

Группа \_\_\_\_\_ Р3224 К работе допущен \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Маликов Г. И. 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. Цель работы.

1. Получить зависимость электрического сопротивления металлического и полупроводникового образцов в диапазоне температур от комнатной до 75 С°
2. Вычислить температурный коэффициент сопротивления металла и ширину запрещённой зоны полупроводника

#### 2. Измерительные приборы.

№ п/п	Наименование	Тип прибора	Используемый диапазон	Погрешность прибора
1	Амперметр	Электронный	1070–2000 мкА	1 мкА
2	Вольтметр	Электронный	11–1766 мВ	1 мВ
3	Термометр	Электронный	300–370 К	1 К

#### 3. Экспериментальная установка

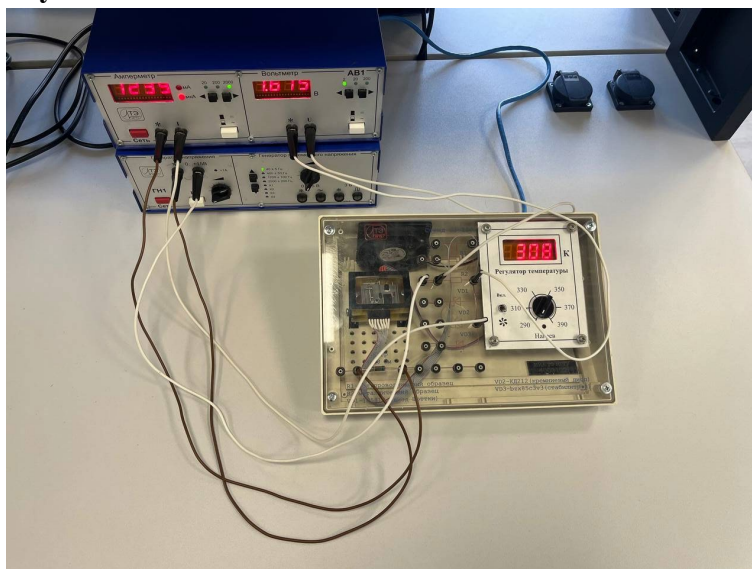


Рисунок 1 - Общий вид лабораторной установки

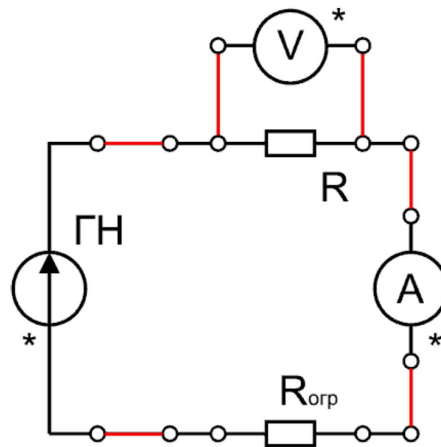


Рисунок 2 - Принципиальная электрическая схема установки

#### 4. Результаты прямых измерений и их обработка.

№	T, K	I, $\mu A$	П/гр. U, B	№	T, K	I, $\mu A$	U, B
3	330	1083	0,040	1	300	1690	0,215
4	335	1055	0,033	2	305	1700	0,199
5	340	1104	0,028	3	310	1808	0,140
6	345	1111	0,024	4	315	1848	0,121
7	350	1117	0,020	5	320	1834	0,102
8	355	1121	0,019	6	325	1818	0,085
9	360	1125	0,015	7	330	1940	0,093
10	365	1128	0,013	8	335	1960	0,062
1	370	1059	0,055	9	340	1978	0,052
2	325	1065	0,050	10	345	1990	0,044
11	370	1130	0,011	11	350	2000	0,037

№	T, K	I, $\mu A$	U, B	R, Ohm	t, °C
1	370	1070	1,766		
2	365	1088	1,741		
3	360	1104	1,727		
4	355	1117	1,716		
5	350	1131	1,705		
6	345	1143	1,694		
7	340	1155	1,684		
8	335	1168	1,674		
9	330	1180	1,664		
10	325	1192	1,654		
11	320	1205	1,643		
12	315	1215	1,632		

