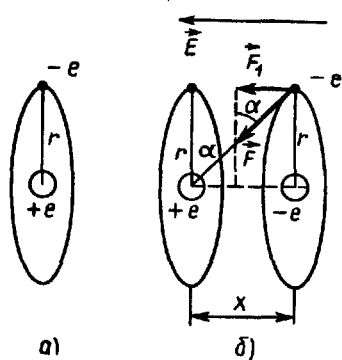


Рис. 9.2. Водородоподобный атом: а — в отсутствие внешнего поля, б — во внешнем электрическом поле

твердое тело) и структуры (кристалл, аморфное вещество). Атомы, из которых состоит диэлектрик, под действием внешнего электрического поля превращаются в электрические диполи вследствие того, что электронные оболочки и ядра смещаются относительно друг друга. Поскольку масса ядер во много раз больше массы электронов, то практически следует говорить о смещении электронов. Время установления электронной упругой поляризации исключительно мало: 10^{-16} — 10^{-17} с. Таким образом, электронная упругая поляризация успевает устанавли-

ваться в переменных полях высоких, вплоть до оптических, частот. Период световых колебаний составляет 10^{-14} — 10^{-15} с, так что запаздывание электронной поляризации наблюдается лишь в ультрафиолетовой области спектра, где частота электромагнитных колебаний 10^{16} — 10^{17} Гц.

Механизм электронной упругой поляризации проще всего понять на примере водородоподобного атома. Если внешнее поле $E=0$, то центр положительного заряда в атоме совпадает с центром отрицательного (рис. 9.2, а). Под действием электрического поля электронная оболочка сместится на некоторое расстояние, т. е. сместится геометрический центр отрицательного заряда. Обозначим смещение x (рис. 9.2, б). Атом находится в равновесии, если

$$eE = \kappa x. \quad (9.9)$$

Предполагается, что возвращающая сила F_1 является упругой с коэффициентом упругости κ . Смещение центров зарядов приводит к образованию электрического дипольного момента $P = ex$. С учетом того, что в равновесии $x = \frac{eE}{\kappa}$, имеем

$$P = \frac{e^2}{\kappa} E. \quad (9.10)$$

Индукцированный дипольный момент пропорционален напряженности поля. Коэффициент пропорциональности между P и E обычно обозначают α_e и называют *электронной поляризуемостью*. Из (9.10) следует, что

$$\alpha_e = e^2/\kappa. \quad (9.11)$$

Выше мы предположили, что возвращающая сила является квазиупругой, т. е. $F_1 = \kappa x$. То, что при малых смещениях x это так, нетрудно показать на примере обсуждаемой водородоподобной модели атома. Из рис. 9.2 видно, что возвращающая сила представляет собой проекцию силы притяжения между ядром и электроном на направление напряженности поля, т. е.

$$F_1 = F \cdot \sin \alpha. \quad (9.12)$$

Поскольку

$$F = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 (r^2 + x^2)}, \quad (9.13)$$

$$\sin \alpha = \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}}, \quad (9.14)$$

то

$$F_1 = \frac{e^2 x}{4 \pi \epsilon_0 (r^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (9.15)$$

Внешние поля обычно значительно меньше внутреннего электрического поля в атоме. Поэтому смещение x невелико. При $x \ll r$ из (9.15) получим

$$F_1 = \frac{e^2 x}{4 \pi \epsilon_0 r^3}, \quad (9.16)$$

т. е. действительно возвращающая сила пропорциональна смещению. Из (9.16) следует, что коэффициент упругости

$$\kappa = \frac{F_1}{x} = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 r^3}. \quad (9.17)$$

Подставляя полученное выражение для κ в (9.11), найдем

$$\alpha_e = 4 \pi \epsilon_0 r^3. \quad (9.18)$$

Видим, что электронная поляризуемость атома определяется его радиусом.

Интересно сравнить экспериментальные значения α_e с вычисленными по формуле (9.18). Рассмотрим, например, поляризуемость атомов аргона. Экспериментальное значение α_e для этого газа равно $1,83 \cdot 10^{-40}$ Ф·м². Атомный радиус аргона $r = 1,91 \cdot 10^{-10}$ м. Подставляя это значение в (9.18), находим $\alpha_e = 7 \cdot 10^{-40}$ Ф·м². Вычисленное значение α_e , конечно, больше наблюдаемого на опыте. Тем не менее, одинаковый порядок этих двух величин дает основание считать рассматриваемую картину явления электронной поляризации в общих чертах правильной. Строгий квантово-механический расчет дает результат, по порядку величины, совпадающей с (9.18).

Формула (9.18) неприменима для сложных атомов. Однако ясно, что поляризуемость таких атомов также должна сильно

возрастать с увеличением радиуса электронных оболочек, поскольку связь между ядром и электроном при этом уменьшается. Наиболее слабо связаны с ядром валентные электроны, поэтому они испытывают под действием поля наибольшее смещение.

Для многих диэлектриков (ионные кристаллы, аморфные вещества) важно знать электронную поляризуемость ионов. Поляризация ионов имеет приблизительно тот же характер, что и поляризация атомов. Наименьшей поляризуемостью обладают такие ионы, у которых электронная оболочка соответствует электронной оболочке инертного газа. Имеется прямая связь между поляризуемостью иона и потенциалом ионизации. Значение потенциала ионизации зависит от энергии связи электрона с ядром. Чем выше эта энергия, тем устойчивее электронная оболочка, т. е. тем выше потенциал ионизации и меньше поляризуемость.

9.3. ИОННАЯ УПРУГАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

В диэлектриках с ионным типом химической связи под действием электрического поля происходит смещение положительных ионов относительно отрицательных. Возникающая таким образом поляризация получила название *ионной упругой поляризации*. Время установления ионной поляризации составляет обычно 10^{-14} — 10^{-15} с. Это означает, что данная поляризация полностью успевает устанавливаться в переменных полях, включая сверхвысокочастотные (10^{10} — 10^{11} Гц). В то же время в инфракрасной области спектра наблюдается запаздывание в установлении ионной поляризации. В качестве простейшего примера рассмотрим поляризацию одной молекулы, состоящей из двух разноименных ионов, например, Na^+ и Cl^- . Будем считать, что заряд сконцентрирован в центре иона (рис. 9.3).

В гл. 2 было показано, что зависимость энергии взаимодействия от расстояния для ионных молекул может быть выражена формулой

$$U(r) = -\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4 \pi \epsilon_0 r} + \frac{b}{r^n}. \quad (9.19)$$

Показатель степени в потенциале отталкивания Борна для различных веществ колеблется обычно от 7 до 11. Коэффициент b определим из условия минимума энергии

$$\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0. \quad (9.20)$$

Отсюда:

$$b = \frac{Z_1 Z_2 e^2 r_0^{n-1}}{4 \pi \epsilon_0 n} \quad (9.21)$$