

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.02 ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА И ПОЛУПРОВОДНИКА

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение температурного коэффициента сопротивления металла и ширины запрещенной зоны полупроводника.

### ЗАДАЧИ

1. Измерить электрическое сопротивление металлического и полупроводникового образцов в диапазоне температур от комнатной до 70 °С.
2. По результатам п. 1 вычислить температурный коэффициент сопротивления металла и ширину запрещенной зоны полупроводника.

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрический ток есть направленное движение заряженных частиц - свободных носителей заряда. Без внешнего электрического поля эти носители совершают беспорядочное тепловое движение. Средний модуль скорости  $v$  теплового движения электронов при комнатных температурах порядка  $10^5$  м/с, а среднее значение вектора скорости равно нулю. Внешнее электрическое поле действует на носитель заряда силой:

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  - напряженность поля;  $q$  - заряд носителя. Таким способом внешнее поле создает направленное движение носителей заряда – электрический ток с плотностью тока  $\vec{j}$ :

$$\vec{j} = n \cdot q \cdot \vec{u} \quad (2)$$

Здесь  $n$  - концентрация носителей заряда;  $\vec{u}$  – *направленная (дрейфовая) скорость* носителей. Если ток создается одним типом носителей (например, электронами), формула (2) дает полную плотность тока в испытуемом образце.

В конденсированных средах при протекании электрического тока носители заряда претерпевают частые столкновения с другими частицами. Это ведет к двум важным следствиям: во-первых, дрейфовая скорость носителей много меньше средней скорости их теплового движения ( $u \ll v$ ) и, во-вторых, пропорциональна силе  $F$ , следовательно, и напряженности поля:

$$\vec{u} = \mu \cdot \vec{E} \quad (3)$$

Величину  $\mu$  называют *подвижностью носителей заряда*.

Пропорциональной напряженности поля оказывается и плотность тока, из (2) и (3) следует:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (4)$$

где

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu \quad (5)$$

это параметр конкретного материала - его *удельная проводимость*; обратную величину  $\rho = 1 / \sigma$  называют *удельным сопротивлением*. Соотношение (4) представляет собой дифференциальную векторную форму закона Ома. Зависимости проводимости от температуры принципиально различны для металлов и полупроводников.

Для небольших интервалов температуры, не слишком близких к абсолютному нулю, удельное сопротивление металлов удовлетворительно описывается простой линейной зависимостью:

$$\rho_m(t) = \rho_o (1 + \alpha \cdot t) \quad (6)$$

Здесь  $\rho_o$  - удельное сопротивление металла при температуре 0°С;  $\alpha$  – *температурный коэффициент сопротивления*.

Так же зависит от температуры и сопротивление любого однородного металлического образца:

$$R_m(t) = R_o (1 + \alpha \cdot t) \quad (7)$$

Такая зависимость объясняется тем, что в металлах практически все валентные электроны свободны - не связаны с каким-либо конкретным атомом. Поэтому температура не может заметно изменить концентрацию свободных носителей  $n$ ; изменение проводимости определяется главным образом температурной зависимостью подвижности электронов:  $\sigma \sim \mu$ . Подвижность же тем больше, чем реже происходят столкновения носителей со всякого рода дефектами кристаллической решетки. Ими являются атомы примеси, вакансии (незаполненные позиции) в узлах решетки, отклонения от правильного расположения атомов в узлах решетки за счет, например, тепловых колебаний и пр. Увеличение с ростом температуры интенсивности тепловых колебаний атомов увеличивает частоту столкновений с электронами. Это ведет к уменьшению подвижности носителей заряда.

Характерный график такой зависимости показан на рис. 1 линией  $R_m$ .

