

## Лабораторная работа №315

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ  
СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ  
И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

**Приборы и принадлежности:** измеряемые образцы, масляная баня, источник постоянного тока к мешалке, универсальный вольтметр РВ7-32.

**Введение.** Как показывает опыт, электрическое сопротивление металлов и полупроводников зависит от температуры [1-2]. Зависимость сопротивления *металлов* от температуры (в области средних температур) можно описать следующим соотношением:

$$R_M = R_0(1 + \alpha t^\circ), \quad (1)$$

где  $R_0$  и  $R_t$  – значение сопротивления при  $0^\circ \text{C}$  и температуре  $t^\circ$ , соответственно;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления данного металла,

$t^\circ$  – температура по шкале Цельсия.

Зависимость сопротивления металлов от температуры нашла применение в технике для точных измерений температуры с помощью так называемых *термометров сопротивления*. Термометр сопротивления представляет собой проволочный резистор, сопротивление которого при различной температуре хорошо известно. Термометры сопротивления используются для измерения температур в широких пределах. Например, платиновый термометр может работать в интервале температур от  $-200$  до  $1000^\circ \text{C}$ .

В отличие от металлов сопротивление *полупроводников* быстро уменьшается с ростом температуры по следующему закону [2,3]:

$$R_{\text{п}} = A e^{\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (2)$$

где  $T$  – абсолютная температура,

$e$  – основание натуральных логарифмов,

$k$  – постоянная Больцмана,

$\Delta W$  – ширина запрещенной зоны данного полупроводника,

$A$  – постоянная для данного образца.

При тепловом возбуждении электропроводности количество электронов, переходящих из валентной зоны в зону проводимости, тем больше, чем выше температура и чем уже интервал запрещенных *энергий*  $\Delta W$ .

Концентрация электронов в зоне проводимости определяется выражением

$$n = BT^{3/2} e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (3)$$

$B$  – постоянная для данного вещества.

Так как в полупроводниковом материале в результате внешнего воздействия одновременно появляются носители тока двух типов, то общая электропроводность вещества определяется формулой

$$\sigma = en_n u_n + ep u_p, \quad (4)$$

где  $e$  – элементарный заряд,

$n_n, n_p$  – концентрация электронов и дырок,

$u_n, u_p$  – их подвижность.

В случае чистого полупроводникового вещества (без примесей) число дырок в валентной зоне равно числу электронов в зоне проводимости, т. е.  $n_n = n_p = n$ . Тогда

$$\sigma = en(u_n + u_p). \quad (5)$$

Электропроводность описанного типа называется собственной проводимостью полупроводника.

Электропроводность полупроводника в области собственной проводимости, как следует из формул (3) и (5), определяется выражением

$$\sigma = e(u_n + u_p)BT^{3/2} e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}.$$

Пренебрегая температурной зависимостью подвижности, а также учитывая, что степенной множитель  $T^{3/2}$  возрастает значительно медленнее показательного  $\exp(-\Delta W/2kT)$ , можно записать для электропроводности следующее соотношение:

$$\sigma = C e^{-\frac{\Delta W}{2kT}},$$

где  $C$  – некоторая постоянная данного вещества.

Сопротивление полупроводника  $R_{\Pi}$ , как величина обратная электропроводности, описывается формулой (2). Сильная зависимость сопротивления полупроводников от температуры дает возможность использовать их в качестве чувствительных термометров. Полупроводниковые термочувствительные элементы называются *термисторами*.

Если прологарифмировать выражение (2), получим следующее:

$$\ln R_{\Pi} = \ln A + \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (6)$$

Согласно уравнению (6) величина  $\ln R_{\Pi}$  линейно зависит от аргумента  $1/T$ , коэффициент  $\Delta W/2k$  представляет собой угловой коэффициент  $a$  прямой, изображенной на рис. 1. Для удобства построения графика вместо аргумента  $1/T$  взят  $1000/T$ . Но тогда необходимо угловой коэффициент уменьшить на три порядка.