① Мамиков  
 ② Кобин | ПИК 2.3 11.04.24

Рисунок 3 - Результаты измерений

№	T, K	I, A	U, B	R, Ом	ln R	$\frac{10^3}{T}, \frac{1}{K}$
1	320	0.001059	0.055	51.936	3.950	3.125
2	325	0.001065	0.05	46.948	3.849	3.077
3	330	0.001083	0.04	36.934	3.609	3.030
4	335	0.001095	0.033	30.137	3.406	2.985
5	340	0.001104	0.028	25.362	3.233	2.941
6	345	0.001111	0.024	21.602	3.073	2.899
7	350	0.001117	0.02	17.905	2.885	2.857
8	355	0.001121	0.017	15.165	2.719	2.817
9	360	0.001125	0.015	13.333	2.590	2.778
10	365	0.001128	0.013	11.525	2.445	2.740
11	370	0.00113	0.011	9.735	2.276	2.703

Таблица 1 - Полупроводниковый образец

№	T, K	I, мкА	U, В	R, Ом	t, °C
1	370	0.00107	1.766	1650.467	96.85
2	365	0.001088	1.741	1600.184	91.85
3	360	0.001104	1.727	1564.312	86.85
4	355	0.001117	1.716	1536.258	81.85
5	350	0.001131	1.705	1507.515	76.85
6	345	0.001143	1.694	1482.065	71.85
7	340	0.001155	1.684	1458.009	66.85
8	335	0.001168	1.674	1433.219	61.85
9	330	0.00118	1.664	1410.169	56.85
10	325	0.001192	1.654	1387.584	51.85
11	320	0.001205	1.643	1363.485	46.85
12	315	0.001219	1.632	1338.802	41.85

Таблица 2 - Металлический образец

Расчет температурного коэффициента сопротивления металла с формулой:

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

i, j	$\alpha_{ij}, C^{-1}$
1, 7	0.006234
2, 8	0.005111
3, 9	0.004595
4, 10	0.004383
5, 11	0.004217
6, 12	0.004193

Таблица 3 - Температурные коэффициенты сопротивления металла

$$\langle \alpha \rangle = 0.004789 \pm 0.00032 \frac{1}{^{\circ}C}$$

Вычислим ширину запрещённой зоны полупроводника:

$$E_{gik} = 2k \frac{T_i T_j}{T_j - T_i} \ln \frac{R_i}{R_j}$$

где  $k$  - Постоянная Больцмана

$$k = 1,380649 * 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \approx 8,61733 * 10^{-5} \frac{\text{эВ}}{\text{К}}$$

i, j	$E_{ij}$ , эВ
1, 6	0.667633
2, 7	0.755917
3, 8	0.718901
4, 9	0.677995
5, 10	0.674808
6, 11	0.701463

$$\langle E \rangle = 0.699453 \pm 0.013724 \text{ эВ}$$

## 5. Расчет погрешностей измерений

Среднеквадратическое отклонение  $\langle \alpha \rangle$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.000320175 \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

Среднеквадратическое отклонение  $\langle E \rangle$ :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.01372447 \text{ эВ}$$

