

# Электропроводимость металлов.

# Классическое представление об электропроводимости металлов.

Кристаллическая решетка металлов состоит из остовов положительно заряженных ионов, расположенных в узлах решетки, и «свободных» электронов, беспорядочно движущихся в промежутках между ионами, образуя особого рода электронный газ.

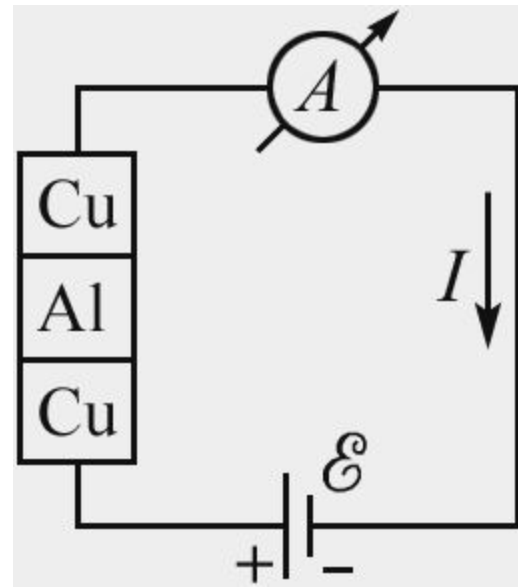
В отсутствие внешнего электрического поля электроны движутся хаотически.

Появление поля вызывает направленное движение электронов вдоль силовых линий поля. Появляется электрический ток.

Сталкиваясь при своем движении с дефектами решетки или рассеиваясь на ионах электроны передают избыток энергии, приобретенный под действием поля.

Рассеяние электронов на примесях, дефектах, ионах является причиной возникновения сопротивления и теплового действия электрического тока.

Ионы в металлах не участвуют в переносе электричества. Рикке (1845–1915) в течение года пропускал ток через три поставленных друг на друга цилиндра: медный, алюминиевый и снова медный. За год через цилиндры прошло  $3,5 \cdot 10^6$  Кл электричества, но проникновения металлов друг в друга и изменения их массы с точностью до  $\pm 0,03$  мг не было обнаружено.



Прямое указание на природу «свободных» носителей заряда в металлах дали опыты Мандельштама и Папалекси в 1913 г. катушка, содержащая большое число витков проволоки, раскручивалась и быстро тормозилась, а электроны после торможения продолжали двигаться, что приводило к появлению тока в замкнутой цепи.

По отклонению баллистического гальванометра измерялся полный заряд, прошедший через гальванометр.

Количественный результат был получен Толменом и Стюартом в 1916 г.

Величина силы инерции при торможении равна  $ma$ , она уравновешивается полем кулоновских сил  $eE$  при инерционном смещении электронов.

Здесь  $m$ ,  $e$  – масса и заряд частиц, ответственных за прохождение тока в проводнике;  $l$  – длина проводника;  $v_n$ ,  $v_k$  – начальная и конечная линейная скорости обода вращающейся катушки ( $v_k = 0$ );  $\Delta t$  – время торможения

Согласно закону Ома, имеем

$$\phi_1 - \phi_2 = IR = \quad ,$$

где  $\Delta q$  – заряд, прошедший по цепи и измеренный баллистическим гальванометром.

В результате из равенства

$$m \frac{v_H}{\Delta t} = e \frac{\Delta q R}{l \Delta t}$$

была определена величина удельного заряда частицы, ответственной за прохождение тока в металлах, выраженная через экспериментально определяемые параметры:

$$\frac{e}{m} = \frac{v l}{\Delta q R}$$

Удельный заряд ( $e/m$ ) в пределах ошибок измерений оказался равным удельному заряду электрона  $1,76 \cdot 10^{-11}$  Кл/кг.

Таким образом, свободными носителями заряда, ответственными за появление тока в металлах, являются электроны.

С точки зрения классического подхода считается, что электроны представляют в металлах идеальный газ.

В газе «свободных» электронов силы отталкивания между электронами компенсируются силами притяжения электронов к регулярно расположенным остовам кристаллической решетки



# Вывод законов Ома и Джоуля-Ленца в классической теории электронной проводимости металлов

Исходя из того, что электроны представляют в металлах идеальный газ, попытаемся получить закон Ома и выражение для электропроводности металла. Воспользуемся определением величины плотности тока

