Сегодня воскресенье,
26 ноября 2017 г.

Раздел 7
Зонная теория твердых тел

Лекция 7/3
Электропроводность металлов

Лекция 7/3
Электропроводность металлов

1. Классическая теория электропроводности металлов
2. Квантовая теория электропроводности металлов
3. Сверхпроводимость

1. Классическая теория электропроводности металлов

Металлы – хорошие проводники электрического тока. Носителями электрического тока в металлах являются свободные электроны.

Друде и Лоренцом была создана классическая электронная теория электропроводности металлов.

В ней металлы представляли собой твердые вещества, в узлах которых находятся положительные ионы, совершающие непрерывные колебания у положения равновесия.

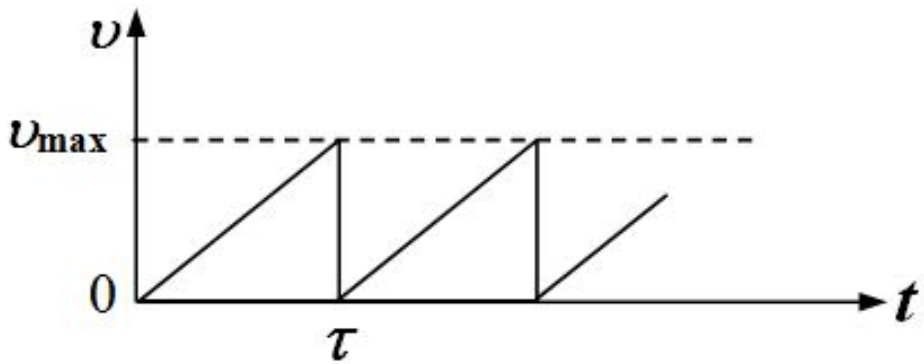
Отрицательные электроны представляют собой практически свободные частицы – отрицательно заряженный электронный газ (в качестве модели использовалась модель идеального газа).

В отсутствие электрического поля электроны участвуют лишь в хаотическом движении с $\langle W_k \rangle = \frac{3}{2}kT$, сталкиваясь только с узлами кристаллической решетки.

В электрическом поле электроны приобретают направленное движение против поля и двигаются с ускорением:

$$m_0 a = qE \qquad \upsilon = \upsilon_0 + at = \frac{qE}{m_0} t$$

t меняется от 0 до τ (τ – время между двумя последовательными столкновениями электронов с узлами кристаллической решетки).
Тогда зависимость скорости электронов от времени имеет вид:



$\tau = \dfrac{<\ell>}{<\upsilon>}$, где $<\ell>$ – средняя длина свободного пробега электронов ≡ межузельное расстояние кристаллической решетки;

$<\upsilon>$ – средняя скорость теплового (хаотического) движения электронов.

Средняя скорость дрейфа электронов по полю (средняя скорость направленного движения) $<\upsilon_д>$

$$<\upsilon_д> = \frac{1}{2}\upsilon_{max} = \frac{qE}{2m_0}\tau .$$

Плотность электрического тока в проводнике:

$$j = qn_e <\upsilon_д> = \frac{q^2 n_e E}{2m_0}\tau = \frac{q^2 n_e}{2m_0}\cdot\frac{<\ell>}{<\upsilon>}E .$$

где n_e – концентрация электронов в проводнике;

q – заряд электрона.

Учитывая $j = \sigma E = \frac{1}{p_e} E$, получим выражения для удельной проводимости металлического проводника

$$\sigma = \frac{q^2 n_e}{2m_0} \cdot \frac{<\ell>}{<\upsilon>},$$

и его сопротивления

$$R \sim \frac{1}{\sigma} = \frac{2m_0 <\upsilon>}{q^2 n_e <\ell>}$$

Разные металлы имеют:

1) различные концентрации носителей заряда n_e.
2) разное строение кристаллической решетки и $<l>$.
3) разную скорость теплового движения электронов $<\upsilon>$.

Следовательно классическая теория электропроводности металлов объясняет:

1) разное сопротивление различных металлов.

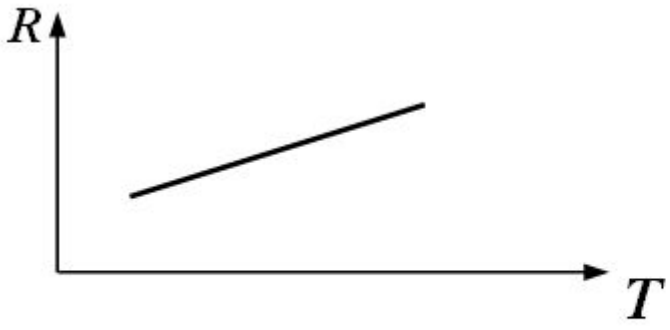
2) зависимость сопротивления от температуры

$$R \sim <\upsilon> \sim \sqrt{T}.$$

Проблемы классической теории:

1) Использование модели идеального электронного газа приводит к результату, что молярная теплоемкость металлов должна была быть равна $4{,}5R_{газ}$ ($R_{газ}$=8,31), что противоречило эксперименту.

