

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В ВЕЩЕСТВЕ

9.1. Диэлектрики

Конденсатор, который мы изучали в гл. 3, состоял из двух изолированных друг от друга проводников, между которыми нет вещества. Система из двух проводников характеризовалась определенной емкостью C , связывающей величину заряда Q на конденсаторе (положительный заряд Q на одной пластине и равный ему отрицательный заряд на другой), с разностью электрических потенциалов обоих проводников V_{12} :

$$C = \frac{Q}{V_{12}}. \quad (1)$$

Емкость конденсатора, состоящего из двух плоских параллельных пластин, площадью A см² каждая, разделенных расстоянием t , равна

$$C = \frac{A}{4\pi t}. \quad (2)$$

Подобные конденсаторы встречаются в ряде электрических приборов. Они называются *вакуумными конденсаторами* и состоят из пластин, помещенных в сосуд с высоким вакуумом. Их применяют, главным образом, когда имеют дело с высоким напряжением большой частоты. Однако чаще встречаются конденсаторы, у которых пространство между пластинами заполнено некоторыми непроводящими твердыми или жидкими веществами. Большинство конденсаторов, с которыми вы работаете в лаборатории, именно таковы; их много в любом телевизионном приемнике. Для конденсаторов, помещенных в материальную среду, равенство (2) несправедливо — оно не согласуется с опытом.

Предположим, что пространство между двумя пластинами, изображенными на рис. 9.1, а, заполнено слоем из пластмассы (рис. 9.1, б). Экспериментируя с этим новым конденсатором, мы по-прежнему найдем простую пропорциональность между зарядом и разностью потенциалов и сможем определить емкость по уравне-

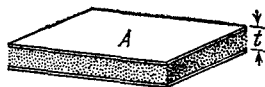
нию (1). Однако полученная таким образом емкость C оказывается гораздо больше емкости, получаемой из равенства (2).

Не только в специальных устройствах, называемых конденсаторами, но почти везде в окружающем нас мире электрическое и магнитное поля наблюдают чаще в веществе, чем в вакууме; если и не всегда в плотном веществе, то по крайней мере в газе, например в воздухе. Это замечание должно напомнить нам, что если не считать явлений электрической проводимости, рассмотренных в гл. 4, мы до сих пор изучали электромагнитное поле в пустом пространстве, заполненном только определенными точечными зарядами или непрерывным распределением зарядов. Теперь мы должны понять взаимодействие электрических и магнитных полей с веществом как таковым.

Здесь возможны два различных подхода. Проблему можно рассмотреть с макроскопической точки зрения, чтобы определить, как присутствие однородного вещества, например пластмассовой пластины на рис. 9.1, б, действует на электрическое поле между пластинами. Мы попытаемся узнать простые законы, описывающие такое действие в любой системе проводников и изоляторов.



$$C = \frac{A}{4\pi t} \quad a)$$



$$C > \frac{A}{4\pi t} \quad б)$$

Рис. 9.1. а) Конденсатор, состоящий из параллельных проводящих пластин. б) Тот же конденсатор с изолирующим слоем между пластинами.

Оказывается, что электрическое поведение однородных веществ в макроскопическом масштабе действительно характеризуется очень простыми законами. Например, для того чтобы правильно определить емкость любого конденсатора, заполненного некоторым веществом, нужно только подставить в правую часть равенства (2) коэффициент ϵ , характеризующий данное вещество. Коэффициент ϵ называется диэлектрической постоянной этого вещества, а сам материал называется диэлектриком, если иметь в виду его поведение в электрическом поле. Диэлектрические постоянные некоторых веществ приведены в табл. 9.1. Если диэлектрическая постоянная данного вещества определена (например, с помощью измерения емкости заполненного этим веществом конденсатора), можно предсказать поведение не только плоских конденсаторов, но любой электростатической системы, состоящей из проводников и кусков этого диэлектрика любой формы. Это значит, что мы можем найти все электрические поля в вакууме вне диэлектриков для заданных зарядов или потенциалов на проводниках системы.

Теория, позволяющая это сделать, была полностью разработана физиками девятнадцатого столетия, но поскольку в то время еще была неизвестна полная картина атомной структуры вещества, им поневоле пришлось ограничиться макроскопическим описанием. С этой точки зрения внутренность диэлектрика представляет собой нечто вроде совершенно однородного «математического желе»,

