

Группа _____ Р3212 _____

К работе допущен _____

Студент _____ Балин А. А. _____

Работа выполнена _____

Преподаватель _____ Смирнов А. В. _____

Отчет принят _____

Рабочий протокол и отчет по лабораторной работе №3.05

Температурная зависимость электрического сопротивления металла и полупроводника

1. Цели работы.

- Получить зависимость электрического сопротивления металлического и полупроводниковых образцов в диапазоне температур от комнатной до 75 °С.
- По результатам п.1 вычислить температурный коэффициент сопротивления металла и ширину запрещенной зоны полупроводника.

2. Измерительные приборы.

| № | Наименование | Тип прибора | Используемый диапазон | Погрешность |
|---|--------------|-------------|-----------------------|-------------|
| 1 | Термометр | Электронный | 290–380 К | 0,5 К |
| 2 | Амперметр | Электронный | 0–2 мА | 0,001 мА |
| 3 | Вольтметр | Электронный | 0–2 В | 0,001 В |

3. Схема установки.

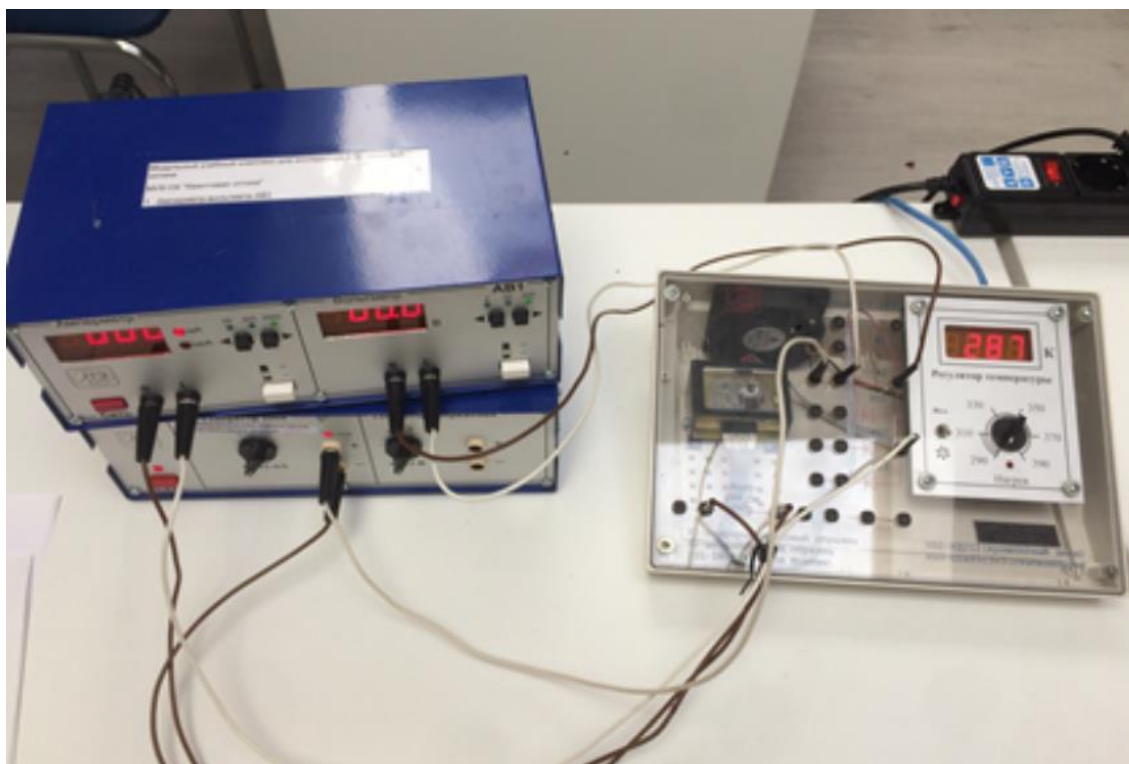


Рисунок 1. Общий вид лабораторной установки.