2) Опыт показывает, что сопротивление R~T, а не $\sqrt{T}$.



$$R = R_0\left(1 + \alpha T\right),$$

где $\alpha = \dfrac{1}{273} K^{-1}$ – температурный коэффициент сопротивления металла.

2. Квантовая теория электропроводности металлов

На электроны проводимости в металле действуют сложные, неподдающиеся точному описанию силы:

- силы притяжения к атомам металла;
- силы взаимодействия электронов между собой;
- силы, связанные с дефектами кристаллического строения металлов.

2. Квантовая теория электропроводности металлов

Для описания движения электрона во внешнем электрическом поле *E* вводят понятие эффективной массы электрона m^* ($m^* \neq m_e$), тогда:

$$F = m^* a \Rightarrow -eE = m^* a.$$

Эффективная масса не определяет ни инертные, ни гравитационные свойства электрона. Она лишь характеризует его взаимодействие с электрическим полем кристалла.

Закон Ома $j=\sigma E$.

Проводимость металла: $$\sigma = \frac{e^2 \varepsilon}{m^* \pi k T \upsilon},$$

где

ε – модуль упругости кристаллической решетки;

$k=1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

υ – скорость поступательного движения электронов.

Под действием внешнего электрического поля электроны проводимости металла переходят с одного энергетического уровня на другой (от одного атома, к другому), эти переходы создают электрический ток.

Металл

Квантовая физика считает, что электроны при своем движении рассеиваются не на узлах кристаллической решетки, а на фононах, концентрация которых сильно зависит от температуры.

В области высоких температур $T >> T_D$ все осцилляторы возбуждены вплоть до $\omega_{\max}$, тогда с ростом температуры $n_f \sim T$ и

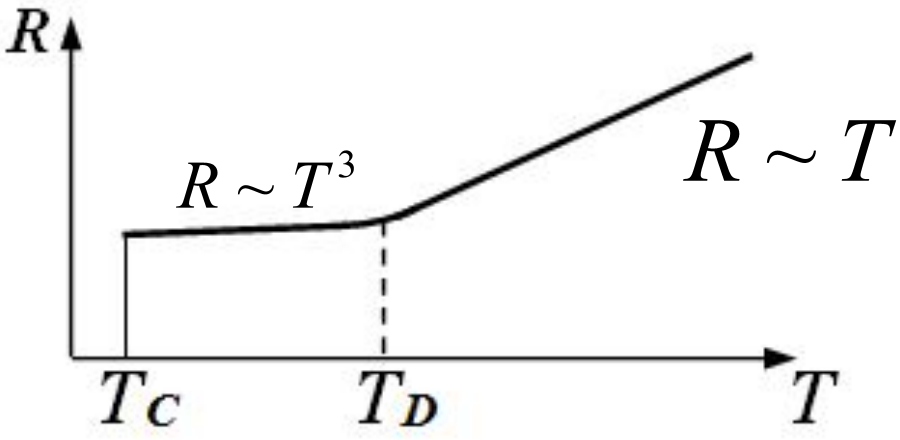
$$R \sim T,$$

что очень хорошо согласуется с экспериментом.

В области низких температур $T << T_D$ с ростом температуры происходит не только увеличение фононов с данной частотой, но и быстрый рост новых фононов.

