

Тема 2.1 «Физические процессы в проводниках»

Зонная теория твёрдого тела

Проводимость твёрдых тел в первую очередь определяется электронным строением атомов. При этом энергетические уровни отдельных атомов образуют энергетические зоны: самая верхняя из заполненных зон называется *валентной*, ближайшая к ней незаполненная электронами – зона *проводимости*. Плотность заполнения электронами зон и их перекрытие определяют электропроводность твёрдых тел.

Энергетические диаграммы

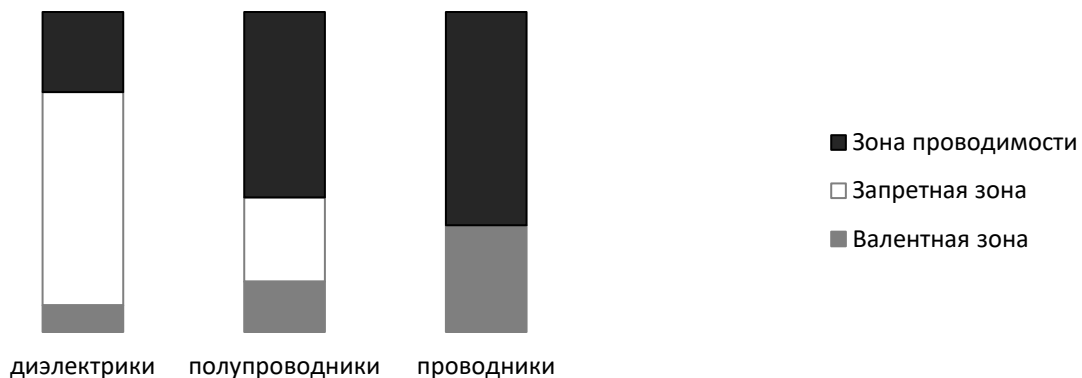


Рисунок 1 – Энергетические диаграммы

Согласно зонной теории твёрдого тела следует:

1) **проводниками** являются материалы, у которых валентная и зона проводимости перекрываются, что обеспечивает высокую электропроводность.

2) **полупроводники** – это материалы с узкой запрещенной зоной, которая может быть преодолена электронами за счёт внешних энергетических воздействий (температура, электрического поля, электромагнитного излучения).

3) **диэлектрики** – материалы с широкой запрещенной зоной, не позволяющая покидать валентную зону, что и определяется наличием примесей с энергетическими уровнями внутри запрещенной зоны.

Среди твердых проводниковых материалов наиболее часто применяются металлы. Концентрации свободных электронов в чистых металлах различаются незначительно. Поэтому их проводимость в основном определяется средней длиной свободного пробега электронов, которая, в свою очередь, зависит от строения проводника, т.е. химической природы атомов и типа кристаллической решетки. Основным параметром проводниковых материалов является удельное сопротивление.

Удельное сопротивление проводника ρ , Ом·м, определяется по формуле

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l}, \quad (1)$$

где R – электрическое сопротивление;
 S – площадь сечения проводника;
 l – длина проводника.

Таблица 1 – Удельное сопротивление металлов, применяемых в электротехнике (при $t=20^\circ\text{C}$)

Металл	ρ , мкОм·м	Металл	ρ , мкОм·м
Алюминий	0,028	Олово	0,12
Висмут (при $t=0^\circ\text{C}$)	1,065	Платина	0,105
Вольфрам	0,055	Рений	0,21
Железо	0,098	Ртуть	0,958
Золото	0,024	Свинец	0,205
Индий	0,09	Серебро	0,016
Кадмий	0,076	Тантал	0,135
Кобальт	0,062	Титан	0,42
Медь	0,0172	Хром	0,14
Молибден	0,057	Цинк	0,059
Никель	0,973	Цирконий	0,41
Ниобий	0,18		

Классификация проводниковых материалов

1) По агрегатному состоянию

Твердые проводники – в основном металлы и металлические сплавы.

Жидкие проводники – электролиты и расплавленные металлы. При нормальной температуре в качестве жидкого проводника может быть применена ртуть (-39°C) и галлий ($29,8^\circ\text{C}$).

Газы и пары при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками, однако если напряженность поля выше некоторой критической, газ становится проводниковым, обладающим электронной и ионной электропроводностью. Сильно ионизированный газ представляет собой особую проводящую среду, называемую плазмой.

2) По величине проводимости

- материалы высокой проводимости;
- материалы высокого электрического сопротивления;
- сверхпроводящие материалы.

