

считать поперечные сечения проводника, для которых $dS_1 = dS$ и $j_n = j$, так что

$$I = \int_S j dS. \quad (8.4')$$

Опыты показали, что плотность постоянного тока одинакова по всему поперечному сечению S однородного проводника. Поэтому для постоянного тока формулу (8.4') можно записать в виде

$$I = jS. \quad (8.5)$$

В цепи постоянного тока, состоящей из проводников с переменной площадью поперечного сечения (рис. 8.1), плотности тока в различных сечениях S_1 и S_2 обратно пропорциональны площадям этих сечений:

$$j_1 : j_2 = S_2 : S_1.$$

§ 8.3. Опытные доказательства электронной проводимости металлов

1. Рассматривая металлические проводники, мы считали, что их электропроводность обусловлена наличием в металлах электронов проводимости. Это предположение было экспериментально подтверждено лишь в начале XX

столетия. Для опыта брали три металлических цилиндра (медный, алюминиевый и медный) одинакового радиуса, соединенных последовательно (рис. 8.2). Через эту цепь в течение очень долгого времени (более года) пропускали ток. В общей сложности

через цилиндры прошел заряд $3,5 \cdot 10^6$ Кл. Однако никаких следов переноса вещества (меди или алюминия) не было обнаружено. Следовательно, электропроводность металлов обусловлена перемещением таких заряженных частиц («носителей заряда»), которые являются общими для всех металлов и не связаны с различием их физических и химических свойств.

2. Для изучения природы носителей заряда в металле рассмотрим следующий опыт. Пусть металлический стержень C длиной l движется поступательно со скоростью v_0 (рис. 8.3, а). В результате взаимодействия с кристаллической решеткой носители заряда в проводнике будут также двигаться со скоростью v_0 . Предположим, что стержень резко тормозится и в момент торможения замыкается неподвижным металлическим проводником B , включенным в цепь гальванометра G (рис. 8.3, б). Очевидно, что носители заряда, не связанные жестко с кристаллической решеткой, будут продолжать двигаться по инерции до тех пор, пока взаимодействие с ионами решетки не остановит их. Поэтому в замкнутой цепи пойдет кратковременный ток, который мож-

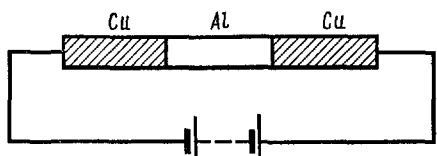


Рис. 8.2

но обнаружить с помощью гальванометра G . По направлению этого тока определяют знак движущихся зарядов. Этот опыт позволяет также найти отношение заряда q к массе m носителя заряда. В самом деле, при торможении проводника кинетическая энергия носителей заряда расходуется на работу тока в замкнутой цепи. По закону Джоуля—

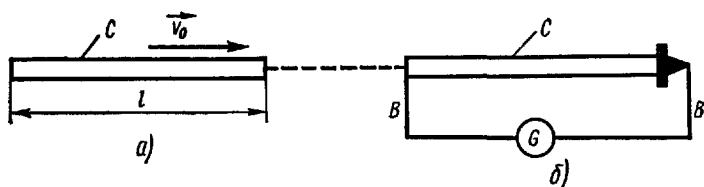


Рис. 8.3

Ленца (см. § 9.3), работа, совершаемая током I за время dt в цепи с сопротивлением R ,

$$dA = I^2 R dt. \quad (8.6)$$

Пусть v — скорость носителей заряда в произвольный момент времени t , а N — общее число этих частиц в стержне. Тогда работа

$$dA = -Nd \left(\frac{mv^2}{2} \right) = -Nmv dv = -n_0 S l m v dv. \quad (8.6')$$

где l и S — соответственно длина и площадь поперечного сечения стержня, n_0 — концентрация частиц-носителей заряда в стержне, а знак минус показывает, что работа совершается вследствие уменьшения кинетической энергии этих частиц. Сила тока, по формуле (8.5), $I = jS$. Плотность тока j равна произведению абсолютной величины заряда q одного носителя на число этих частиц $n_0 v$, проходящих через единицу площади поперечного сечения проводника за единицу времени: $j = qn_0 v$ и $I = qn_0 v S$.