Таким образом, с одной стороны

$$a = \frac{\Delta W}{2 \cdot 10^3 k},$$

с другой

$$a = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{10^3}{T_1} - \frac{10^3}{T_2}}. \quad (7)$$

Следовательно,

$$\frac{\Delta W}{2 \cdot 10^3 k} = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{10^3}{T_1} - \frac{10^3}{T_2}}. \quad (8)$$

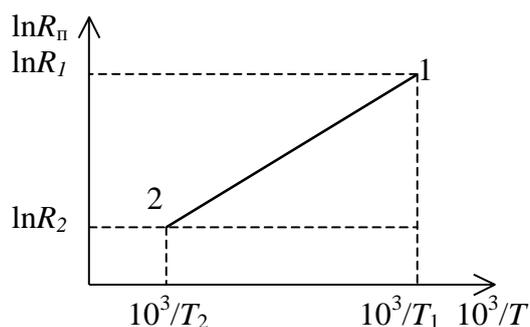


Рис.1

Уравнение (8) дает возможность определить ширину запрещенной зоны полупроводника  $\Delta W$  из температурной зависимости его сопротивления.

**Описание установки.** В экспериментальную установку входит масляная баня и универсальный вольтметр РВ7-32 (рис.2). В сосуд с трансформаторным маслом помещены металлический резистор  $R_M$  и термистор  $R_{II}$ , провода от которых подведены к клеммам на крышке бани.

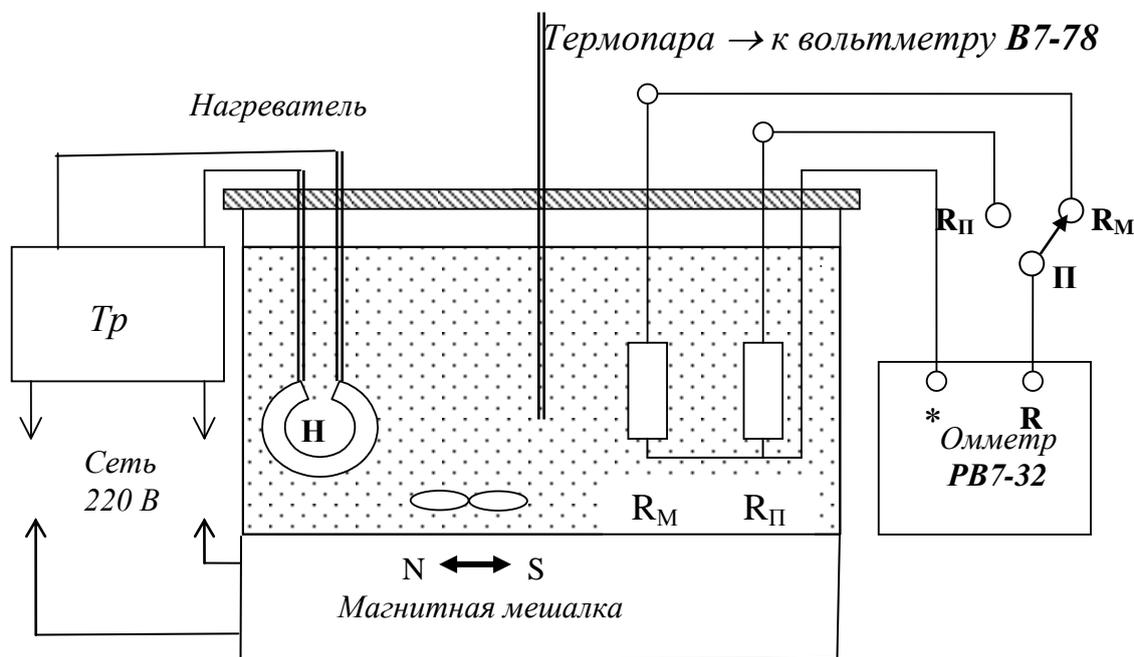


Рис. 2

Нагреватель  $H$  включается в сеть переменного тока 220В через трансформатор  $Tr$ . Для выравнивания температуры во всем объеме масла в сосуд помещена мешалка, приводимая в действие вращающимся магнитом  $N \leftrightarrow S$ . Температура в бане измеряется термопарой.

Провода от резистора  $R_M$  и термистора  $R_{II}$  подведены к переключателю  $\Pi$ , а от него – к омметру универсального прибора РВ7-32.

**Измерения.** 1. Включите универсальный вольтметр РВ7-32 в сеть 220В. Поставьте его переключатель в положение “R” – измерение сопротивления. Измеряемая величина высвечивается на табло в кОм.

2. Включите мешалку и *не выключайте* ее в течение всей серии измерений. Убедитесь, что ее активатор в сосуде с маслом вращается.

3. Включите вольтметр В7-78 в сеть. Соедините его входные гнезда (**крайние правые**) с выходом термопары: красный проводничок – с красным гнездом, черный – с черным.

