

## Лабораторная работа №2.

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

**Цель работы:** исследование зависимости сопротивления различных проводников от температуры.

**Материалы и приборы:** измеритель сопротивления, источник напряжения, исследуемое сопротивление, блок нагревания, регистратор температуры.

#### Краткие сведения из теории.

**Электрические свойства материалов.** Классификация материалов по электрическим свойствам основана на представлениях зонной теории электропроводности твердых тел. Как установлено многочисленными экспериментами, электроны в изолированном атоме могут находиться лишь на отдельных орбитах, которым соответствуют строго определенные значения энергии - *энергетические уровни*. Согласно *принципу Паули* на одном энергетическом уровне может находиться не более двух электронов. Под воздействием притяжения положительно заряженного атомного ядра электроны стремятся занять ближайšie к ядру уровни с минимальным значением энергии. В результате нижние энергетические уровни оказываются заполненными электронами, а верхние уровни свободными. Схематическое изображение энергетической диаграммы изолированного атома приведено на рис. 1,а. Электрон в атоме может перейти с одного энергетического уровня  $W_1$  на другой энергетический уровень  $W_2$ , но только «скачком» и только на свободный уровень. Для этого электрону необходимо сообщить дополнительную порцию или квант энергии  $\Delta W = W_2 - W_1$

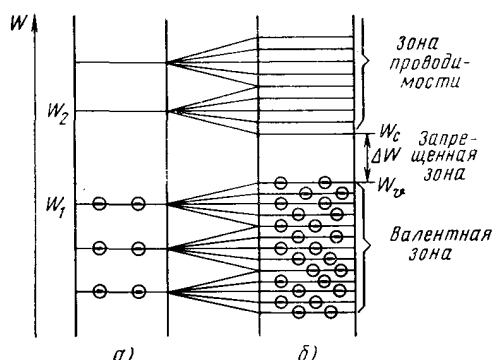


Рис. 1. Энергетическая диаграмма изолированного атома.

Если электрон перемещается под действием электрического поля, т. е. проходит электрический ток, то при этом изменяется энергия  $W$  электрона. На энергетической диаграмме это отразится в перемещении электрона на близлежащие свободные энергетические уровни. Если таких уровней нет, то электрон не сможет изменить свою энергию, т. е. не сможет принять участие в создании электропроводности. При образовании кристаллической решетки из  $n$  атомов электроны, находящиеся на внешних валентных оболочках отдельных атомов, сближаются настолько, что на одном энергетическом уровне должно было бы оказаться более двух электронов. Но этого не происходит, и принцип Паули не нарушается вследствие того, что отдельные энергетические уровни расщепляются на  $n$  подуровней, образуя энергетические зоны (рис.1.б). Причем расщепляются как заполненные, так и свободные энергетические уровни. При этом образуется соответственно заполненная электронами *валентная зона* и свободная *зона проводимости*. На рис. 1. б верхний уровень или «потолок» валентной зоны обозначен  $W_v$ , а нижний уровень, или «дно» зоны проводимости, обозначен  $W_e$ .

В кристаллических решётках различных веществ валентная зона и зона проводимости могут примыкать вплотную друг к другу, могут даже перекрываться, а могут и значительно отстоять друг от друга. Энергетическую щель между валентной зоной и зоной проводимости называют **запрещённой зоной  $\Delta W$** .

В кристаллических решётках различных веществ валентная зона и зона проводимости могут примыкать вплотную друг к другу, могут даже перекрываться, а могут и значительно отстоять друг от друга. Энергетическую щель между валентной зоной и зоной проводимости называют **запрещённой зоной  $\Delta W$** .

В кристаллических решётках различных веществ валентная зона и зона проводимости могут примыкать вплотную друг к другу, могут даже перекрываться, а могут и значительно отстоять друг от друга. Энергетическую щель между валентной зоной и зоной проводимости называют **запрещённой зоной  $\Delta W$** .