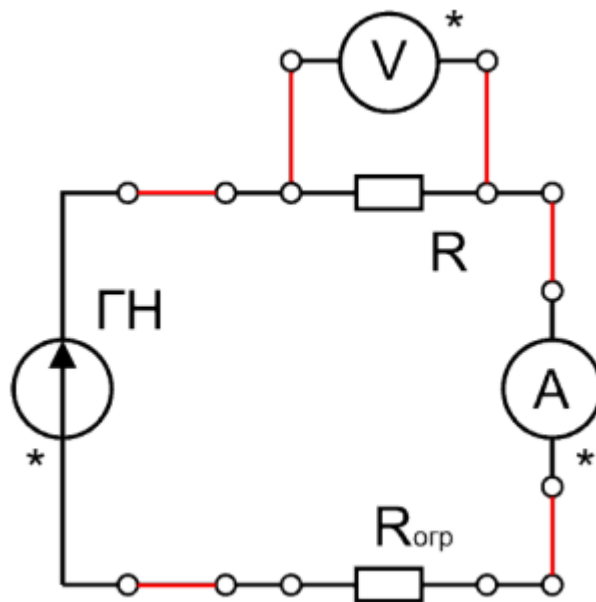


Схема 1. Принципиальная электрическая схема установки.

4. Рабочие формулы:

$$10\text{м} = \frac{1\text{В}}{1\text{мкА}} \cdot 10^6$$

$$1\text{кОм} = \frac{1\text{В}}{1\text{мкА}} \cdot 10^3$$

$$1^\circ\text{C} \approx 274.1\text{ K}$$

$$\alpha_{ij} = \frac{R_i - R_j}{R_j \cdot t_i - R_i \cdot t_j}$$

$$E_{gij} = 2k \frac{\ln R_i - \ln R_j}{\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_j}} = 2k \frac{T_i T_j}{T_j - T_i} \ln \left(\frac{R_i}{R_j} \right).$$

5. Ход работы.

1) Полупроводниковый образец

| № | T, K | I, мкА | U, В | R, Ом | ln R | $\frac{10^3}{T} \cdot \frac{1}{K}$ |
|----|------|--------|-------|-------|------|------------------------------------|
| 1 | 293 | 1058 | 0,241 | | | |
| 2 | 297 | 1080 | 0,211 | | | |
| 3 | 301 | 1116 | 0,188 | | | |
| 4 | 305 | 1148 | 0,161 | | | |
| 5 | 309 | 1171 | 0,140 | | | |
| 6 | 313 | 1194 | 0,123 | | | |
| 7 | 317 | 1213 | 0,108 | | | |
| 8 | 321 | 1231 | 0,095 | | | |
| 9 | 325 | 1245 | 0,082 | | | |
| 10 | 329 | 1257 | 0,072 | | | |
| 11 | 333 | 1269 | 0,063 | | | |

2) Металлический образец

| № | T, K | I, мкА | U, В | R, кОм | t, °C |
|----|------|--------|-------|--------|-------|
| 1 | 290 | 1165 | 1,445 | | |
| 2 | 294 | 1151 | 1,455 | | |
| 3 | 298 | 1137 | 1,464 | | |
| 4 | 302 | 1122 | 1,473 | | |
| 5 | 306 | 1116 | 1,481 | | |
| 6 | 310 | 1113 | 1,483 | | |
| 7 | 314 | 1102 | 1,494 | | |
| 8 | 318 | 1091 | 1,502 | | |
| 9 | 322 | 1075 | 1,516 | | |
| 10 | 326 | 1062 | 1,524 | | |
| 11 | 330 | 1050 | 1,535 | | |

1) Полупроводниковый образец

| № | T, K | I, мкА | U, В | R, Ом | ln R | $\frac{10^3}{T} \cdot \frac{1}{K}$ |
|----|------|--------|-------|-------|------|------------------------------------|
| 12 | 337 | 1275 | 0,059 | | | |
| 13 | 341 | 1286 | 0,050 | | | |
| 14 | 345 | 1295 | 0,044 | | | |
| 15 | 349 | 1311 | 0,032 | | | |
| 16 | 353 | | 0,0 | | | |
| 17 | 357 | | 0,0 | | | |
| 18 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |
| 11 | | | | | | |

