

Министерство образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ»

Факультет электроники  
Кафедра микроэлектроники

# Материалы и элементы электронной техники Ч.І

доц. Лазарева Н.П.

тема: **5**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ  
В ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ**

# Физическая природа электропроводности металлов

## Общие сведения о проводниках



**Проводники электрического тока:** твердые тела, жидкости, газы в ионизованном состоянии.

**Твердые проводники** - металлы, металлические сплавы и некоторые модификации углерода.

**Жидкие проводники** - электролиты и расплавленные металлы (при нормальной температуре ртуть ( $T_{пл} = -39\text{ °C}$ ), галлий ( $T_{пл} = 29,8\text{ °C}$ )).

**В металлах** в твердом и жидком состояниях механизм прохождения электрического тока обусловлен **движением свободных электронов**, их называют **проводниками с электронной электропроводностью** или **проводниками первого рода**.

# Физическая природа электропроводности металлов

## Общие сведения о проводниках



**Электролиты**, или **проводники второго рода** – растворы (в основном водные) кислот, щелочей и солей, а также расплавы ионных соединений. Прохождение тока через такие проводники связано с **переносом вместе с электрическими зарядами** частей молекул (**ионов**), состав электролита постепенно изменяется, на электродах выделяются продукты электролиза.

Газ может быть проводником, обладающим **электронной и ионной электропроводностями**, если напряженность электрического поля выше некоторого критического значения, обеспечивающего начало **ударной и фотоионизации**

Ионизированный газ при равенстве числа электронов и положительных ионов в единице объема представляет собой особую равновесную проводящую среду, называемую **плазмой**

# Физическая природа электропроводности металлов



Классическая электронная теория металлов (П. Друде и Х. А. Лоренцом) – представление об *электронном газе*, состоящем из свободных (коллективизированных) электронов.

Электронному газу приписываются свойства идеального газа, т. е. движение электронов подчиняется законам классической статистики.

Если считать, что атомы в металле ионизированы однократно, то концентрация свободных электронов будет равна концентрации атомов:

$$n = \frac{d}{A} N_0$$

где  $d$  — плотность материала;  $A$  — атомная масса;  
 $N_0$  — число Авогадро ( $6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>)

# Физическая природа электропроводности металлов



Средняя кинетическая энергия электронов, в состоянии непрерывного хаотического движения, линейно возрастает с температурой:

$$\frac{m_0 \bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

где  $\bar{u}$  — средняя скорость теплового движения;  $k$  — постоянная Больцмана.

Температуре 300 К соответствует средняя скорость порядка  $10^5$  м/с.

Внешнее напряжение приводит к тому, что электроны получают добавочную скорость направленного движения – возникает электрический ток. Плотность тока в проводнике определяется выражением

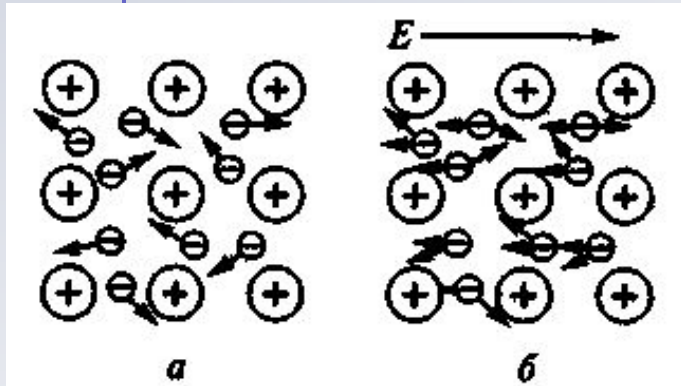
$$J = en\bar{v}$$

где  $\bar{v}$  — средняя скорость направленного движения носителей заряда (скорость дрейфа).

В медном проводнике плотности тока  $10^6$  А/м<sup>2</sup> соответствует скорость дрейфа электронов порядка  $10^{-4}$  м/с, т. е. можно считать, что в реальных условиях выполняется неравенство

$$\bar{v} \ll \bar{u}$$

# Физическая природа электропроводности металлов



Схематическое изображение векторов движения электронов проводимости в металлах:

*а* — электрическое поле отсутствует;  
*б* — в электрическом поле

При направленном движении электронов в пространстве кристаллической решетки, узлы которой совершают тепловые колебания, электроны сталкиваются с ними, отдают узлам свою энергию (рассеивают энергию) .

В промежутках между столкновениями с узлами решетки электроны при воздействии электрического поля движутся с ускорением

$$a = eE / m_0$$



## Физическая природа электропроводности металлов

Максимальная скорость дрейфа, приобретаемая электроном к концу свободного пробега,

$$v_{\max} = a\tau_0$$

где  $\tau_0$  – время свободного пробега.

Среднее значение скорости дрейфа за время свободного пробега равно половине максимального:

$$\bar{v} = \frac{eE}{2m_0} \tau_0$$

Исходя из сказанного выше, плотность тока определяется как

$$J = \frac{e^2 n \cdot \bar{l}}{2m_0 \bar{u}} E = \gamma E$$

т. е. плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля, а это есть **аналитическое выражение закона Ома**.



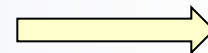
## Физическая природа электропроводности металлов

При рассмотрении действия электрического поля на всю совокупность свободных электронов, у которых суммарный импульс изменяется как под действием поля, так и под действием соударений с узлами кристаллической решетки оказывается, что средняя дрейфовая скорость электронов оказывается вдвое больше, чем определено выше.

С учетом этой поправки выражение для удельной проводимости принимает следующий вид:

$$\gamma = \frac{e^2 n \bar{l}}{m_0 \bar{u}}$$

Представления о свободных электронах позволяют легко прийти к экспериментальному закону Видемана–Франца, устанавливающему связь между проводимостью и теплопроводностью металла.







## Физическая природа электропроводности металлов

Электронны в металле переносят не только электрический заряд, но и выравнивают в нем температуру, обеспечивая высокую теплопроводность.

Хорошие проводники электрического тока –  
хорошие проводники теплоты.

Благодаря высокой концентрации свободных электронов, электронная теплопроводность преобладает над другими механизмами переноса теплоты. В соответствии с атомно-кинетической теорией идеального газа электронная удельная теплопроводность может быть записана в виде

$$\lambda_{\text{T}} = \frac{1}{2} kn\bar{u}\bar{l}$$



## Физическая природа электропроводности металлов

Отношение удельной теплопроводности к удельной проводимости металла

$$\frac{\lambda_{\dot{o}}}{\gamma} = \frac{\frac{1}{2} kn\bar{u}l}{\frac{e^2 n l}{m_0 \bar{u}}} = \frac{1}{2} \frac{kn\bar{u}l m_0 \bar{u}}{e^2 n l};$$

$$\frac{m_0 \bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad \text{- средняя кинетическая энергия электронов}$$

$$\frac{\lambda_{\dot{o}}}{\gamma} = 3k^2 e^{-2} T = L_0 T$$



## Физическая природа электропроводности металлов

Отношение удельной теплопроводности к удельной проводимости металла при данной температуре есть величина постоянная, независящая от природы проводника

$$\frac{\lambda_0}{\gamma T} = L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2\text{К}^{-2}$$

Константа  $L_0 = 3k^2/e^2$  получила название числа Лоренца.

Таким образом, определив удельную проводимость металла при данной температуре, можно вычислить его удельную теплопроводность