Подставив это выражение в уравнение (8.6), получим

$$dA = qn_0 v S R I dt = qn_0 v S R dQ. \quad (8.6'')$$

где $dQ = I dt$ — заряд, переносимый током за время dt .

Приравнявая правые части уравнений (8.6'') и (8.6') и сокращая общие множители, находим

$$qR dQ = -m l dv$$

Интегрируя это равенство по v от v_0 до 0, получим полный заряд Q , проходящий через гальванометр при торможении стержня:

$$Q = \frac{m}{q} \frac{l}{R} v_0. \quad (8.7)$$

откуда отношение заряда к массе (удельный заряд) носителей заряда в металлическом стержне равно

$$\frac{q}{m} = \frac{Iv_0}{QR} \quad (87')$$

3. В 1913 г. Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси провели следующий опыт: взяли катушку L (рис. 8.4) с намотанным на нее проводом, концы которого были соединены с неподвижной телефонной трубкой T . При быстрых крутильных колебаниях катушки вокруг ее оси OO' в цепи появлялся переменный ток, вызывавший треск в телефонной трубке. Этот опыт подтвердил существование инерционного движения носителей заряда в проводнике. Однако он не позволил определить направление тока, а значит, и знак заряда частиц, перемещавшихся в проводе.

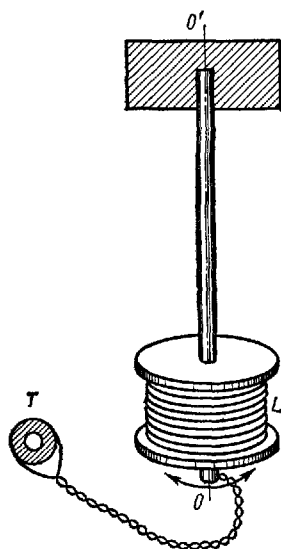


Рис. 8.4

В 1917 г. Т. Стюарт и Р. Толмен усовершенствовали этот опыт, заменив телефон чувствительным гальванометром. Этот опыт показал, что носители заряда в металлах заряжены отрицательно. Удельный заряд этих частиц оказался приблизительно одинаковым для всех исследованных металлов и близким к удельному заряду электрона. Таким образом, было доказано, что носителями заряда в металлах действительно являются электроны.

4. Для объяснения электронного характера проводимости металлов нужно предположить, что часть атомов в металле диссоциирована на электроны и положительные ионы, в результате чего в металле имеется большое число так называемых «свободных» электронов. По современным воззрениям, такого рода электронами являются валентные электроны атомов металла, наиболее слабо связанные с ядрами атомов. В металлах валентные электроны легко переходят от одного атома к другому — они являются как бы «обобществленными» электронами атомов. Оказалось, что у одновалентных металлов на один атом приходится один свободный электрон. Поэтому число электронов проводимости в единице объема одновалентного металла можно определить из следующего соотношения:

$$N_A : n_0 = A : \rho,$$

где N_A — число (постоянная) Авогадро; A — молярная масса металла, ρ — его плотность. Для меди $A = 0,0636$ кг/моль, $\rho = 8,93 \cdot 10^3$ кг/м³ и $n_0 \approx 8,5 \cdot 10^{28}$ м⁻³.

5. Электроны проводимости распределены по всей кристаллической решетке металла, в узлах которой расположены положительные ионы. Ионы совершают тепловые колебания около положений равновесия (см. т. I, гл. XV), а все электроны проводимости участвуют в хаотическом поступательном тепловом движении, аналогичном тепловому движению молекул газа.