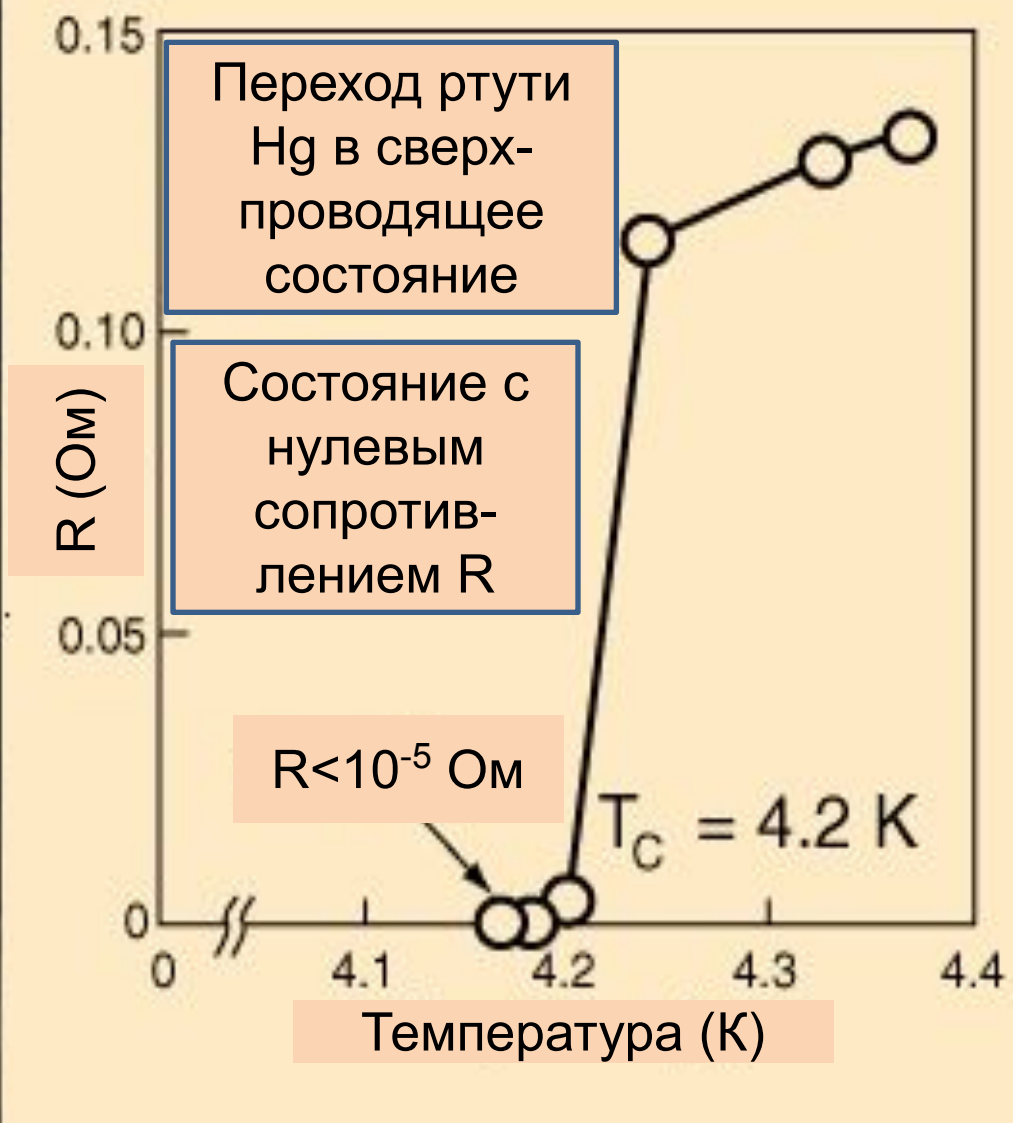
$$R \sim n_f \sim T^3 \qquad (W \sim T^4,\ c_M \sim T^3),$$

что также хорошо согласуется с экспериментом.


R
R ~ T^3
R ~ T
T_C
T_D
T

3. Сверхпроводимость

Камерлинг Оннес 1911 год.



Есть два рода частиц: фермионы и бозоны.

Фермионы – частицы с полуцелым значением спина (s=1/2, 3/2…). Они подчиняются принципу запрета Паули.

Подчиняются статистике Ферми-Дирака.

Пример: электрон, протон, нейтрон и частицы, составленные из нечетного числа фермионов и др.

