



Рис.3. Силы, действующие на молекулярные заряды в поляризованном диэлектрике (модель Антона)

удастся.

Антон. Нет-нет, смотрите. Возьмем простейшую модель молекулы нашего неполярного диэлектрика – два заряда q и $-q$, центры которых в нормальном состоянии совпадают. Если же их раздвинуть на расстояние x («растянуть» молекулу), то возникает внутримолекулярная сила $F_b(x)$, возвращающая заряды в исходное положение (рис.3). Растягивая молекулу, мы совершаем работу против этой силы. Работа эта идет на увеличение потенциальной энергии деформации молекулы.

Володя. Ну и как же мы найдем эту работу? Ведь для этого нужно знать $F_b(x)$.

Антон. Она нам не понадобится! Если мы начнем растягивать все молекулы диэлектрика в отсутствие внешнего электрического поля, нам придется преодолеть не только внутримолекулярные силы, но и поле E_s возникающих при этом связанных зарядов. Сила, которую нужно приложить к каждой молекуле, будет равна

$$F(x) = F_b + qE_s. \quad (7)$$

С другой стороны, если ту же самую

поляризацию диэлектрика создало внешнее поле E , то на каждый молекулярный заряд действует электростатическая сила $q(E - E_s)$. Она должна быть уравновешена внутримолекулярной силой, следовательно, $F_b = q(E - E_s)$. Таким образом,

$$F(x) = qE = \frac{q\epsilon}{\epsilon - 1} E_s$$

(здесь я воспользовался тем, что разность $E - E_s$ равна E/ϵ).

Заметим теперь, что при смещении молекулярных зарядов на x на поверхностях пластины возникают области нескомпенсированного заряда толщиной x . А значит, величину связанных зарядов Q_s мы найдем, если умножим молекулярный заряд q на число молекул в этой области: $Q_s = qnSx$, где n – концентрация молекул в диэлектрике. Электрическое поле, создаваемое этими связанными зарядами, равно

$$E_s = \frac{Q_s}{\epsilon_0 S} = \frac{qnSx}{\epsilon_0}$$

Подставив этот результат в формулу для $F(x)$, получаем

$$F(x) = \frac{\epsilon q^2 n}{(\epsilon - 1)\epsilon_0} x.$$

Как видим, в этих условиях каждая молекула ведет себя как пружинка жесткостью $k = \frac{\epsilon q^2 n}{(\epsilon - 1)\epsilon_0}$.

Володя. Здорово! И никакой квантовой механики. Теперь, зная зависимость $F(x)$, мы можем найти работу, затраченную на растяжение молекулы.

Антон. Конечно. Осталось только заметить, что для создания на поверхностях пластины связанных зарядов Q_s каждую молекулу нужно растянуть на

$$x = \frac{Q_s}{qnS}.$$

Работа, совершенная над одной молекулой, будет равна

$$A_0 = \frac{kx^2}{2} = \frac{\epsilon Q_s^2}{2(\epsilon - 1)\epsilon_0 nS^2}.$$

Чтобы найти полную работу, т.е. энергию поляризованного диэлектрика, нужно умножить A_0 на число молекул в пластине:

$$W_d = ndSA_0 = \frac{\epsilon Q_s^2 d}{2(\epsilon - 1)\epsilon_0 S}.$$

Володя. Но ведь это в точности результат (6)!

Антон. Конечно, ведь $\epsilon_0 S/d$ равно C_0 – емкости конденсатора, из которого мы выдергивали нашу пластину.

Учитель. И теперь понятно, почему именно этот ответ, а также ответ (1) для энергии конденсатора, являются верными, а Володины результаты (4) и (5) – нет. Из решения Антона видно, где у Володи возникает ошибка. Заменяя диэлектрик связанными зарядами, возникающими на его поверхностях, и вычисляя энергию так, как если бы эти заряды находились в вакууме, мы не учитываем работу против внутримолекулярных сил, затрачиваемую на увеличение потенциальной энергии деформации молекул. Учитывается только работа по преодолению сил электрического поля, в котором находятся молекулы. Или, другими словами, только второе слагаемое в формуле (7).

Володя. Но тогда, если мы оставим только это слагаемое, решение Антона должно дать ответ (5).

Учитель. Совершенно верно. Попробуйте сами в этом убедиться.

Физическая оптика и два верблюда

(Начало см. на с. 35)

сфере между двумя звездами ϕ , которые мы хотим разрешить, должно быть не меньше чем θ_1 . (Ясно также, почему у орла должен быть большой зрачок, если он хочет с высоты полета разглядеть мышшь на земле.)

А что если привинтить к телескопу микроскоп? Казалось бы, если каждый из этих приборов увеличивает в тысячу раз, то такое устройство могло бы увеличивать в миллион раз, так что можно

было бы рассматривать камешки на Марсе? Увы, дифракция света на объективе телескопа уже безнадежно испортит дело, так что информация об объектах более мелких, чем определяемые условием Рэлея (*), будет навсегда потеряна. А дифракция на объективе микроскопа? Она ведь тоже приводит к тому, что не удастся разрешить две точки, если расстояние между ними меньше длины волны излучения, освещающего наблюдаемый объект (например, микроб).

Что же получается? Выходит, эти замечательные приборы созданы для того, чтобы на их входных зрачках происходила дифракция света? Конечно, нет. Когда человечество изобретало

эти приборы, оно совсем не думало о волновой природе света. Казалось, картины хода лучей, нарисованные по законам геометрической оптики, открывают неограниченные возможности для увеличения микроскопов и телескопов – подберите лишь нужные отношения фокусов объектива и окуляра и расположите их должным образом. Но, как всегда случалось в истории физики, более развитая теория (физическая оптика) указала пределы возможностей, скрытые от более простой теории (геометрической оптики).

А верблюды – это просто для интереса.