2) Металлический образец

| № | T, K | I, мкА | U, В | R, кОм | t, °C |
|----|------|--------|-------|--------|-------|
| 12 | 337 | 1042 | 1,542 | | |
| 13 | 341 | 1035 | 1,547 | | |
| 14 | 345 | 1029 | 1,551 | | |
| 15 | 349 | 1004 | 1,572 | | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | | | |
| 7 | | | | | |
| 8 | | | | | |
| 9 | | | | | |
| 10 | | | | | |
| 11 | | | | | |

| № | T, K | I, мкА | U, В | R, Ом | ln R | $\frac{10^3}{T} \cdot \frac{1}{K}$ |
|---|------|--------|-------|----------|--------|------------------------------------|
| 1 | 293 | 1058 | 0,241 | 227,7883 | 5,4284 | 3,4130 |
| 2 | 297 | 1080 | 0,211 | 195,3704 | 5,2749 | 3,3670 |
| 3 | 301 | 1116 | 0,188 | 168,4588 | 5,1267 | 3,3223 |
| 4 | 305 | 1148 | 0,161 | 140,2439 | 4,9434 | 3,2787 |
| 5 | 309 | 1171 | 0,140 | 119,5559 | 4,7838 | 3,2362 |
| 6 | 313 | 1194 | 0,123 | 103,0151 | 4,6349 | 3,1949 |
| 7 | 317 | 1213 | 0,108 | 89,0354 | 4,4890 | 3,1546 |

| | | | | | | |
|----|-----|------|-------|---------|--------|--------|
| 8 | 321 | 1231 | 0,095 | 77,1730 | 4,3461 | 3,1153 |
| 9 | 325 | 1245 | 0,082 | 65,8635 | 4,1876 | 3,0769 |
| 10 | 329 | 1257 | 0,072 | 57,2792 | 4,0479 | 3,0395 |
| 11 | 333 | 1269 | 0,063 | 49,6454 | 3,9049 | 3,0030 |
| 12 | 337 | 1275 | 0,059 | 46,2745 | 3,8346 | 2,9674 |
| 13 | 341 | 1286 | 0,050 | 38,8802 | 3,6605 | 2,9326 |
| 14 | 345 | 1295 | 0,044 | 33,9768 | 3,5257 | 2,8986 |

Таблица 1. Таблица экспериментальных значений для полупроводникового образца.

| № | T, K | $I, \mu A$ | U, B | $R, k\Omega$ | $t, ^\circ C$ |
|----|--------|------------|--------|--------------|---------------|
| 1 | 290 | 1165 | 1,445 | 1,2403 | 16,9 |
| 2 | 294 | 1151 | 1,455 | 1,2641 | 20,9 |
| 3 | 298 | 1137 | 1,464 | 1,2876 | 24,9 |
| 4 | 302 | 1122 | 1,473 | 1,3128 | 28,9 |
| 5 | 306 | 1116 | 1,481 | 1,3271 | 32,9 |
| 6 | 310 | 1113 | 1,483 | 1,3324 | 36,9 |
| 7 | 314 | 1102 | 1,494 | 1,3557 | 40,9 |
| 8 | 318 | 1091 | 1,502 | 1,3767 | 44,9 |
| 9 | 322 | 1075 | 1,516 | 1,4102 | 48,9 |
| 10 | 326 | 1062 | 1,524 | 1,4350 | 52,9 |
| 11 | 330 | 1050 | 1,535 | 1,4619 | 56,9 |
| 12 | 334 | 1042 | 1,542 | 1,4798 | 60,9 |
| 13 | 338 | 1035 | 1,547 | 1,4947 | 64,9 |
| 14 | 346 | 1029 | 1,551 | 1,5073 | 72,9 |

Таблица 2. Таблица экспериментальных значений для металлического образца.

6. Обработка результатов.

Заполнили таблицу 1.

По данным таблицы 1 построили график 1.