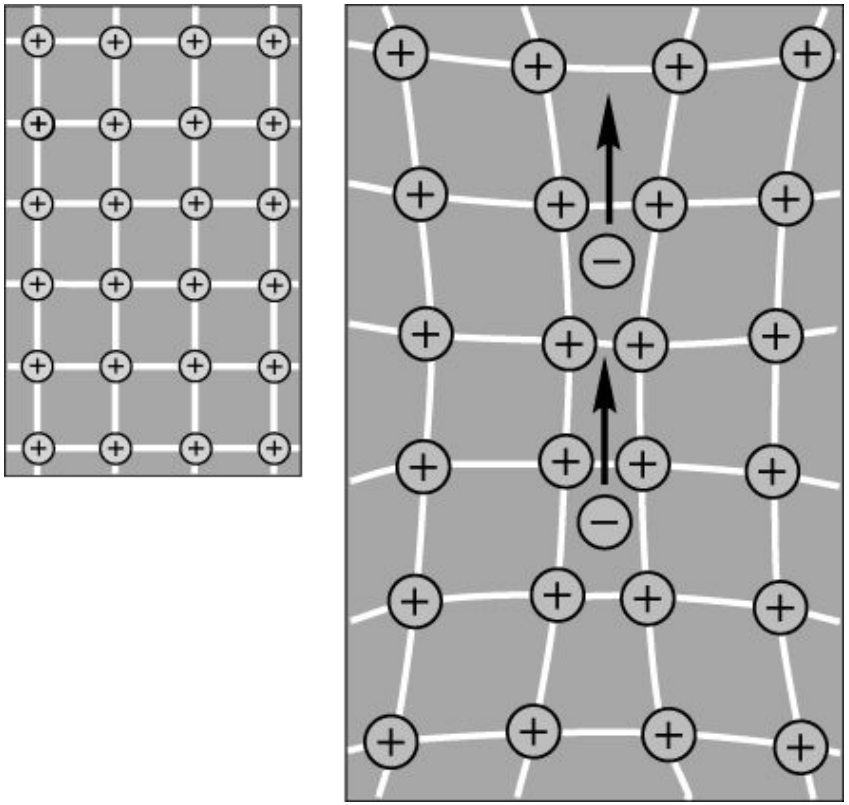
Бозоны – частицы с целым значением спина (s=1, 2…). Они **НЕ** подчиняются принципу запрета Паули.

Подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна.

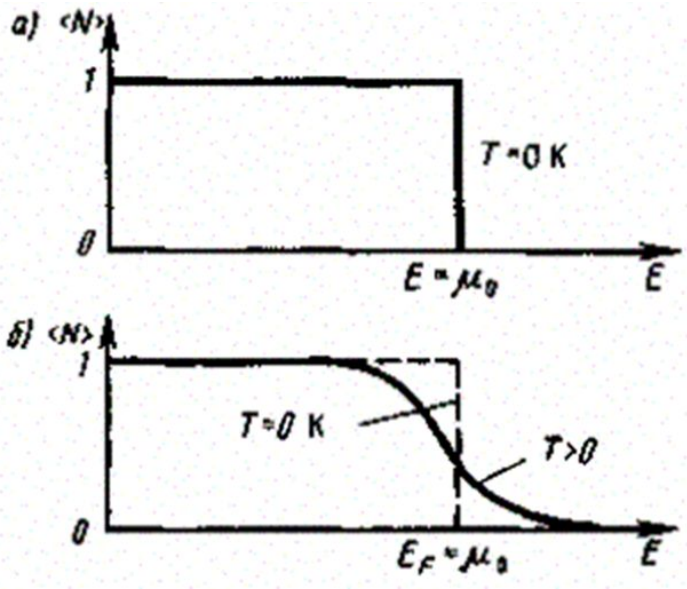
Пример: фотон, частицы, составленные из четного числа фермионов и др.

В металле при очень низких температурах между двумя электронами кроме кулоновского отталкивания может появиться слабое взаимное притяжение.

При этом они образуют **куперовскую пару.** Размеры пары на **4 порядка** больше среднего межатомного расстояния.



Куперовская пара – бозон (спин s=1/2-1/2=0). Она занимает самое нижнее из возможных энергетических состояний.