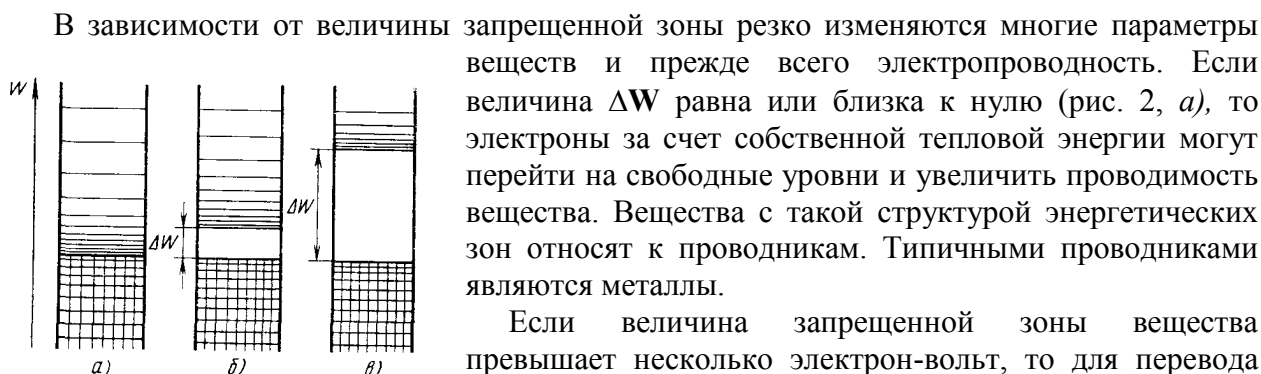


Рис. 2. Энергетические диаграммы веществ.

В зависимости от величины запрещенной зоны резко изменяются многие параметры веществ и прежде всего электропроводность. Если величина  $\Delta W$  равна или близка к нулю (рис. 2, а), то электроны за счет собственной тепловой энергии могут перейти на свободные уровни и увеличить проводимость вещества. Вещества с такой структурой энергетических зон относят к проводникам. Типичными проводниками являются металлы.

Если величина запрещенной зоны вещества превышает несколько электрон-вольт, то для перевода электронов из валентной зоны в зону проводимости придется затратить значительную энергию, способную разрушить структуру вещества. Такие вещества

называют диэлектриками (рис. 2, в). Они имеют высокое удельное сопротивление и используются, например, в качестве электроизоляционных материалов.

Промежуточное положение по ширине запрещенной зоны занимают полупроводники (рис. 2, б). К ним относят вещества, у которых  $\Delta W=0,1—3$  эв (кремний, германий и др.). В полупроводниках можно довольно легко за счет внешней энергии перебрасывать электроны из валентной зоны в зону проводимости, управляя величиной проводимости.

### Физические процессы в проводниках

Для твердых металлических проводников характерны высокие электро- и теплопроводность, обусловленные особенностями металлической связи между атомами, в частности наличием в проводнике среды коллективизированных электронов («электронного газа»). Наличие электронного газа в металлах легко подтверждают экспериментально. Например, в момент остановки быстро двигавшегося проводника между его концами появляется разность потенциалов, что объясняется смещением электронного газа по инерции к одному краю проводника. Далее, при нагревании металлов наблюдают вылет (*эмиссию*) электронов. Это становится понятным, если учесть, что скорости теплового движения электронов возрастают с ростом температуры металла и достигают такой величины, которая достаточна для вылета электронов наружу из металла.

К электронному газу в металлах, с некоторыми ограничениями, применимы понятия и законы обычных газов. Так рассмотрение двух состояний электронного газа - теплового хаотического движения электронов и направленного движения под действием внешнего электрического поля - приводит к теоретическому установлению закона Ома.

На основании классической электронной теории электропроводности металлов для удельного электрического сопротивления проводника  $\rho$ , измеряемого в Ом-м, запишем

$$\rho = \frac{2mv_t}{e^2 n l_{cp}} = \frac{1}{en\mu} \quad (1)$$

где  $e, m$  - величина заряда и масса электрона,  $v_t$ —средняя скорость теплового движения электронов в металле, м/с;  $n$ — концентрация свободных электронов, м<sup>-3</sup>;  $l_{cp}$  - длина свободного пробега электронов, м;  $\mu$ —подвижность электронов, обусловленная действием электрического поля напряженностью  $E$ , м<sup>2</sup>/(в.с).