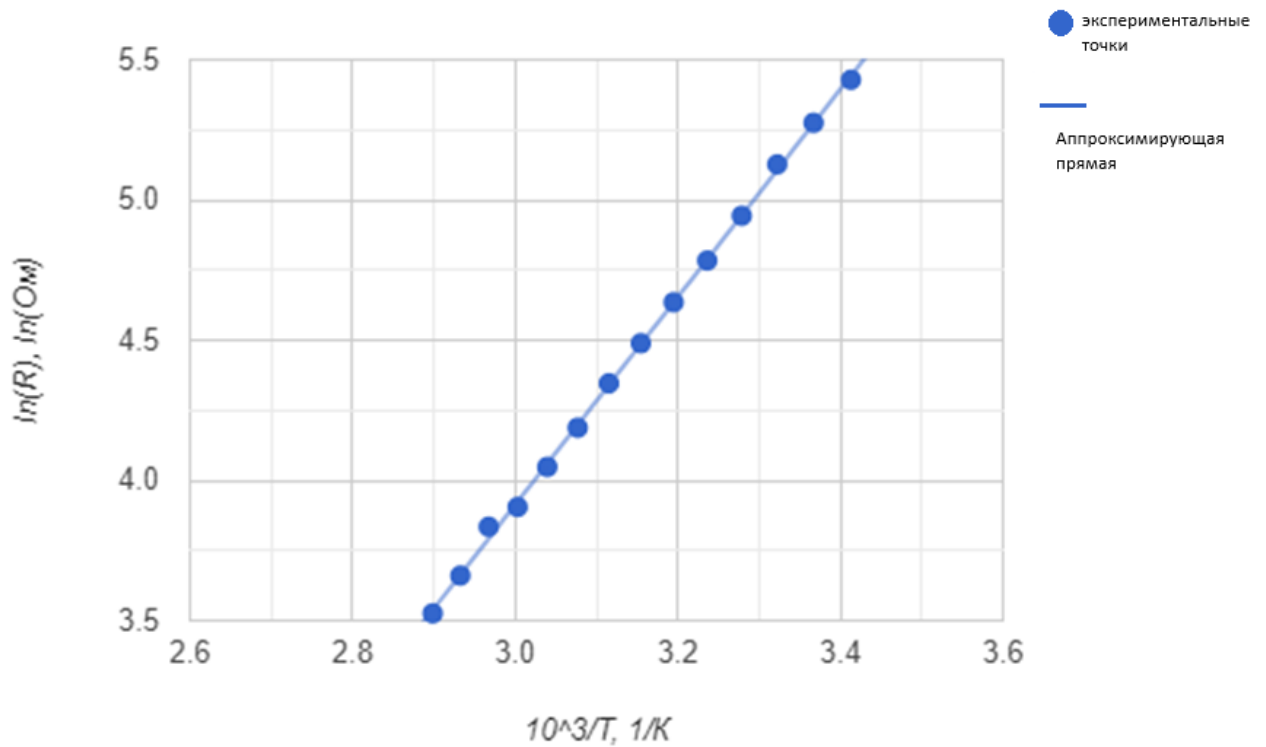


Рисунок 2. График зависимости $\ln(R) = \ln(R) \left(\frac{1}{T} \right)$ для полупроводникового образца.

Качественно оценим линейность полученного графика: аппроксимируем график прямой $ax + b$ и, найдя коэффициенты a и b , посчитаем коэффициент корреляции r и СКО.

$$\varphi_1(x) = 3,704x - 7,1992$$

Формула 1. Линейная аппроксимация графика 1.

Корреляция:

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(\bar{y} - y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 \sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2}} = 0,99967$$

что говорит о сильной линейной зависимости.

СКО:

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_1(x_i) - y_i)^2}{n}} = 0,015 \text{ Ом}$$

Поэтому можно сделать вывод, что график 1 имеет сильную линейную зависимость.