Ниже расположенная серая кнопка «Гнезда» должна быть высокой, признак того, что рабочей является *фронтальная* панель прибора (имеется и тыльная панель, расположенная на задней стенке).

4. Включите кнопку «Сеть».

5. Нажмите клавишу «Преф», затем – кнопку «темп». Если все действия выполнены аккуратно и правильно, на дисплее высветятся две строки:

|  |   |
|--|---|
| $\emptyset 22,122^{\circ}\text{C}$<br>T COUPLE: K TYPE | (разумеется, температура будет иная!),<br>(термопара типа К). |
|--|---|

6. Нажмите клавишу  $\blacktriangle$  «Предел», клавишами  $\blacktriangleleft \blacktriangleright$  «Установка» установите точность измерения температуры с одним знаком после запятой.

7. Установите автоматический запуск измерений, нажав клавишу «Автозапуск».

Таким образом, прибор готов измерять температуру.

8. Тумблер-переключатель **II** на лабораторной панели поставьте в положение *1* – измерение сопротивления металлического резистора  $R_M$ . Показания омметра и исходную температуру запишите в таблицу.

9. Переключите тумблер **II** в положение *2*. Запишите сопротивление полупроводникового термистора  $R_{II}$  в ту же таблицу.

10. Примерно на 20-30 секунд включите нагреватель. После увеличения температуры на  $3-4^{\circ}$  по сравнению с предыдущей нагреватель выключите и, дождавшись установления стабильных показаний термометра, произведите измерение сопротивлений  $R_M$  и  $R_{II}$ .

11. Повышая температуру ступенями по  $3-4^{\circ}$  от комнатной до  $50^{\circ}\text{C}$ , каждый раз производите измерение сопротивлений резистора и термистора, выключая перед каждым измерением нагреватель и дожидаясь установления показаний термометра.

| Резистор              |                  |                         | Термистор           |              |                         |                       |
|-----------------------|------------------|-------------------------|---------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|
| $t, ^{\circ}\text{C}$ | $R_M, \text{Om}$ | $\alpha, \text{K}^{-1}$ | $R_{II}, \text{Om}$ | $\ln R_{II}$ | $10^3/T, \text{K}^{-1}$ | $\Delta W, \text{эВ}$ |
|                       |                  |                         |                     |              |                         |                       |

**Обработка результатов измерений.** 1. По данным таблицы постройте графики зависимости сопротивления резистора и термистора от температуры. Определите по графику температурный коэффициент сопротивления данного металла.

2. Постройте график зависимости  $\ln R_{\text{п}}$  от  $10^3/T$ . Определите угловой коэффициент полученной прямой.

3. Вычислите ширину запрещенной зоны полупроводникового материала из уравнения (8), переведите ее в более распространенные в данной области физики единицы – электронвольты, используя существующее между ними соотношение  $1 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

### Контрольные вопросы

1. По каким признакам все вещества разделяются на проводники, диэлектрики и полупроводники?

2. Как элементарная классическая теория металлов объясняет температурную зависимость их сопротивления?

3. Нарисуйте примерный график зависимости сопротивления различных металлов в широком интервале температур. Где место Вашего эксперимента на этой шкале?

4. Какой формулой описывается зависимость сопротивления металла от температуры в области средних ее значений?

5. Что такое температурный коэффициент сопротивления? Каков его физический смысл? Как его можно определить из экспериментальных данных? В каких случаях требуется знание и учет этого коэффициента?

6. Как ведет себя сопротивление полупроводникового материала с ростом температуры? Подчиняется ли его температурная зависимость классической теории электропроводности? В чем противоречие?

7. Что такое зонная теория электропроводности? Что представляют собой металлы, изоляторы и полупроводники с точки зрения зонной теории?

8. Как зонная теория объясняет температурную зависимость сопротивления полупроводников? Какой формулой описывается температурная зависимость сопротивления?

9. Можно ли на основании Ваших экспериментальных данных сделать вывод об экспоненциальной зависимости сопротивления термистора от температуры?

10. Что такое энергия активации электропроводности? Как ее можно определить по данным эксперимента? Сравните найденное значение энергии активации со средней энергией теплового движения атомов вещества при наибольшей температуре Ваших измерений. Каков Ваш комментарий к полученным результатам?

Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2: Электричество и магнетизм. СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2007. § 77-78.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3: Электричество. М.: Физматлит МФТИ, 2002. § 100.
3. Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2003. § 60.
4. Кортнев А. В., Рублев Ю. В., Куценко А.Н. Практикум по физике. М.: Высш. шк., 1963. С. 223, 285.