

потоке электронов, движущихся только в направлении  $x$ , каждую промежуточную плоскость между катодом и анодом должно пересекать одно и то же число электронов в секунду. Мы приходим к выводу, что  $\rho v$  постоянно. Но заметьте, что  $v$  не постоянно, оно меняется с  $x$ , поскольку электроны ускоряются полем. Следовательно, и  $\rho$  не постоянно. Действительно, плотность отрицательных зарядов велика около катода и мала около анода, точно так же как плотность автомобилей на шоссе велика в местах с медленным движением и мала в местах с быстрым движением.

Ток в диоде может быть ограничен из-за того, что плотность отрицательных зарядов («пространственный заряд») оказывает влияние на электрическое поле, следовательно на ускорение и на скорость электронов, и, значит, — круг замыкается, и на саму плотность зарядов.

Ток в диоде может быть ограничен из-за того, что плотность отрицательных зарядов («пространственный заряд») оказывает влияние на электрическое поле, следовательно на ускорение и на скорость электронов, и, значит, — круг замыкается, и на саму плотность зарядов.

Ток в диоде может быть ограничен из-за того, что плотность отрицательных зарядов («пространственный заряд») оказывает влияние на электрическое поле, следовательно на ускорение и на скорость электронов, и, значит, — круг замыкается, и на саму плотность зарядов.

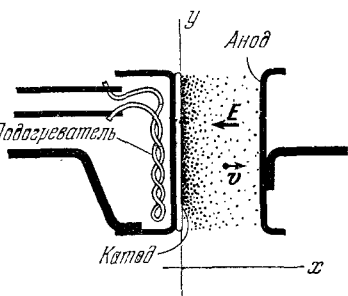


Рис. 4.2. Вакуумный диод с плоскопараллельными катодом и анодом.

В задаче 4.25 разобрано поведение диода «с ограничением по пространственному заряду» и показано, как вывести любопытное соотношение между напряжением и током, которое управляет этим поведением. Соотношение это важно в электронике не только при конструировании диодов и работе с ними, но также и при конструировании электронных пушек для катодно-лучевых трубок и других подобных устройств.

### 4.3. Проводимость и закон Ома

Существует много способов привести заряды в движение, в том числе такой, который можно назвать «механическим перемещением» носителей заряда. В электростатическом генераторе Ван-де-Граафа (см. задачу 4.3) изолирующей ленте сообщается поверхностный заряд, который она поднимает к удаленному электроду, наподобие того как эскалатор поднимает людей. Это создает вполне ощутимый ток. В атмосфере заряженные капельки воды при падении под действием силы тяжести образуют часть системы электрических токов Земли. В этом параграфе мы будем рассматривать более обычный способ переноса зарядов, когда на носитель заряда действует сила со стороны электрического поля. Электрическое поле вызывает движение носителей заряда, т. е. вызывает электрический ток. Успех этого действия зависит от физической природы системы, в которой действует поле, т. е. от среды.

Одно из самых ранних экспериментальных открытий в области электрического тока в веществе выражается законом Ома:

$$I = \frac{V}{R}. \quad (10)$$

Ток  $I$ , протекающий по проволоке, пропорционален разности потенциалов («напряжению»)  $V$  на ее концах. До сих пор мы обозначали электрический потенциал символом  $\varphi$ , а разность потенциалов ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) или  $\varphi_{12}$ . В этом параграфе мы будем использовать обозначение  $V$ , принятое в элементарной физике электрических цепей. Оно происходит от слова «вольт». (Мы избегали употреблять  $V$  просто потому, что оно обозначает множество разных вещей: объем, скорость, напряжение.)