При движении электронного газа под действием электрического поля происходит столкновение электронов с ионами кристаллической решетки. При этом энергия электронов передается ионам металла, и проводник нагревается. Мощность удельных тепловых потерь  $P$ , выделяющаяся в проводнике, измеряемая в Вт/м<sup>3</sup>, подчиняется закону Джоуля — Ленца:

$$P = E^2 / \rho \quad (2)$$

Средние скорости  $v_t$  в различных проводниках примерно одинаковы, незначительно отличаются также и концентрации свободных электронов  $n$ . Например, в нормальных условиях для меди  $n=8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ , для алюминия  $n=8,3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Наиболее существенно у различных проводников отличаются значения  $\mu$  и  $l_{cp}$ , зависящие от структуры и состава проводника и определяющие его сопротивление электрическому току. Любые искажения правильности кристаллической решетки металла (примеси, вакансии, деформация решетки) приводят к снижению значений  $l_{cp}$ ,  $\mu$  и к повышению удельного сопротивления проводникового материала (рис. 3). Вот почему материалы высокой проводимости (чистые металлы) должны иметь совершенную кристаллическую структуру, находиться в ненапряженном (отожженном) состоянии и практически не содержать примесей. Материалы **высокого сопротивления** это, как правило, различные **сплавы**, содержащие несколько резко отличающихся по свойствам металлов. Эти материалы часто имеют весьма мелкозернистую структуру с большим числом дефектов (например, резистивные металлические пленки). Сам материал, как правило, находится в напряженном состоянии, создаваемом механической и термической обработкой (прокатом, волочением, закалкой и т. д.). Все это приводит к минимальным значениям  $\mu$  и  $l_{cp}$  и соответственно к максимальным значениям  $\rho$ .

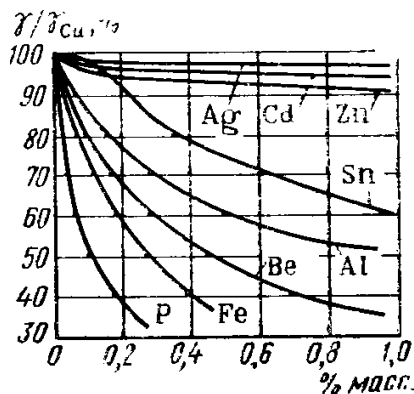


Рис. 3. Влияние примесей на удельную проводимость меди  $\gamma$  ( $\gamma_{Cu}$  — удельная проводимость чистой меди)

Характерным свойством всех металлов и сплавов является повышение их электрического сопротивления с ростом температуры (рис. 4.). Зависимость  $\rho$  от температуры определяется из (4):

$$\rho = 2(3mkT)^{-1/2} n^{-1} e^{-2} l_{cp}^{-1} \quad (2)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ;  $T$  — термодинамическая температура, К.

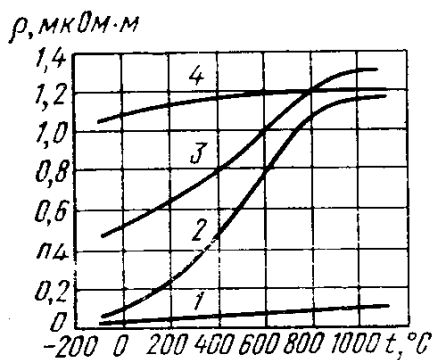


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры:

1 — чистая медь; 2 — чистое железо; 3 — сплав железа с кремнием (4% Si); 4 — сплав железа с никелем и хромом

Такой характер зависимости  $\rho \sim T^{1/2}$  получен в предположении, что  $n$  и  $l_{cp}$  не зависят от температуры. На практике с ростом температуры происходит усиление колебательных движений атомов кристаллической решетки металла и хаотических движений свободных электронов, в результате чего снижаются значения средней длины свободного пробега электронов  $l_{cp}$  и их подвижность  $\mu$ . Это приводит к более сложным формам зависимости  $\rho$  от  $T$ , которые лучше соответствуют экспериментальным данным.

### Свойства проводниковых материалов

Основными параметрами, определяющими свойства проводниковых материалов, являются: 1) удельное электрическое сопротивление  $\rho$  или удельная проводимость  $\gamma$ ; 2) температурный коэффициент удельного сопротивления  $T\alpha\rho$  или  $\alpha\rho$  3) коэффициент

термо-э.д.с.  $k$ , 4) коэффициент теплопроводности  $\gamma_t$ .