## 6. Графики

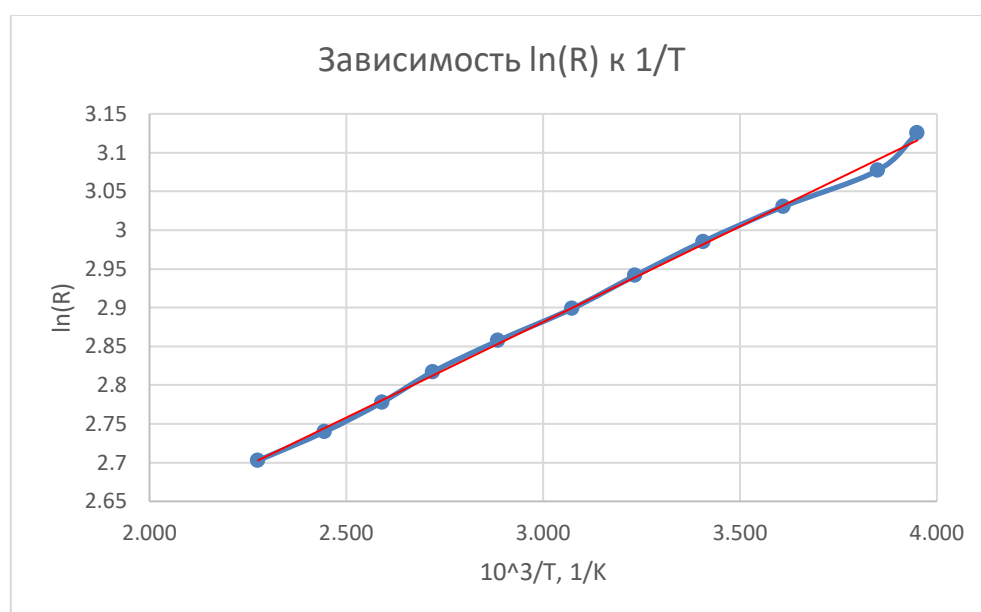


График 1 - Зависимость  $\ln(R)$  к  $1/T$  для полупроводника

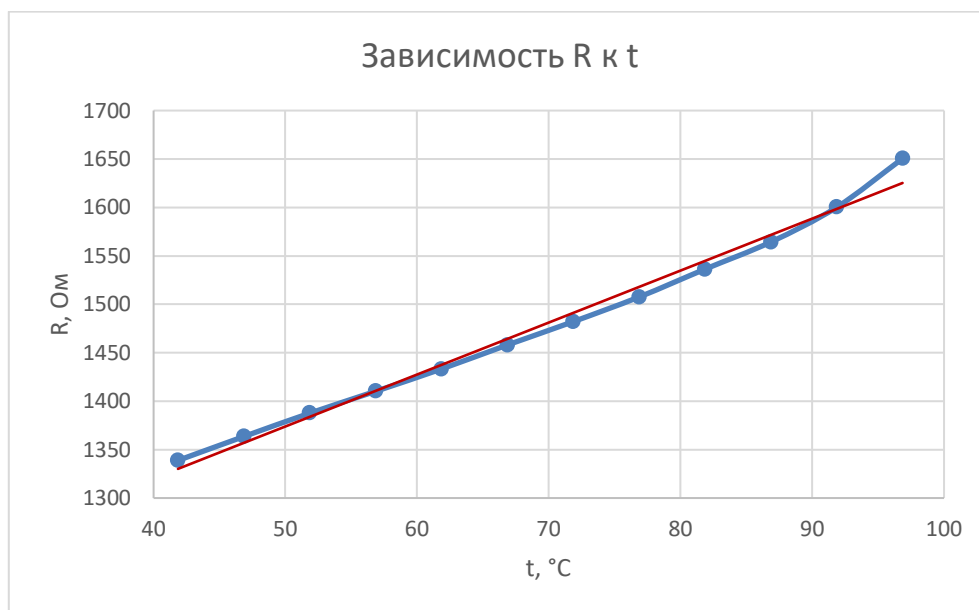


График 2 - Зависимость  $R$  к  $t$  для металла

## 7. Выводы и анализ результатов работы.

В ходе выполнения лабораторной работы была изучена температурная зависимость электрического сопротивления металла и полупроводника. Были получены зависимости логарифма электрического сопротивления полупроводникового образца от величины обратной температуры и прямой зависимости электрического сопротивления металлического образца от температуры. Обе зависимости имеют линейную зависимость, что соответствует теоретическому предположению. Также были вычислены величины температурного коэффициента сопротивления металла  $\langle \alpha \rangle = 0.0048 \pm 0.0003 \frac{1}{^\circ\text{C}}$  (схоже с алюминием) и ширины запрещенной зоны полупроводника  $\langle E \rangle = 0.699 \pm 0.014 \text{ эВ}$  (схоже с германием).

