

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В МЕТАЛЛАХ, ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ВАКУУМЕ

\* \* \*

### § 97. Инерция электронов в металлах

1. Как уже неоднократно говорилось, в металлах носителями тока являются *свободные электроны*, т. е. электроны, сравнительно слабо связанные с ионами кристаллической решетки металла. Ионы в металлах не участвуют в переносе электричества. Если бы это было не так, то прохождение электрического тока через металл сопровождалось бы электролизом и связанным с ним переносом вещества. На самом деле этого не наблюдается. Рике в течение года пропускал электрический ток через три поставленные друг на друга цилиндра — медный, алюминиевый и снова медный. Несмотря на то, что общий заряд, прошедший через эти цилиндры в течение указанного времени, достигал примерно 3,5 миллиона кулонов, никакого проникновения металлов друг в друга обнаружено не было и вес цилиндров сохранялся с точностью до  $\pm 0,03$  мг.

2. Еще более определенные заключения о природе носителей тока в металлах позволяют сделать опыты с возбуждением электрического тока *силами инерции*. Для уяснения идеи таких опытов рассмотрим тонкое проволочное кольцо, неравномерно вращающееся вокруг своей геометрической оси. При всяком ускорении вращения свободные электроны будут отставать, а при замедлении — опережать ионы кристаллической решетки кольца. Возникнет движение электронов относительно кристаллической решетки, т. е. *электрический ток*. Для количественного описания явления перейдем к системе отсчета, вращающейся вместе с кольцом. В этой системе отсчета появится сила инерции  $F_{ин}$ , действующая на каждый свободный электрон. Разделив ее на заряд электрона  $e$ , получим стороннее поле  $E^{стор} = F_{ин}/e$ , которое и возбуждает электрический ток. Поскольку возбуждаемый ток — переменный, закон Ома надо писать в форме (42.6) или

$$\mathbf{j} + \tau_{ин} \frac{d\mathbf{j}}{dt} = \lambda (\mathbf{E}^{стор} + \mathbf{E}), \quad (97.1)$$

где  $\mathbf{E}$  — электрическое поле, которое может появиться из-за смещения электронов относительно ионов. Приведем это уравнение обычным

способом (см. § 44) к интегральной форме, получим

$$R \left( \mathcal{I} + \tau_{\text{ин}} \frac{d\mathcal{I}}{dt} \right) = \oint (\mathcal{E}_{\text{стор}} + E) dl,$$

где  $R$  — сопротивление кольца, а интегрирование ведется по контуру кольца. Первый интеграл  $\oint \mathcal{E}_{\text{стор}} dl$  есть электродвижущая сила  $\mathcal{E}$  сторонних сил, действующих в контуре. Вторым интеграл  $\oint E dl$  равен  $-L d\mathcal{I}/dt$ . Таким образом,

$$(L + R\tau_{\text{ин}}) \frac{d\mathcal{I}}{dt} + R\mathcal{I} = \mathcal{E}. \quad (97.2)$$

В рассматриваемом нами случае электродвижущая сила  $\mathcal{E}$  создается силами инерции. Силы инерции, перпендикулярные к оси провода, на величину тока  $\mathcal{I}$  не влияют. Имеет значение только сила инерции, направленная вдоль оси провода. Она возникает из-за неравномерности вращения и равна  $F_{\text{ин}} = -m\dot{v}$ , где  $m$  — масса электрона, а  $v$  — линейная скорость вращения кольца. С учетом всего этого предыдущее уравнение принимает вид

$$(L + R\tau_{\text{ин}}) \frac{d\mathcal{I}}{dt} + R\mathcal{I} = -\frac{m}{e} l \dot{v},$$

где  $l$  — длина кольца. Интегрируя полученное уравнение по времени от  $t = t_1$  до  $t = t_2$ , найдем

$$(L + R\tau_{\text{ин}}) (\mathcal{I}_2 - \mathcal{I}_1) + Rq = \frac{m}{e} l (v_1 - v_2),$$

где  $q = \int \mathcal{I} dt$  — количество протекшего электричества, а  $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2, v_1, v_2$  — значения силы тока  $\mathcal{I}$  и скорости  $v$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно. Пусть до момента  $t_1$  кольцо вращалось равномерно со скоростью  $v_1 = v$ , а в момент  $t_2$  скорость  $v$  равна нулю и процесс установления тока в кольце к этому моменту закончился. Тогда  $\mathcal{I}_1 = \mathcal{I}_2 = 0$  и, следовательно,

$$q = \frac{mlv}{eR}. \quad (97.3)$$

Измерив с помощью баллистического гальванометра количество протекшего электричества  $q$ , можно из этого уравнения определить удельный заряд  $e/m$ , а по направлению отклонения гальванометра судить о знаке заряда  $e$ .

Идея подобных опытов была высказана в 1913 г. русскими физиками Л. И. Мандельштамом (1879—1944) и Н. Д. Папалекси (1880—1947). Они же поставили качественные опыты и показали, что при крутильных колебаниях проволочной катушки вокруг ее геометрической оси действительно возникает переменный ток (см. задачу 3 к § 132). Приближавшаяся первая мировая война (опыты производились в Страсбурге) помешала Мандельштаму и Папалекси

закончить начатое исследование. Опыт был предложен вновь Г. А. Лорентцем и осуществлен Толменом (1881—1948) и Стюартом в 1916 г.