По данным таблицы 2 построили график 2:

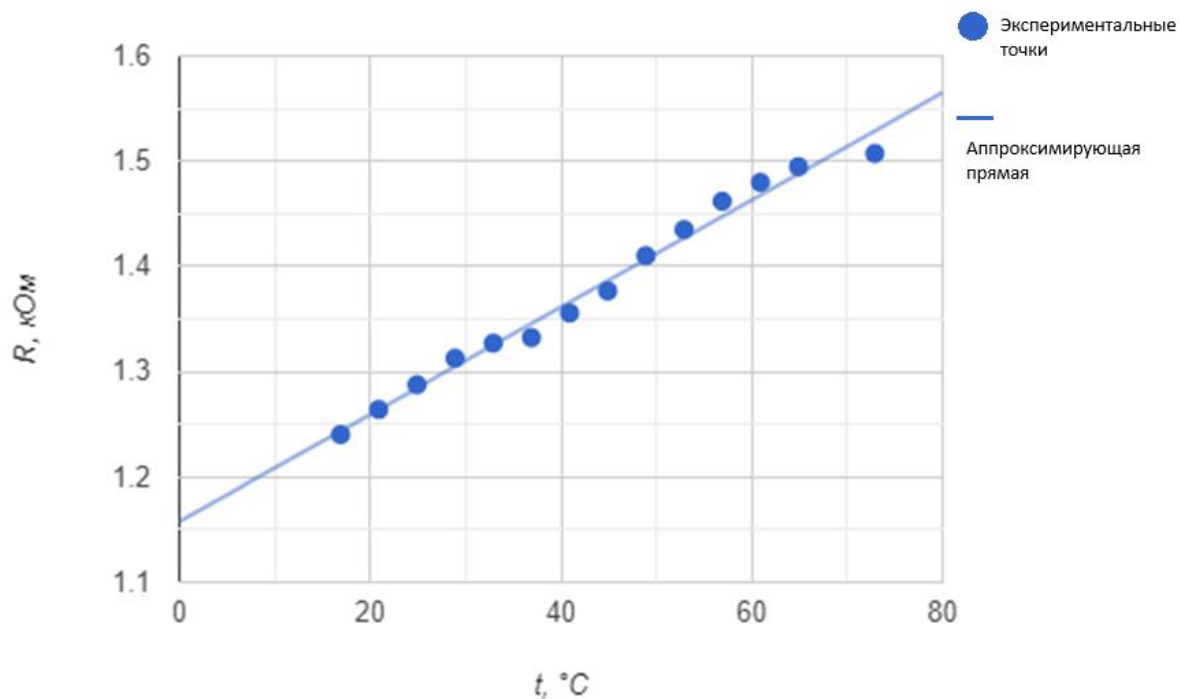


Рисунок 3. График зависимости сопротивления от температуры для металлического образца.

Качественно оценим линейность графика 2:

$$\varphi_2(x) = 0,005092x + 1.158$$

$$r_2 = 0,99308$$

$$\delta_2 = 0,0099 \text{ кОм}$$

Так как СКО находится в рамках погрешности приборов и коэффициент корреляции > 0.9 , можно говорить о сильной линейной зависимости температуры и сопротивления металлического образца.

Построили таблицу 3 для расчёта температурного коэффициента сопротивления металла:

| i | j | $R_i, \text{кОм}$ | $R_j, \text{кОм}$ | $t_i, ^\circ\text{C}$ | $t_j, ^\circ\text{C}$ | $\alpha_{ij}, \frac{10^{-3}}{^\circ\text{C}}$ |
|-----|-----|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| 1 | 8 | 1,2403 | 1,3767 | 16,9 | 44,9 | 4,21 |
| 2 | 9 | 1,2641 | 1,4102 | 20,9 | 48,9 | 4,52 |
| 3 | 10 | 1,2876 | 1,4350 | 24,9 | 52,9 | 4,55 |
| 4 | 11 | 1,3128 | 1,4619 | 28,9 | 56,9 | 4,59 |
| 5 | 12 | 1,3271 | 1,4798 | 32,9 | 60,9 | 4,76 |
| 6 | 13 | 1,3324 | 1,4947 | 36,9 | 64,9 | 5,18 |
| 7 | 14 | 1,3557 | 1,5073 | 40,9 | 72,9 | 4,08 |

Таблица 3. Расчёт значения α_{ij} для всех пар.