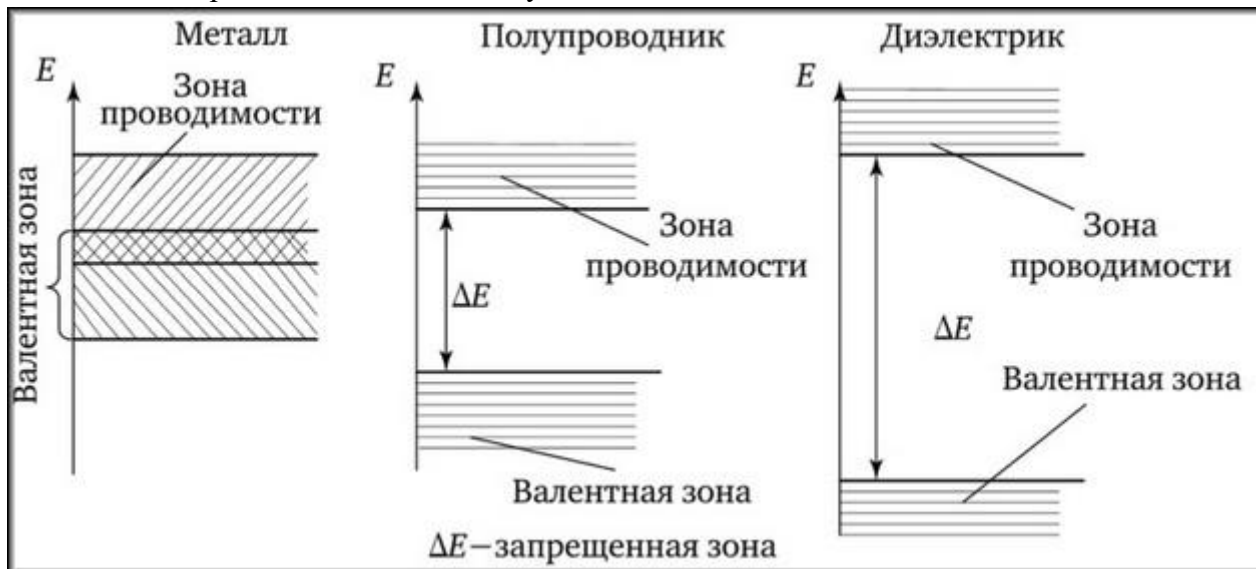
## 8. Вопросы

- 1) Почему у проводника с ростом температуры сопротивление растет?
- 2) Почему у полупроводника с ростом температуры сопротивление падает, причем нелинейно?
- 3) Что такое ширина запрещенной зоны?
- 4) Что такое подвижность носителей, как она зависит от температуры?
- 5) Почему в чистом полупроводнике основными носителями являются электроны, хотя концентрации электронов и дырок одинаковы?
- 6) Для меди, используя табличное значение удельного сопротивления и предполагая, что концентрация свободных электронов вдвое больше концентрации атомов, рассчитать подвижность электронов при  $25^\circ\text{C}$  и найти среднюю скорость электронов при напряженности эл. поля  $1 \text{ В/м}$ .

1. В проводниках, таких как металлы, сопротивление увеличивается с ростом температуры. Это связано с тем, что при повышении температуры увеличиваются тепловые колебания атомов кристаллической решетки, что приводит к **большему числу столкновений движущихся электронов** с ионами. Эти столкновения замедляют движение электронов, увеличивая сопротивление материала.
2. В полупроводниках сопротивление уменьшается с ростом температуры. Это связано с тем, что при повышении температуры увеличивается количество свободных носителей заряда (электронов и дырок), что приводит к увеличению проводимости материала. При **низких температурах полупроводники ведут себя как неметаллы**, их электроны удерживаются внутри атома. Но при повышении температуры, электроны в валентной зоне получают

достаточную энергию, чтобы покинуть пределы своих атомов, становясь свободными. Это приводит к уменьшению сопротивления и увеличению проводимости.

3. Ширина запрещённой зоны — это энергетический интервал между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны, в котором отсутствуют разрешённые состояния для электрона. В металлах она равна нулю, в то время как у полупроводников и диэлектриков она отлична от нуля.



4. Подвижность носителей заряда — это мера того, **насколько быстро электроны** или дырки могут двигаться в материале при приложении внешнего электрического поля. Если **подвижность высока**, электроны или дырки могут двигаться быстрее, и **материал лучше проводит электричество**. Подвижность зависит от температуры, потому что при повышении температуры атомы в материале начинают сильнее колебаться, что затрудняет движение электронов или дырок. Это может привести к уменьшению подвижности с ростом температуры.
5. В чистом полупроводнике, также известном как собственный полупроводник, число свободных электронов и дырок действительно одинаково. Однако, электроны являются основными носителями заряда, потому что они обладают меньшей эффективной массой по сравнению с дырками и могут двигаться быстрее. Это делает электроны более эффективными в проведении электрического тока.
- 6.

Для меди, используя табличное значение удельного сопротивления и предполагая, что концентрация свободных электронов вдвое больше концентрации атомов, рассчитать подвижность электронов при 25 °C и найти среднюю скорость электронов при напряженности электрического поля 1 В/м.

Удельное **сопротивление** меди при 25 °C:  $\rho = 1.68 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{м}$

Концентрация **свободных электронов**:  $n_e = 2 \cdot 8.5 \cdot 10^{28} = 1.7 \cdot 10^{29}$  электронов/м<sup>3</sup>

**Подвижность** электронов  $\mu$ , находится по следующей формуле:

$$\mu = \frac{1}{\rho \cdot n_e \cdot e} = \frac{1}{1.68 \cdot 10^{-8} \cdot 1.7 \cdot 10^{29} \cdot 1.602 \cdot 10^{-19}} \approx 0.002185 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$$

Средняя скорость электронов связана с подвижностью следующим образом:

$$v = \mu E = 0.002185 \cdot 1 = 0.002185 \text{ м/с}$$