Для данного куска проволоки, поддерживаемой при одной и той же температуре, сопротивление  $R$  (коэффициент пропорциональности в (10)) не зависит от величины протекающего тока. Сопротивление очевидным образом зависит от длины и поперечного сечения проволоки: оно пропорционально длине  $L$  и обратно пропорционально площади поперечного сечения  $A$ . Разумеется, оно также зависит от материала, из которого сделан проводник, и все это выражается простой формулой

$$R = \rho \frac{L}{A}. \quad (11)$$

Множитель  $\rho$  называется удельным (объемным) сопротивлением вещества. Сопротивление обычно измеряют в омах, что соответствует в законе Ома амперам для тока и вольтам для разности потенциалов. Соответствующая единица удельного сопротивления есть *ом·см*, если длины измеряются в сантиметрах; эта единица и фигурирует обычно в таблицах.

Инженер-электротехник использует уравнения (10) и (11) главным образом для вычисления сопротивления отдельных участков электрических цепей и соотношений между напряжением и током в этих цепях. Физик — за исключением случаев, когда он проектирует электроаппаратуру, — видит в этих уравнениях отражение замечательных общих свойств вещества, которые ему следует понять. Фундаментальный факт, отражаемый обоими этими уравнениями, заключается в следующем. В твердом однородном материале плотность тока в любой точке пропорциональна величине электрического поля, а константа пропорциональности зависит только от вещества, а не от формы проводника, именно,

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (12)$$

где  $\sigma$  — константа, характерная для данного вещества.

Внутри большинства проводников все три взаимно перпендикулярных направления физически эквивалентны. В меди, например, атомы образуют кубическую (точнее, кубическую гранецентрированную) решетку. Но кусок металла, даже если его кристаллическая структура не является кубической, состоит обычно из большого числа случайно ориентированных маленьких кристалликов, что приводит к эквивалентности всех направлений для любого среднего по большому объему. Во всех таких веществах, где нет выделенного направления,  $\mathbf{J}$  должно иметь то же направление, что и  $\mathbf{E}$ , а констан-

та  $\sigma$  есть попросту скаляр \*). Она называется *проводимостью* материала. Проводимость  $\sigma$  есть величина, обратная удельному сопротивлению  $\rho^{**}$ ). Рис. 4.3 представляет собой сводку этих простых соотношений; там же показано, как из (12) следуют (10) и (11).

Два слова о единицах и размерностях. Обычная единица проводимости выводится из практической единицы сопротивления, т. е. из ома. Как вы хорошо знаете, ом есть вольт, деленный на ампер. Проводимость — это отношение плотности тока к величине поля, что в практических единицах будет  $\frac{a/cm^2}{v/cm}$ , или

$(om \cdot cm)^{-1}$ ; часто это читают так: «обратный ом-сантиметр». Если чаще указывается величина, обратная проводимости — *удельное сопротивление*. Она обозначается буквой  $\rho$ , и ее практической единицей является ом-сантиметр. Удельное сопротивление хорошего проводника при комнатной температуре обычно порядка нескольких миллионных ом-сантиметра. Например, чистая медь имеет при комнатной температуре удельное сопротивление  $1,7 \cdot 10^{-6} om \cdot cm$ , или проводимость  $5,8 \cdot 10^5 (om \cdot cm)^{-1}$ .

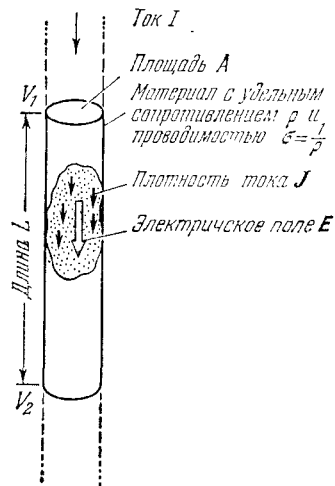


Рис. 4.3. Ток в проводнике. Соотношение  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$  между плотностью тока  $\mathbf{J}$  и электрическим полем  $\mathbf{E}$  включает в себе закон Ома:  $V = IR$ ,  $I = AJ = A\sigma E$ ,  $V = V_1 - V_2 = EL$ ,

$$\frac{V}{I} = \frac{EL}{A\sigma E} = \frac{L}{\sigma A} = \rho \frac{L}{A} = R.$$