Из механических свойств проводников наиболее важными являются предел прочности при растяжении  $\sigma_p$  и относительное удлинение при разрыве  $\Delta l/l$ .

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  проводника с сопротивлением  $R$  постоянным поперечным сечением  $S$  и длиной  $l$  вычисляют по формуле:

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

Величину, обратную  $\rho$ , называют *удельной электрической проводимостью*  $\gamma$  и измеряют в См/м.

Значения  $\rho$  металлов в нормальных условиях отличаются друг от друга примерно в 100 раз. По величине  $\rho$  при нормальной температуре проводниковые материалы делят на металлы высокой проводимости ( $\rho$  не более 0,1 мком·м) и сплавы высокого сопротивления ( $\rho$  не менее 0,3 мком·м).

*Температурный коэффициент удельного сопротивления* проводников, измеряемый в  $K^{-1}$ , при данной температуре вычисляют по формуле

$$TK\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}$$

где  $d\rho$ —элементарное приращение сопротивления проводника, соответствующее элементарному приращению температуры  $dt$ .

*Средний температурный коэффициент* удельного сопротивления металлов  $\alpha_\rho$  в диапазоне температур вычисляют по формуле

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_T - \rho_0}{T - T_0}$$

Из этой формулы легко рассчитать значение  $\rho_T$  для заданной температуры  $T$ :

$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)]$$

Значения  $TK\rho$  металлов положительны и для большинства чистых металлов в нормальных условиях составляют в среднем  $4 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ . Исключение составляют ферромагнитные металлы, у которых  $TK\rho$  достигает  $(6—6,5) \cdot 10^{-3} K^{-1}$ . Для проводниковых и прецизионных материалов высокого сопротивления  $TK\rho$  должен быть как можно меньше. Близкими к нулю значениями  $TK\rho$  обладают некоторые сплавы высокого сопротивления, например константан.

*Коэффициент теплопроводности* проводников  $\gamma_T$  прямо пропорционален их удельной проводимости. Поэтому наивысшими значениями  $\gamma_T$  обладают металлы с максимальной проводимостью: серебро, медь, алюминий. Таким образом, теплоотводящие устройства, например, мощных резисторов, полупроводниковых приборов, а также шасси приборов изготавливают из металлов с высокой электропроводностью (медь, алюминий и сплавы на основе этих металлов).

*Механические свойства* проводников характеризуют обычно пределом прочности при растяжении  $\sigma_p$  и относительным удлинением при разрыве  $\Delta l/l$ . Необходимо отметить, что у всех проводниковых материалов механические свойства сильно зависят от режимов механической и термической обработки материала. Термообработка твердой (нагартованной) проволоки приводит к снижению предела прочности при растяжении в 1,5—2 раза и к росту относительного удлинения при разрыве в 15—20 раз.

Для проводников, используемых в электровакуумных приборах, важной механической характеристикой материала является *температурный коэффициент длины* (линейного расширения), позволяющий определить изменение любых геометрических размеров изделий (длины, ширины, толщины) при нагревании. Однако наиболее легко изменение размеров изделия при нагревании фиксируется по максимальному размеру—длине. Различают температурный коэффициент длины при данной температуре ( $TKl$ ) и его среднее значение в интервале температур ( $\alpha_l$ ):

$$TKl = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT}; \alpha_l = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_T - l_0}{T - T_0}$$

где  $l_0, l_T$ —геометрические размеры изделий, соответствующие температурам  $T_0$  и  $T$ .

Минимальные значения ТКІ характерны для тугоплавких металлов, которые с успехом используют для получения вакуумно-плотных спаев со стеклом, керамикой и другими диэлектрическими материалами. Созданы специальные сплавы, согласованные по величине ТКІ с определенными сортами электровакуумных стекол и керамики.

По плотности металлы разделяют на легкие и тяжелые. Легкими считают те металлы, плотность которых меньше  $5 \text{ Мг/м}^3$ . Из легких металлов широко применяется в промышленности магний с плотностью  $1,74 \text{ Мг/м}^3$  и алюминий с плотностью  $2,7 \text{ Мг/м}^3$ . К числу наиболее легких металлов относится натрий — металл, плотность которого меньше плотности воды. Благодаря своей исключительной легкости и небольшому  $\rho$  металлический натрий является перспективным проводниковым материалом.