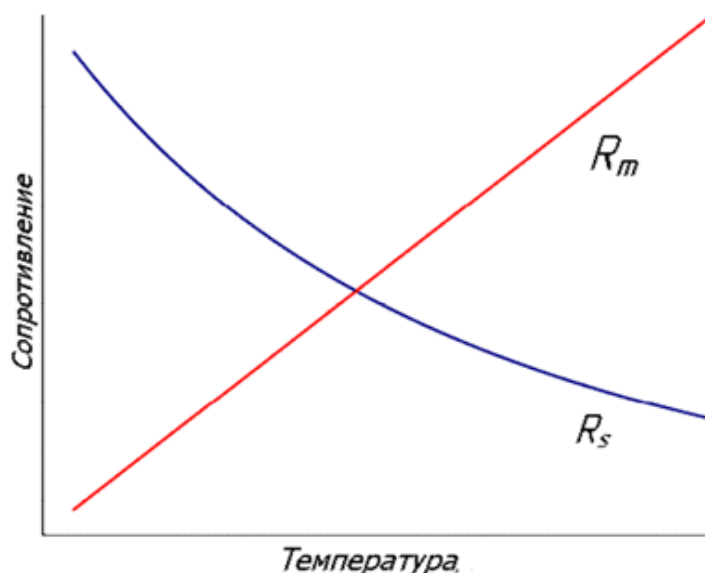


Рис. 1 Качественный вид температурных зависимостей сопротивления металла и полупроводника.

Согласно зонной теории валентные электроны в полупроводнике локализованы на связях между соседними атомами и не являются свободными, а их энергии соответствуют полосе, которая называется валентной зоной. Чтобы делокализоваться («оторваться» от связи) и стать электронами проводимости, они должны получить дополнительную энергию, превосходящую некоторую величину  $E_g$ . Эту величину  $E_g$  называют *шириной запрещенной зоны полупроводника*. Ширина запрещенной зоны специфична для каждого полупроводникового материала и имеет порядок величины  $10^{-1} \div 10$  электрон-вольт.

В *собственном полупроводнике*, который исследуют в этой работе, каждый акт теплового возбуждения электрона приводит к образованию *пары носителей электрон - дырка*. Дырки, являющиеся частично заполненными электронными орбиталями, также могут перемещаться по решетке под действием внешнего электрического поля, т.е. являются свободными носителями положительного заряда, равного по модулю заряду электрона ( $+e$ ). Направление дрейфовой скорости дырок противоположно направлению дрейфовой скорости электронов. Таким образом, полная плотность тока в полупроводнике складывается из плотности тока электронов  $\vec{j}_e$  и плотности тока дырок  $\vec{j}_h$ :  $\vec{j} = \vec{j}_e + \vec{j}_h$ .

А общая удельная проводимость собственного полупроводника будет равна:

$$\sigma_s = e \cdot n \cdot (\mu_e + \mu_h), \quad (8)$$

так как концентрации электронов и дырок одинаковы ( $n_e = n_h = n$ ), а их подвижности  $\mu_e$  и  $\mu_h$  различны. Подвижности  $\mu_e$  и  $\mu_h$  зависят от температуры много слабее, чем концентрация носителей заряда  $n$ . Поэтому для полупроводника можно приближенно считать, что температурная зависимость  $\sigma_s$  определяется только температурной зависимостью  $n$ .

Разрыв связей (*генерация свободных носителей*) происходит за счет энергии тепловых колебаний атомов. Среднее ее значение  $kT$  ( $k$  - постоянная Больцмана) при комнатной температуре составляет  $\approx 4 \cdot 10^{-21}$  Дж = 25 мэВ.

Процесс генерации носителей сопровождается обратным процессом *рекомбинации* электронов проводимости с дырками. Состояние динамического равновесия наступает тогда, когда средняя частота актов рекомбинации становится равной средней частоте актов генерации носителей. Расчет дает, что равновесная концентрация свободных носителей при этом будет экспоненциальным образом зависеть от температуры:

$$n(T) \sim \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (9)$$

Следовательно, удельная проводимость полупроводника так же зависит от температуры:

$$\sigma_s(T) = \sigma^* \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (10)$$

а удельное сопротивление:

$$\rho_s(T) = \frac{1}{\sigma_s} = \rho^* \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (11)$$

Зависимость сопротивления однородного полупроводникового образца от температуры можно описать формулой:

$$R_s(T) = R^* \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (12)$$

Вид этой зависимости показан на рис. 1 кривой  $R_s$ .

Логарифмирование соотношения (12) дает:

$$\ln \frac{R_s}{R^*} = \frac{E_g}{2kT} \quad (13)$$

Разница между температурными зависимостями металла и полупроводника очевидна: сопротивление металла по мере повышения температуры растет, а сопротивление полупроводника - падает. Для металла сопротивление линейно зависит от температуры (формула (7), линия  $R_m$  на рис. 1), для полупроводника линейно связаны логарифм сопротивления и величина, обратная температуре (13).