В системе СГСЭ для проводимости или удельного сопротивления нет специальных единиц, но поскольку эта система построена на сантиметре, грамме и секунде и ни на чем больше, всякая единица должна быть комбинацией этих величин. Какова, например, размерность удельного сопротивления?

$$\begin{aligned} \text{Удельное сопротивление} &= \frac{\text{величина поля}}{\text{плотность тока}} = \\ &= \left( \frac{\text{заряд}}{cm^2} \right) / \left( \frac{\text{заряд}}{cm^2 \cdot \text{сек}} \right), \quad (13) \end{aligned}$$

что просто-напросто сводится к секундам. Удельное сопротивление имеет размерность времени, и подходящим названием единицы

\*) Вообще говоря, линейная связь между векторами осуществляется через *тензор*. В гл. 9 мы рассмотрим важный пример тензора. Существует ряд веществ, в которых проводимость по разным направлениям неодинакова, поэтому ее следует рассматривать как тензор, однако мы такими веществами заниматься не будем.

\*\*) Обычно принято обозначать удельное сопротивление и проводимость греческими буквами  $\rho$  и  $\sigma$ , хотя они так же часто используются для обозначения объемной и поверхностной плотности зарядов. Оказывается, в нашем распоряжении не так уж много букв!

должна быть секунда! В этих единицах удельное сопротивление меди равно  $10^{-17}$  сек, а стекла при комнатной температуре — порядка  $10^8$  сек. Позже мы увидим, что эта любопытная связь времени и вещества имеет разумное физическое истолкование.

#### 4.4. Механизм проводимости

Уравнение (12) описывает наблюдаемое поведение самых обычных веществ в определенном диапазоне условий. Вывести его из фундаментальных законов электрического поля мы не можем. Чтобы понять значение этого уравнения, нам следует разобраться в процессах, которые происходят в каком-нибудь веществе, находящемся в электрическом поле. Эти процессы в различных веществах могут быть самыми разными. Закон Ома замечателен именно тем, что он весьма точно выполняется во множестве веществ и в широком диапазоне значений поля. (В некоторых обстоятельствах он нарушается, даже должен нарушаться, и мы вскоре выясним, почему это бывает.) Начнем с детального описания механизма проводимости в некоторой упрощенной системе, довольно типичной для широкого класса проводников электричества (однако не для всех).

Нам нужны носители заряда, поэтому представим себе среду, которая состоит из равного числа носителей положительного и отрицательного зарядов, скажем, по  $N$  носителей в кубическом сантиметре. Пусть положительные носители — это ионы с массой  $M_+$  и зарядом  $e$ , а отрицательные — ионы с массой  $M_-$  и зарядом  $-e$ . Плотность тока  $J$  будет определяться средними скоростями этих ионов.

К системе приложено постоянное во времени однородное электрическое поле  $E$ , поэтому на каждый носитель заряда действует сила. Впервые в этом томе мы рассматриваем силу, действующую на движущийся в электрическом поле заряд. Этот вопрос мы тщательно разберем в гл. 6. Факт — уже использованный нами в т. I — заключается в следующем: сила такая же, как если бы заряд был неподвижен. Это значит, что каждый носитель заряда  $q$ , независимо от своего движения, испытывает действие постоянной силы  $qE$ .

Здесь мы остановимся, чтобы удивиться тому, что закон Ома все же выполняется! Ведь постоянная сила, действующая на свободный носитель заряда, должна вызывать постоянное ускорение. Но постоянная плотность тока означает отнюдь не постоянное ускорение, а постоянную скорость. Если наша система действительно подчиняется закону Ома, то это должно происходить из-за того, что для наших носителей скорость пропорциональна силе. Следовательно, носители заряда не могут двигаться свободно: что-то должно мешать движению, которое вызывается электрическим полем.

В поисках силы трения, мешающей движению, не надо далеко ходить. Эта сила вызывается столкновениями носителей заряда друг с другом и с любыми другими частицами среды. Как ввести эту силу трения — зависит от особенностей нашей модели. Для определенно-