3) По химическому составу

- чистые металлы;
- сплавы (высокого сопротивления, для термопар, припой);
- неметаллические материалы;
- контактные материалы.

Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников

В чистых металлах правильной структуры причиной, ограничивающей длину свободного пробега электронов, является тепловое колебание атомов кристаллической решетки. С ростом температуры увеличивается амплитуда тепловых колебаний атомов, что усиливает рассеяние электронов и вызывает возрастание удельного сопротивления. У чистых металлов при нагревании на 100° электросопротивление увеличивается на 45-50%. У сплавов оно увеличивается меньше.

У ряда металлов при очень низкой температуре $T_{св}$ наступает состояние сверхпроводимости. При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается увеличение удельного сопротивления в 1,5-2 раза.

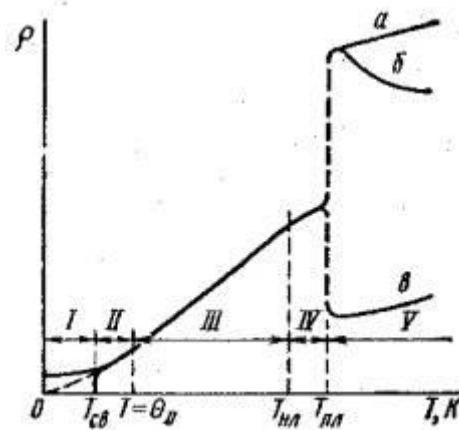


Рисунок 2 – График зависимости удельного сопротивления металлических проводников от температуры

В области линейной зависимости удельного сопротивления от температуры справедливо выражение:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_\rho \cdot (T - T_0)), \quad (2)$$

где ρ и α_ρ – удельное сопротивление и температурный коэффициент удельного сопротивления при нормальной температуре ($t=20^\circ\text{C}$);

ρ – удельное сопротивление при температуре T .

Задача

Проволока диаметром 4 мм и длиной 1000 м имеет при нормальной температуре сопротивление 2,25 Ом. Определите, из какого материала она изготовлена, и какое сопротивление она будет иметь при 150°C .

Дано: d=4 мм l=1000 м R=2,25 Ом T ₀ =20°C T=150°C	Решение: Определяем удельное сопротивление металлической проволоки $\rho = \frac{R \cdot S}{l} = \frac{R \cdot \pi r^2}{l} = \frac{2.25 \cdot 3.14 \cdot 0.002^2}{1000} = 28 \cdot 10^{-9} = 0.028 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ Рассчитанное сопротивление имеет алюминий. Температурный коэффициент алюминия $\alpha_\rho = 4,1 \cdot 10^{-3}$
ρ -? R-?	Находим удельное сопротивление для заданной температуры $R = R_0[1 + \alpha_\rho(T - T_0)] = 2.25[1 + 4.1 \cdot 10^{-3}(150 - 20)] = 3.45 \text{ Ом}$

Влияние примесей и дефектов на удельное сопротивление

Причинами уменьшения проводимости металлов являются не только тепловые колебания, но и дефекты структуры кристаллов. Наибольшее рассеяние электронов происходит на примесях, которые всегда присутствуют в проводнике в виде загрязнения или легирующих элементов.

Кроме того, удельное сопротивление повышают собственные дефекты структуры – вакансии, атомы внедрения, дислокации. При деформации металл происходит искажение кристаллической решетки, что также приводит к увеличению сопротивления.

В качестве термостабильных проводниковых материалов используются сплавы, в которых удельное сопротивление определяется в основном неоднородностью структуры и в меньшей – тепловыми колебаниями.

Увеличение сопротивления также проявляется при получении металлических пленок, используемых в микроэлектронике в качестве межэлементных соединений, контактных площадок, обкладок конденсаторов и д.р. Причинами этого являются изменение структуры при осаждении пленок и размерный эффект (возрастание роли поверхностных процессов над объемными).

Контактные явления

При соприкосновении двух разных разнородных металлов между ними возникает разность потенциалов. Это объясняется разными уровнями энергии электронов, т.е. различной работой выхода. Поэтому при контактировании металлов происходит переход электронов из области с большим значением энергии в область, где эта энергия меньше. В результате металл А заряжается положительно, а металл Б – отрицательно. Возникающая контактная разность потенциалов составляет от десятых долей до нескольких вольт.

Обычно электрический потенциал контакта не влияет на прохождение электрического тока.

Контактные явления используются для создания термопар.