

§ 8.4. Основы классической электронной теории электропроводности металлов

1. Электронная теория проводимости металлов была впервые создана П. Друде в 1900 г. и получила дальнейшее развитие в работах Г. Лоренца. С точки зрения классической электронной теории высокая электропроводность металлов объясняется наличием огромного числа носителей заряда — электронов проводимости, перемещающихся по всему объему проводника. Друде предположил, что электроны проводимости в металле можно рассматривать как электронный газ, обладающий свойствами одноатомного идеального газа. При своем движении электроны проводимости сталкиваются с ионами кристаллической решетки металла. Поэтому можно говорить о средней длине свободного пробега электронов $\langle \lambda \rangle$, которая по порядку величины должна быть равной периоду кристаллической решетки металла, т.е. 10^{-8} см.

2. Пользуясь закономерностями кинетической теории газов (см. т. I, § 11.1), определим среднюю кинетическую энергию теплового движения электронов:

$$\frac{mv_{\text{кв}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

где m — масса, а $v_{\text{кв}}$ — их средняя квадратичная скорость. При температуре 0°C $v_{\text{кв}} \approx 110$ км/с. Таков же порядок средней арифметической скорости $\langle u \rangle$ теплового движения электронов.

Тепловое движение электронов вследствие своей хаотичности не может привести к возникновению электрического тока.

3. Под действием внешнего электрического поля в металлическом проводнике возникает упорядоченное движение электронов, т.е. электрический ток. Плотность тока j равна общему заряду всех электронов, проходящих за одну секунду через единицу площади поперечного сечения проводника. Эти электроны заключены в объеме цилиндра, площадь основания которого равна единице, а высота — средней скорости $\langle v \rangle$ упорядоченного движения электронов под действием внешнего электрического поля. Если в единице объема находится n_0 электронов, то числовое значение плотности тока выразится формулой

$$j = n_0 e \langle v \rangle. \quad (8.8)$$

4. Оценим порядок величины средней скорости $\langle v \rangle$ упорядоченного движения электронов. Для провода из определенного материала и заданного сечения существует максимальная технически допустимая нагрузка, превышение которой приводит к опасному перегреву провода. Например, для изолированного медного провода сечением в 1 мм^2 наибольшая допустимая плотность тока равна $11 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. Так как для меди объемная плотность электронов проводимости $n_0 \approx 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, а абсолютная величина заряда электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, то по формуле (8.8) средняя скорость $\langle v \rangle$ движения электронов при этих условиях оказывается равной:

$$\langle v \rangle \approx \frac{11 \cdot 10^6}{8,5 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Таким образом, средняя скорость упорядоченного движения электронов, соответствующая электрическому току в проводнике, чрезвычайно мала по сравнению со средней скоростью их теплового движения при обычных температурах. Незначительная средняя скорость $\langle v \rangle$ объясняется весьма частыми столкновениями электронов с ионами кристаллической решетки.

5 Как согласовать очень малую скорость $\langle v \rangle$ электронов с практически мгновенной передачей электрических, например телеграфных, сигналов на очень большие расстояния?

Замыкание электрической цепи на станции отправления влечет за собой распространение электрического поля в проводах и вокруг них. Всякое изменение электрического поля передается вдоль проводов с огромной скоростью c , равной $3 \cdot 10^8$ м/с (скорость света). Таким образом, спустя время $t = L/c$, где L — длина провода, вдоль цепи установится стационарное поле и в ней начнется упорядоченное движение электронов проводимости. Если $L = 1000$ м, то $t = 0,3 \times 10^{-6}$ с. Поэтому движение электронов под действием внешнего электрического поля возникает на всем протяжении провода практически одновременно с подачей сигнала.

§ 8.5. Вывод законов Ома и Джоуля—Ленца в классической электронной теории

1. Важнейшей задачей классической электронной теории проводимости металлов является теоретический вывод основных законов электрического тока — законов Ома и Джоуля—Ленца, установленных опытным путем. Приведем вывод этих законов.

Предположим, что при соударениях с узлами кристаллической решетки электроны полностью теряют скорость упорядоченного движения, которую они приобретают под действием внешнего электрического поля за время τ свободного пробега. В процессе свободного пробега электроны движутся равноускоренно. Поэтому средняя скорость $\langle v \rangle$ их упорядоченного движения

$$\langle v \rangle = \langle v_{\text{макс}} \rangle / 2,$$

где $\langle v_{\text{макс}} \rangle$ — среднее значение скорости, приобретаемой электроном под действием поля за время свободного пробега.

Пусть m — масса электрона, e — абсолютное значение его заряда и E — напряженность стационарного электрического поля в проводнике. Тогда уравнение движения электрона имеет следующий вид:

$$m (dv/dt) = eE$$

Интегрируя это уравнение по v от 0 до $\langle v_{\text{макс}} \rangle$ и по t от 0 до $\langle \tau \rangle$ ($\langle \tau \rangle$ — средняя продолжительность свободного пробега электрона), получаем