По экспериментальным данным из формулы (7) легко найти температурный коэффициент сопротивления металла  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (14)$$

При этом  $R_0$  определяют экстраполяцией линейной зависимости  $R = R(t)$  к температуре  $t = 0^\circ\text{C}$ .

Из результатов измерений на полупроводниковом образце легко вычислить ширину запрещенной зоны  $E_g$ :

$$E_g = 2k \cdot \frac{\Delta \ln R_s}{\Delta \left(\frac{1}{T}\right)} \quad (15)$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (рис. 2) включает в себя нагревательный модуль 1 с образцами и датчиком температуры, цифровой термометр 2, цифровой мультиметр 3, работающий в режиме измерения сопротивления и соединяемый с металлическим или полупроводниковым образцом переключателем 4.

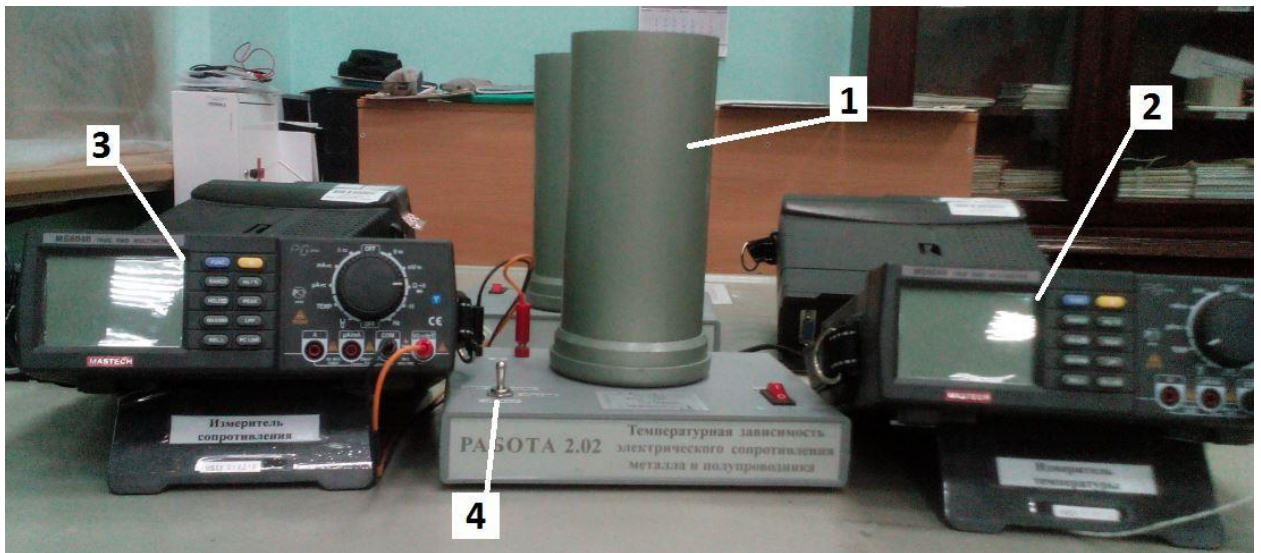


Рис. 2 Общий вид экспериментальной установки

Внутри нагревательного модуля находятся металлический (Pt) и полупроводниковый (Ge) образцы (рис. 3).

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1. **Перед включением** установки необходимо проверить, что кнопки «HOLD» **всех** измерительных приборов находятся в **отжатом** состоянии.
2. Включите тумблер общего напряжения питания на сетевом фильтре.
3. Проконтролируйте включение измерительных приборов. Обратите внимание на то, чтобы на электронном термометре был выбран режим представления результата измерения температуры в шкале Цельсия. Запишите в Таблицу 1 значения сопротивления обоих образцов и температуры перед включением нагревательного модуля.
4. Включите нагревательный модуль тумблером, расположенным на его корпусе.
5. По мере увеличения температуры записывайте в Таблицу 1 значения температуры  $t$  в  $^{\circ}\text{C}$ , сопротивления металла  $R_m$  с интервалом  $\Delta t = 2 - 3^{\circ}\text{C}$ . Необходимо проделать не менее 15 измерений.
6. **ВНИМАНИЕ!** В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ ПРЕВЫШАТЬ ЗНАЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦОВ **75  $^{\circ}\text{C}$** . ПРИ ПРИБЛИЖЕНИИ К ЭТОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ НЕОБХОДИМО НЕМЕДЛЕННО ВЫКЛЮЧИТЬ НАГРЕВАТЕЛЬ.

