

располагающимся параллельно любому приложенному полю, даже слабому. При абсолютном нуле наблюдалось бы то же самое, если допустить, что там еще возможно вращение. При любой температуре выше абсолютного нуля хаотичное тепловое движение, интенсивность которого пропорциональна температуре, препятствует установлению векторов дипольных моментов вдоль поля. Приложенное поле дает молекулярному диполю энергетическую возможность расположиться параллельно полю, но, непрерывно толкаемый своими соседями, диполь может принимать правильное направление не намного чаще, чем неправильное. В воде, например, поле в 1000 в/см обеспечивает поляризацию, эквивалентную правильному расположению только одной молекулы из трех тысяч. Но даже такая поляризация гораздо эффективней поляризации неполярного вещества в таком же поле, и это объясняет чрезвычайно большую диэлектрическую постоянную воды. Поляризация в полярном диэлектрике обычно пропорциональна приложенному электрическому полю и обратно пропорциональна абсолютной температуре.

9.16. Поляризация в переменных полях

До сего времени мы занимались только электростатическими полями в веществе. Необходимо рассмотреть действия электрических полей, меняющихся во времени, подобно полю конденсатора, помещенного в цепь переменного тока. Важно знать, последуют ли изменения поляризации за изменениями поля? Останется ли отношение \mathbf{P} к \mathbf{E} в любой момент времени таким же, как в статическом электрическом поле? При очень медленных изменениях мы не должны ожидать никакой разницы, но, как всегда, критерий медленности зависит от рассматриваемого физического процесса. Оказывается, что индуцированная поляризация и ориентация жестких диполей являются двумя процессами с совершенно различным временем релаксации.

Индуцированная поляризация атомов и молекул происходит за счет деформации электронных орбит. В процессе принимает участие маленькая масса, и структура является очень жесткой; свободные частоты ее колебаний чрезвычайно высоки. Иначе говоря, движение электронов в атомах и молекулах характеризуется периодами порядка 10^{-16} сек — это соответствует периоду волны видимого света. Для атома 10^{-14} сек является длительным промежуток времени. За такое время нетрудно изменить его электронную структуру. Поэтому строго неполярные вещества ведут себя практически одинаково, начиная от «постоянного тока» до частот видимого света. Поляризация следует за полем и восприимчивость $\chi_e = P/E$ не зависит от частоты. Что произойдет, когда частота изменения поля приблизится к некоторой свободной частоте электронной структуры? Решение этого интересного вопроса мы должны отложить до следующего тома. (Одним из результатов является радуга!)

Ориентация полярной молекулы представляет собой процесс, совершенно отличный от простой деформации электронного облака. При таком процессе молекула должна поворачиваться как целое. Это напоминает, в микроскопическом масштабе, поворачивание ореха с конца на конец в сумке с орехами. Вращение отстает от вращающего момента за счет сопротивления трения, уменьшающего также амплитуду результирующей поляризации. Масштаб времени, в котором проявляется этот эффект, далеко не одинаков для различных полярных веществ. В воде «время релаксации» для переориентации диполя составляет примерно 10^{-11} сек. Диэлектрическая постоянная остается близкой к 80 до частот порядка 10^{10} гц.

С увеличением частоты ϵ падает до небольшого значения, типичного для неполярной жидкости. Диполи просто не успевают следовать за изменением поля. В других веществах, особенно твердых, это характеристическое время может быть гораздо больше. Для льда, ниже точки замерзания, оно близко к 10^{-5} сек. На рис. 9.36 изображено несколько экспериментальных кривых, показывающих изменение диэлектрической постоянной в зависимости от частоты для воды и льда.

Вы можете спросить, действительно ли полярная молекула может перевернуться внутри такого плотного твердого вещества, как кристалл. Это в самом деле происходит в большом количестве кристаллов, где благодаря вибрации соседних молекул молекула внезапно получает достаточно «пустого пространства», чтобы свободно повернуться. Однако вопрос является законным, так как в некоторых твердых веществах происходят такие сдвиги электрических зарядов, которые нельзя назвать вращениями собственных молекулярных дипольных моментов. Мы вскоре вернемся к этому вопросу.

9.17. Ток связанных зарядов

Если поляризация вещества изменяется во времени, возникает электрический ток, связанный с движением зарядов. Предположим, что в 1 см^3 диэлектрика содержится N диполей и что в течение промежутка времени dt момент каждого диполя изменяется от \mathbf{p} до $\mathbf{p} + d\mathbf{p}$. Тогда макроскопическая плотность поляризации \mathbf{P} меняется от $\mathbf{P} = N\mathbf{p}$ до $\mathbf{P} + d\mathbf{P} = N(\mathbf{p} + d\mathbf{p})$.

Предположим, что изменение $d\mathbf{p}$ вызвано смещением заряда q на расстояние ds в каждом атоме: $qds = d\mathbf{p}$. Тогда в течение времени dt действительно существует облако зарядов с плотностью Nq ,

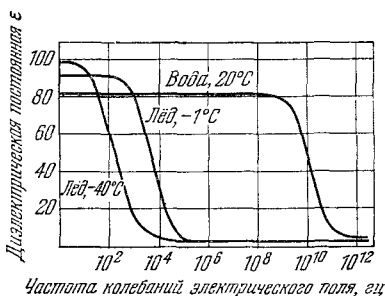


Рис. 9.36. Изменение диэлектрической постоянной воды и льда в зависимости от частоты. (Данные для воды взяты из книги С. Р. Smyth «Dielectric Behavior and Structure», McGraw-Hill, New York, 1955, а данные для льда из статьи R. P. Auty and R. H. Cole, J. Chem. Phys. 20, 1309 (1952).)