Нашли величину среднего значения температурного коэффициента сопротивления:

$$\langle \alpha \rangle = 4,55 \cdot \frac{10^{-3}}{^{\circ}\text{C}}$$

И оценили погрешность с доверительной вероятностью 0,9:

$$\Delta \alpha = t_{0,9,6} \cdot \sqrt{\frac{\sum (\alpha_i - \langle \alpha \rangle)^2}{n(n-1)}} = 0,19 \cdot \frac{10^{-3}}{^{\circ}\text{C}}$$

Результат для температурного коэффициента сопротивления металла:

$$\alpha = (4,55 \pm 0,19) \cdot \frac{10^{-3}}{^{\circ}\text{C}}$$

В этот доверительный интервал попадают два значения из таблицы:

Олово: $4,4 \cdot 10^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$

Вольфрам: $4,5 \cdot 10^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$

Значение ближе у вольфрама, предположим, что образец был из этого металла.

Для вычисления запрещённой зоны полупроводника построили таблицу 4:

| i | j | R_i , Ом | R_j , Ом | t_i , К | t_j , К | E_{gij} , 10^{-20} Дж | E_{gij} , эВ |
|-----|-----|------------|------------|-----------|-----------|---------------------------|----------------|
| 1 | 8 | 227,79 | 77,17 | 293 | 321 | 10,04 | 0,63 |
| 2 | 9 | 195,37 | 65,86 | 297 | 325 | 10,35 | 0,65 |
| 3 | 10 | 168,46 | 57,28 | 301 | 329 | 10,54 | 0,66 |
| 4 | 11 | 140,24 | 49,65 | 305 | 333 | 10,40 | 0,65 |
| 5 | 12 | 119,56 | 46,27 | 309 | 337 | 9,75 | 0,61 |
| 6 | 13 | 103,02 | 38,88 | 313 | 341 | 10,26 | 0,64 |
| 7 | 14 | 89,04 | 33,98 | 317 | 345 | 10,39 | 0,65 |

Таблица 4. Расчёт запрещённой зоны полупроводника для каждой пары.

Нашли среднюю величину для двух размерностей и оценили с доверительной вероятностью 0,9:

$$E_g = (0,639 \pm 0,009) \text{ эВ} = (0,102 \pm 0,006) \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$$

Сравниваем со значениями ширины запрещённых зон полупроводников при температуре 300 К, в наш интервал подходит германий со значением 0,65 эВ.

7. Вывод.

В ходе работы были измерены значения температуры, тока, напряжения и рассчитаны соответствующие значения сопротивления для обоих типов образцов.

Результаты обработки данных показали сильную линейную зависимость между $\ln(R)$ и $1/T$ или $R(T)$ для полупроводника и металла соответственно. Коэффициенты корреляции и СКО подтверждают эту зависимость.

Затем были проведены расчеты температурного коэффициента сопротивления металла и ширины запрещенной зоны полупроводника. Доверительные интервалы с доверительной вероятностью 0,9 позволили сделать вывод о том, что значения, полученные для металлического образца, соответствуют характеристикам вольфрама, а для полупроводника соответствуют германию.

Линейные зависимости, доказанные в расчётах, соответствуют теоретическим данным и зависимостям.

8. Вопросы

1) Снижение сопротивления полупроводника с ростом температуры происходит, потому что электроны получают достаточно энергии для перехода из валентной зоны в зону проводимости, увеличивая тем самым количество носителей заряда, что улучшает проводимость и снижает сопротивление. При росте температуры происходит более значительное увеличение свободных носителей, что приводит к более сильному снижению сопротивления.

2) Подвижность носителей заряда – характеристика способности электронов перемещаться в полупроводнике или проводнике под действием электрического поля. Подвижность обычно уменьшается с ростом температуры, так как более интенсивные колебания частиц ведут к частым столкновениям, что рассеивает электроны и уменьшает тем самым подвижность.

3)

q – заряд (Кл), n – концентрация носителей $[\frac{1}{\text{м}^3}]$

v – скорость упорядоченного движения зарядов $[\frac{\text{м}}{\text{с}}]$

$J = q \cdot n \cdot v$ – плотность тока $[\frac{\text{А}}{\text{м}^2}]$

Причём

$$v = \mu E$$

Где μ – подвижность носителей.

4)

$$\nabla J = -\nabla \sigma \cdot E$$

Где σ – электропроводимость.