В опытах Толмена и Стюарта катушка из металлической проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей геометрической оси (линейная скорость вращения достигала 300 м/с). Концы проволочной обмотки были соединены с очень чувствительным баллистическим гальванометром длинными гибкими проводами, скручивающимися во время вращения катушки. При помощи специальных неподвижных катушек с электрическим током магнитное поле Земли в пределах катушки было настолько тщательно скомпенсировано, что при равномерном вращении последней гальванометр не обнаруживал никаких индукционных токов. Убедившись в этом, экспериментаторы быстро затормаживали вращение катушки, и тогда тотчас же гальванометр отклонялся. К этому опыту применимо уравнение (97.3), если в нем под  $l$  понимать длину проволоки в катушке (в опытах Толмена и Стюарта она достигала 500 м), а под  $R$  — общее сопротивление цепи, включая сопротивление гальванометра и соединительных проводов. Катушки изготовлялись из медной, алюминиевой и серебряной проволоки. Направление отклонения гальванометра показало, что носителями тока в металлах являются отрицательные заряды. Удельный заряд  $e/m$  в пределах ошибок измерений оказался таким же, как и у электронов в опытах с катодными лучами.

3. Кеттеринг и Скотт в 1944 г. произвели другой опыт, являющийся как бы обращением опыта Толмена и Стюарта. Они наблюдали изменение момента количества движения проволочной катушки при изменении силы тока в ней. Подвешенная катушка, по которой протекал постоянный электрический ток, совершала крутильные колебания относительно своей геометрической оси  $\varphi = a \sin \omega t$ . Если ток обусловлен движением электронов, то сила тока представляется выражением  $\mathcal{I} = Sneu$ , где  $S$  — площадь поперечного сечения провода,  $n$  — число свободных электронов в единице объема, а  $u$  — средняя упорядоченная скорость электронов относительно провода. С этим током связан момент количества движения относительно оси катушки  $L_s = lSnmur$ , где  $l$  — длина проволоки, а  $r$  — радиус витка. Таким образом,  $L_s = \frac{m}{e} lr\mathcal{I}$ . Если сила тока изменится на  $\Delta\mathcal{I}$ , то изменится и момент количества движения, связанный с движением электронов, а именно:  $\Delta L_s = \frac{m}{e} lr\Delta\mathcal{I}$ . Однако момент количества движения всей системы — кристаллической решетки и электронов — измениться не может. Действительно, ток меняется под действием электрического поля. Последнее действует не только на электроны, но и на ионы. Поскольку система электрически нейтральна, момент количества движения, приобретенный

электронами, будет равен по величине и противоположен по знаку моменту количества движения, приобретенному ионами кристаллической решетки. Отсюда следует, что при изменении тока  $\mathcal{I}$  решетка приобретает момент количества движения  $\Delta L_p = -\Delta L_s = -\frac{m}{e} lr \Delta \mathcal{I}$ .

Пусть изменение тока производится настолько быстро, что за время одного колебания катушка не успевает повернуться на заметный угол. Тогда можно считать, что угловая скорость решетки  $\dot{\phi}$  при крутильных колебаниях изменяется в соответствии с уравнением  $\Theta \Delta \dot{\phi} = \Delta L_p$ , где  $\Theta$  — момент инерции катушки относительно ее геометрической оси. Пусть изменение тока произошло в момент, когда катушка проходила через положение равновесия. В этот момент  $\dot{\phi} \equiv \omega a \cos \omega t = \omega a$ . Поэтому амплитуда колебаний  $a$  получит приращение, определяемое уравнением  $\Theta \omega \Delta a = \Delta L_p$ . Фактически в опыте производилось изменение на противоположное направления тока, так что  $\Delta \mathcal{I} = -2\mathcal{I}$ , и, следовательно,

$$\Delta a = \frac{\Delta L_p}{\Theta \omega} = \frac{2mlr}{e\Theta \omega} \mathcal{I} = \frac{mlrT}{\pi e\Theta} \mathcal{I}, \quad (97.4)$$

где  $T = 2\pi/\omega$  — период крутильных колебаний катушки. На опыте измерялась величина  $\Delta a$  с помощью специального очень чувствительного устройства, которое мы не описываем.

Ввиду малости эффекта и необходимости защитить прибор от возмущений, значительно превосходящих самый эффект, опыт очень труден. Однако он был поставлен с использованием современной аппаратуры и притом настолько тщательно и в таких хороших условиях, что результаты получились весьма устойчивые. Опыт производился на специальной станции, расположенной вдали от дорог. Чувствительная часть прибора располагалась в идеально темном подвале, в котором поддерживалась постоянная температура и не было никаких потоков воздуха. В подвале были расположены три взаимно перпендикулярные системы катушек с общим центром. Они использовались для компенсации и контролирования различных составляющих земного магнитного поля. Наблюдатель делал отсчеты, находясь в верхнем помещении, при помощи особой системы телеуправления. Опыт производился с катушками из медной и алюминиевой проволок. Измеренное среднее значение удельного заряда  $e/m$  отличалось от общепринятого всего на 0,2%.

## § 98. Явление Холла

1. Если исходить из модели «свободных» электронов (см. § 42), то плотность электрического тока в металле может быть выражена через их концентрацию  $n$  и подвижность по формуле

$$\mathbf{j} = enb\mathbf{E}. \quad (98.1)$$

Формула была бы справедлива и в том случае, если бы носителями