$$\mathbf{j} = en\mathbf{u}.$$

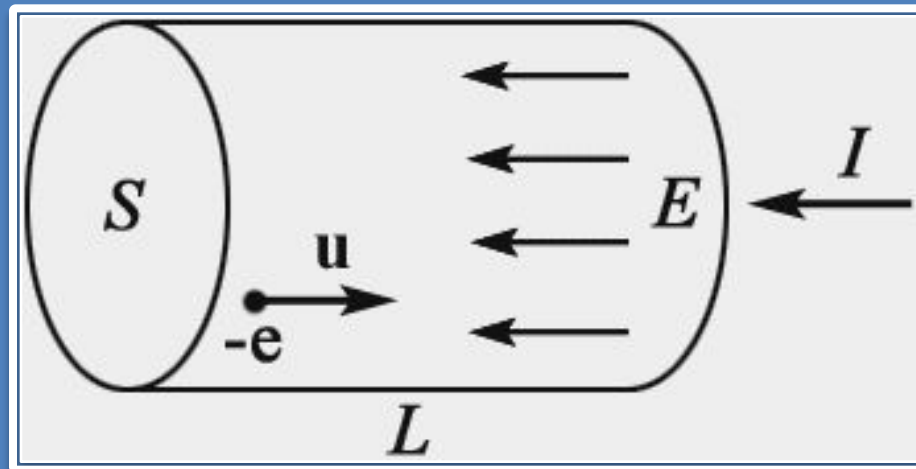
Согласно классической теории проводимости электроны представляют точки, движущиеся под действием внешнего поля  $\mathbf{E}$ .

- В отсутствие поля средняя скорость направленного движения электронов  $u$  равна нулю, а средняя скорость хаотического движения  $v$  определяется согласно молекулярно-кинетической теории следующим выражением:

$$v = \sqrt{\frac{2kT}{\pi m_e}} \approx 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

- Под действием поля  $E$  электроны приобретают добавочную скорость  $u$  (рис. 13.2). Величина этой скорости много меньше средней скорости хаотического движения практически для всех реально достижимых токов

$$u = \frac{j}{en} = \frac{(I/S)}{en} = \frac{10^7 \text{ (А/м)}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}} \approx 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}}$$



- Здесь концентрация электронов подсчитана для меди,  $n = NA \cdot \rho / A \approx 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Поэтому столкновения электронов с дефектами, примесями и ионами решетки связаны главным образом с тепловым движением электронов и происходят в среднем через промежуток времени

$$\tau = \frac{l}{v}$$

где  $l$  — длина свободного пробега электрона

За время  $\tau$  электрон может приобрести среднюю скорость направленного движения:

$$\mathbf{u} = \mathbf{a}\tau = \frac{\mathbf{F}}{m}\tau = \frac{e\mathbf{E}}{m}\tau,$$

где  $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m = e\mathbf{E}/m$  – ускорение, сообщаемое электрону силой  $\mathbf{F} = e\mathbf{E}$ .

Среднее значение скорости  $\mathbf{u}$

$$\mathbf{u}_{\text{ср}} = \frac{0 + \mathbf{u}}{2} = \frac{1}{2} \frac{e\mathbf{E}}{m} \tau$$

Подставив величину  $u_{\text{ср}}$  в выражение для плотности тока получим

$$j = \frac{e^2 n l}{2m\nu} E$$

Плотность тока пропорциональна напряженности поля, что соответствует закону Ома

$$j = \sigma E,$$

$\sigma$ -величина электропроводности, равная

$$\sigma = \frac{e^2 n l}{2m\nu}$$

Из всех металлов наибольшую удельную электропроводность имеет серебро.

Электропроводность меди только на 10% меньше электропроводности серебра, притом медь во много раз дешевле, поэтому применяемые в электротехнике высококачественные проводники чаще всего изготавливаются из меди, очищенной от всех примесей.

Для изготовления проводов применяют также алюминий, удельное сопротивление которого в 1,5 раза превышает сопротивление меди

Сопротивление химически чистых металлов с повышением температуры возрастает, увеличиваясь с каждым градусом примерно на 0,4% от сопротивления при 0 °С.

Для многих химически чистых металлов даже при значительном нагревании сохраняется пропорциональность между увеличением сопротивления и приростом температуры. Это позволяет вычислить сопротивление при температуре  $t$  °С по формуле

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где  $R_0$  – сопротивление при 0 °С и  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.



Зависимостью электропроводности от температуры пользуются для измерения температуры приборами, называемыми термометрами сопротивления.

Разновидность термометров сопротивления – **боллометры** используются для измерения теплового излучения. Чувствительность боллометров чрезвычайно велика: они реагируют на поток энергии  $10^{-8} \div 10^{-9}$  Вт.

Удельное сопротивление металлов зависит не только от температуры, но и от механических воздействий. При растяжении удельное сопротивление большинства металлов возрастает.

Зависимостью сопротивления проволоки от степени ее растяжения пользуются для измерения деформаций и механических напряжений в приборах, называемых тензometрами сопротивления.

# Вывод.

Удельное сопротивление металлов зависит не только от температуры, но и от механических воздействий. При растяжении удельное сопротивление большинства металлов возрастает.

Зависимостью сопротивления проволоки от степени ее растяжения пользуются для измерения деформаций и механических напряжений в приборах, называемых тензометрами сопротивления.