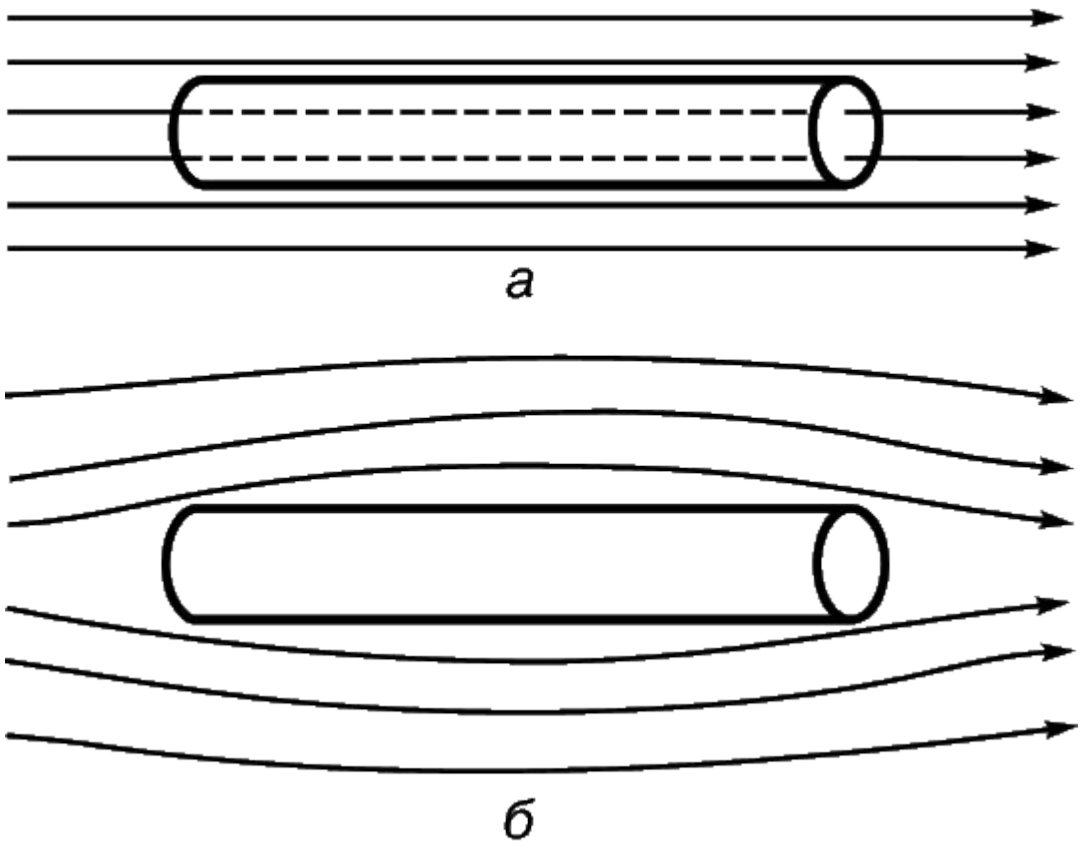


Для того, чтобы разорвать куперовскую пару нужна энергия ~$2E_F$.

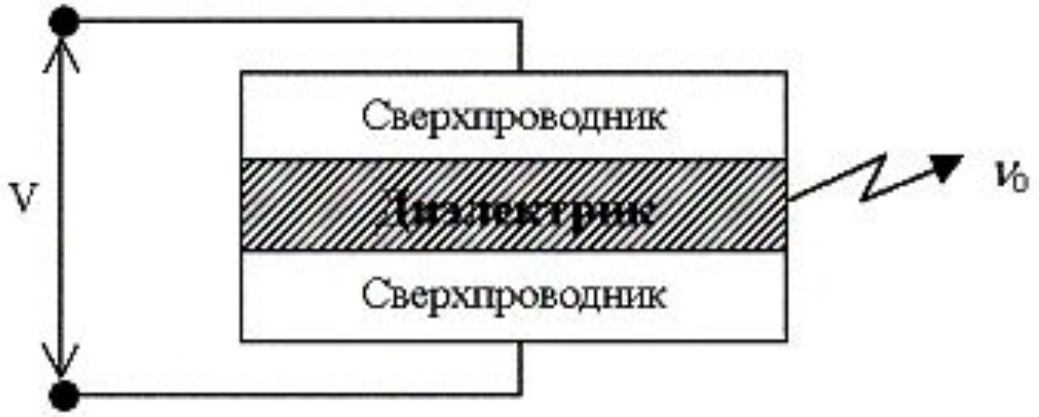
СП разрушается если:

- через СП течет большой ток;
- СП помещен в сильное магнитное поле.

Эффект Мейснера: магнитное поле выталкивается из сверхпроводника (стрелки – линии магнитной индукции).



Эффект Джозефсона: туннелирование куперовских пар через тонкий диэлектрик.



Стационарный эффект Джозефсона: при пропускании через контакт СП-диэлектрик-СП тока, величина которого не превышает критическую, падение напряжения на контакте отсутствует.

Существует семейство материалов (сверхпроводящих керамик), которые проявляют сверхпроводящие свойства при температурах кипения жидкого азота (77,4 К) и выше (70 К – 153 К).

Сверхпроводник	T_c, К
$La_{2-x}M_5CuO_4^*$	38
$M'Ba_2Cu_3O_{7-\delta}^{**}$	93
$Bi_2Sr_2CuO_6$	70
$Bi_2Sr_2Cu_2O_8$	90
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110
$TlBa_2CaCu_2O_7$	91
$TlBa_2Ca_2Cu_3O_2$	116
$TlBa_2Ca_3Cu_4O_{11}$	122
$TlBa_2Ca_4Cu_5O_{13}$	120
$Tl_2Ba_2CuO_6$	80
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$	110
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	128
$Tl_2Ba_2Ca_3Cu_4O_{12}$	102
$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	90
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$	153

* M = Ca, Sr, Ba; $x = 0{,}15$. ** M′ = K, РЗЭ.