К тяжелым относится подавляющее большинство металлов, используемых в технике (железо, медь, никель, олово и др.). Максимальной плотностью обладают металлы VII и VIII групп периодической системы элементов Д.И. Менделеева, близкие по свойствам к платине: иридий— $22,4 \text{ Мг/м}^3$ , осмий— $22,5 \text{ Мг/м}^3$ .

**Задание:** Измерить зависимость удельного сопротивления резистора от температуры.

### Порядок выполнения работы

Измерения проводятся методом вольтметра и амперметра по схеме, изображенной на рис.5. Электрический ток от источника протекает через амперметр и включенный

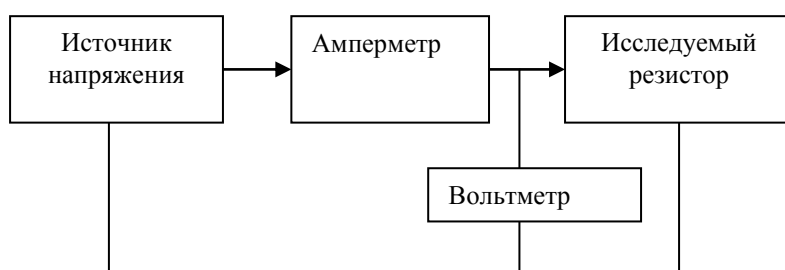


Рис. 5. Блок схема измерения сопротивления.

последовательно с ним исследуемый резистор. Падение напряжения на исследуемом резисторе измеряется вольтметром. Измеряемыми величинами являются ток и напряжение. Сопротивление исследуемого резистора рассчитывается по закону Ома:  $R=U/I$ .

Исследуемый резистор помещён в нагреватель. Температуру в нагревателе измеряют термометром. Третьей измеряемой величиной является температура. Измерения тока и напряжения надо проводить через  $5^\circ\text{C}$ , начиная с комнатной температуры, до  $70^\circ\text{C}$ . Результаты измерений занести в таблицу.

**Измерение исследуемого сопротивления можно производить специальным прибором – омметром.** В этом случае в измерении тока и напряжения нет необходимости, прибор показывает измеряемое сопротивление в омах. Соответственно, в таблицу заносятся только значения сопротивления и температуры.

№	U, (V)	I, (A)	R, (om)	T, (°C)

По табличным данным построить график зависимости сопротивления от температуры. Выбрать на графике наиболее линейный участок и произвести расчёт температурного коэффициента сопротивления для этого участка. Сравнить полученный результат со справочными данными.

### Контрольные вопросы

- 1) Что является носителем заряда в проводнике?
- 2) Определите теорию электронного газа.

- 3) Чем определяется длина свободного пробега электронов в проводнике?
- 4) Объясните причины изменения длины свободного пробега электронов с изменением температуры.
- 5) Объясните механизм потерь в проводнике при протекании электрического тока.
- 6) Какие нарушения кристаллической структуры вы знаете?
- 7) Как нарушения кристаллической структуры влияют на проводимость проводника?

#### **Основная литература:**

1. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника М.,1991.
2. Власов А.Б. Физические основы электроники.
3. Носова Г.И., Задворный А.Г.. Физические основы электроники.
4. Бобылев Ю.Н. Физические основы электроники.
5. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. Москва, “Высшая школа”, 1979.
6. Степаненко И.П.. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Москва, “Энергия”, 1977.
7. Блэйкмор Дж. Физика твёрдого тела. Москва, “Мир”, 1988.

#### **Дополнительная литература**

8. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. М., Радио и связь. 1985 504с.
9. Ефимчик М.К., Шушкевич С.С. Основы радиоэлектроники. Минск, изд-во Бел.Ун-та, 1986, 302 с.
10. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. М., Металлургия, 1988, 574 с.
11. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А.. Полупроводниковые приборы. М., Энергоатомиздат, 1990,575 с.
12. Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике. М.. Наука 1988 335 с.