Диэлектрические постоянные различных веществ

Вещество	Условия	Диэлектрическая постоянная
Воздух	Газ, 0° С, 1 атм	1,00059
Соляная кислота, HCl	Газ, 0° С, 1 атм	1,0046
Вода, H ₂ O	Газ, 110° С, 1 атм	1,0126
	Жидкость, 20° С	80
Бензол, C ₆ H ₆	Жидкость, 20° С	2,28
Аммиак, NH ₃	Жидкость, -34° С	22
Трансформаторное масло	Жидкость, 20° С	2,24
Хлористый натрий, NaCl	Кристалл, 20° С	6,12
Сера, S	Твердое вещество, 20° С	4,0
Кварц, SiO ₂	Кристалл, 20° С (⊥ оптической оси)	4,34
	Кристалл, 20° С (∥ оптической оси)	4,27
Полиэтилен	Твердое вещество, 20° С	2,25—2,3
Неопрен	Твердое вещество, 20° С	4,1
Фарфор	Твердое вещество, 20° С	6,0—8,0
Парафиновый воск	Твердое вещество, 20° С	2,1—2,5
Стекло пирекс	Твердое вещество, 20° С	4,00

единственным электрическим свойством которого, отличающим его от вакуума, является диэлектрическая постоянная, не равная единице.

Если ограничиться только макроскопическим описанием вещества в электрическом поле, то нам будет трудно ответить на некоторые вполне очевидные вопросы или, скорее, трудно поставить вопросы таким образом, чтобы на них можно было осмысленно ответить. Например, какова величина электрического поля внутри пластмассовой пластины на рис. 9.1, б, когда на обкладках конденсатора имеются определенные заряды? Величина электрического поля определяется силой, действующей на пробный заряд. Каким образом можно поместить пробный заряд в плотное твердое вещество, не нарушая его цельности, и как измерить силу, действующую на этот заряд? Что будет означать такая сила, если мы измерим ее? Вы можете мысленно просверлить отверстие и поместить туда пробный заряд, причем отверстие должно иметь достаточно большие размеры, чтобы заряд мог в нем свободно перемещаться; тогда можно измерить силу, действующую на него как на свободную частицу. Но при этом вы будете измерять электрическое поле не в диэлектрике, а в полости внутри диэлектрика, а это совершенно разные вещи.

К счастью, мы располагаем другим подходом к проблеме, основанным на микроскопическом, или атомном, представлении о веществе. Мы знаем, что вещество состоит из атомов и молекул, которые в свою очередь состоят из элементарных частиц. Нам кое-что известно о размерах и структуре этих атомов и об их расположении в кристаллах, жидкостях и газах. Вместо того чтобы описывать нашу

диэлектрическую пластину как некий объем бесструктурного, сплошного желе, мы будем рассматривать ее как совокупность молекул в вакууме.

Если нам удастся понять, как ведут себя электрические заряды отдельной молекулы, находящейся в электрическом поле, то мы сможем понять и поведение двух таких молекул, расположенных на определенном расстоянии друг от друга в вакууме. Для этого необходимо только знать, как влияют на каждую молекулу электрические поля, создаваемые другими молекулами. Это — проблема вакуума. Распространив полученные результаты, скажем, на 10^{20} молекул, находящихся в 1 см^3 вакуума, мы получим реальный диэлектрик. Мы надеемся сделать это, не решая 10^{20} отдельных задач.

Осуществив такую программу, мы будем вознаграждены в двух отношениях. Прежде всего мы окажемся в состоянии сказать нечто осмысленное об электрических и магнитных полях внутри вещества, ответив на вопросы, подобные поставленным выше. Наконец, что еще более ценно, мы пойдем как возникают макроскопические электрические и магнитные явления в веществе, и, следовательно, приблизимся к пониманию атомной структуры вещества.

Мы будем изучать электрические и магнитные явления отдельно. Начнем с диэлектриков. Поскольку нашей первой целью является описание электрического поля, создаваемого атомом или молекулой, полезно начать с рассмотрения электростатического поля, создаваемого небольшой системой зарядов.

9.2. Моменты распределения зарядов

Атом (или молекула) состоит из электрических зарядов, занимающих небольшой объем пространства, близкий к нескольким кубическим ангстремам (10^{-24} см^3).

Нас интересует электрическое поле вне этого объема, возникающее благодаря довольно сложному распределению зарядов. Особенно важно для нас поле на таких расстояниях от источника, которые велики по сравнению с размерами самого источника.

Какие основные особенности структуры заряда определяют поле в удаленных точках? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим некоторое произвольное распределение зарядов и выясним, как можно вычислить поле в точке, внешней по отношению к этому распределению зарядов. На рис. 9.2 показано некоторое распределение зарядов, расположенных вблизи начала координат. Это может быть молекула, состоящая из нескольких положительных ядер и соответствующего числа электронов. Во всяком случае, мы предположим, что это распределение описывается заданной плотностью заряда $\rho(x, y, z)$. Величина ρ является отрицательной там, где находятся электроны, и положительной в ядрах. Для определения электрического поля в удаленных точках можно начать с вычисления потенциала от заданного распределения зарядов. Для примера возьмем некоторую точку A на оси z . (Так как мы не предполагали