**Таблица 1**

Результаты измерений температурной зависимости сопротивлений.

№ изм.	$t, ^{\circ}\text{C}$	$R_m, \text{Ом}$	$R_s, \text{Ом}$	$T, \text{K}$	$1/T, \text{K}^{-1}$	$\ln R_s$
1						
2						
...						

7. Переключите измеритель сопротивления на полупроводниковый образец и по мере его охлаждения записывайте в Таблицу 1 значения его сопротивления с указанным выше шагом  $\Delta t = 2 - 3^{\circ}\text{C}$ .

8. Покажите результаты измерений преподавателю, а затем полностью обесточьте установку, выключив тумблер общего напряжения питания на сетевом фильтре. Вилки сетевых шнуров из штепсельных разъемов по окончании измерений **извлекать не следует**.

## ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Для построения зависимости  $\ln R_s = f(1/T)$  вычислите для каждого значения температуры значения абсолютной температуры  $T$  (в кельвинах  $K$ ), обратной абсолютной температуры  $1/T$  в  $K^{-1}$  и  $\ln R_s$ . Результаты вычислений занесите в Таблицу 1.
2. Постройте на миллиметровой бумаге графики зависимостей:

$$R_m = R_m(t), \ln R_s = \ln R_s(1/T).$$

При построении графика  $\ln R_s(1/T)$  на шкале абсцисс удобно откладывать величину  $1000/T$ .

3. Определите значение параметра  $R_0$  графической экстраполяцией линейной зависимости  $R_m = R_m(t)$  к температуре  $t = 0^\circ C$ .

4. По формуле (14) методом парных точек вычислите температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$  металла и погрешность его определения. При записи данных используйте форму Таблицы 2, которую также следует оформить в отчете.

**Таблица 2**

Вычисление температурного сопротивления платины методом парных точек.

Пары точек $i-j$	$R_i - R_j$ , Ом	$t_i - t_j$ , К	$\alpha_{ij}$ , $K^{-1}$	$\alpha_{ij} - \langle \alpha \rangle$ , $K^{-1}$	$(\alpha_{ij} - \langle \alpha \rangle)^2$ , $K^{-2}$
1-7					
2-8					
....					
$\langle \alpha \rangle = \dots K^{-1}$ ;			$\Delta \alpha = \dots K^{-1}$		

5. Вычислите методом парных точек угловой коэффициент  $\gamma$  зависимости  $\ln R_s = f(1/T)$ . Для записи результатов вычислений воспользуйтесь Таблицей 3.

**Таблица 3**

Вычисление углового коэффициента  $\gamma$  зависимости  $\ln R_s = f(1/T)$  для германиевого образца методом парных точек.

Пары точек $i-j$	$\ln(R_i/R_j)$	$1/T_i - 1/T_j$ , $K^{-1}$	$\gamma_{ij}$ , К	$\gamma_{ij} - \langle \gamma \rangle$ , К	$(\gamma_{ij} - \langle \gamma \rangle)^2$ , $K^2$
1-7					
2-8					
....					
$\langle \gamma \rangle = \dots K$ ;			$\Delta \gamma = \dots K$		

6. В соответствии с формулой (15) ширина запрещенной зоны  $E_g$  может быть найдена по известному значению коэффициента  $\gamma$  по формуле  $E_g = 2 \langle \gamma \rangle k$ , где  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – значение постоянной Больцмана. Представьте результат в отчете, как в джоулях, так и в электрон-вольтах.

7. Определите абсолютную погрешность  $E_g$  по формуле:

$$\Delta E_g = \frac{\Delta \gamma}{\langle \gamma \rangle} E_g$$

8. Результаты расчетов  $E_g$  и  $\alpha$  занесите в отчет по работе, сформулируйте выводы, сравните полученные вами величины с их табличными значениями.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие процессы уменьшают подвижность носителей заряда?
2. Почему ширину запрещенной зоны полупроводников неудобно выражать в джоулях?
3. Как изменится температурный коэффициент сопротивления металлического образца, если все геометрические размеры образца (длина, ширина, толщина) уменьшить вдвое?

4. Почему сопротивление металлов пропорционально температуре, если концентрация электронов в них постоянная?
5. В каких единицах выражаются температурный коэффициент сопротивления и угловой коэффициент зависимости  $\ln R_s = f(1/T)$ ?