

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

**Цель работы:** Исследовать зависимость сопротивления проводников и полупроводников от температуры. Определить величину среднего температурного коэффициента сопротивления проводника и величину энергии активации исследуемого полупроводника.

**Приборы и принадлежности:** исследуемые проводник и полупроводник, латр, термостат с термопарой, миллиамперметр М2044, универсальный вольтметр В7 – 35.

#### Краткая теория

Металлы и электронные полупроводники являются проводниками I рода (протекание тока через эти вещества не сопровождается химическими изменениями в них). Прохождение электрического тока в металлах осуществляется в результате движения свободных электронов под действием приложенной разности потенциалов. Ток в металлах можно вызвать весьма малой разностью потенциалов. Существование свободных электронов в металлах можно объяснить тем, что при образовании кристаллической решетки от атомов металлов "отщепляются" слабее всего связанные валентные электроны, становящиеся "коллективной собственностью" всего куска металла (образуется электронный газ).

Согласно элементарной классической теории металлов (теория Друде) проводимость их  $\sigma$  определяется выражением:

$$\sigma = \frac{ne^2}{2m\nu} \lambda \quad (1)$$

$$\text{или } \sigma = en\mu; \quad \mu = \frac{e\tau}{2m}; \quad \tau = \frac{\lambda}{\nu}$$

где  $n$ ,  $e$ ,  $m$ ,  $\nu$  - концентрация, заряд, масса и скорость свободных электронов;  $\lambda$  - среднее значение длины свободного пробега. ( $\mu$  - подвижность,  $\tau$  - время пробега).

Если бы электроны не сталкивались с ионами кристаллической решетки, величина  $\lambda$ , а следовательно и проводимость  $\sigma$ , были очень большими (практически бесконечными). Однако соударения электронов с ионами, помещающимися в узлах решетки (т.е. рассеяние электронов на ионах) приводит к конечному значению сопротивления  $R$  металлических веществ и к существованию его температурной зависимости.

Классическая теория электропроводности не всегда может объяснить наблюдающиеся у металлов свойства (например, она не объясняет явление сверхпроводимости при низких температурах, явление проводимости в полупроводниках и т.д.). Согласно классической теории электроны проводимости в металлах могут обладать любыми значениями энергии. Однако это не всегда так.

Согласно квантовой теории металлов энергия электронов в кристаллических телах (в частности, в металлах) так же, как и энергия электронов в атоме, квантуется. Она может принимать дискретные значения, называемые уровнями энергии. Дозволенные уровни энергии в кристалле группируются в зоны (зона валентная, зона проводимости). В случае металлов электроны заполняют валентную зону не полностью рис. 1 а). Поэтому достаточно сообщить электронам верхних уровней ничтожную порцию энергии ( $\sim 10^{-23} - 10^{-22}$  эВ) (тепловой, оптической и т.д.), как они смогут перейти на более высокие уровни, смогут ускоряться приложенным к металлу электрическим полем и приобретать ускорение в направлении, противоположном направлению поля (т.е. участвовать в электропроводности).

а) металл б) полупроводник Рис. 1. Схема строения энергетических зон. Таким образом, с точки зрения зонной теории, к металлам относятся вещества с незаполненной валентной зоной или вещества, у которых происходит перекрытие этих обеих энергетических зон.

Если уровни энергии валентной зоны заполнены электронами, а величина запрещенной зоны  $\Delta E_g$  более нуля, то вещества являются полупроводниками (или диэлектриками). Электрическое сопротивление проводников (металлы) возрастает с ростом температуры:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (2)$$

где  $R_0$  и  $R_t$  – значения сопротивления при  $0^\circ\text{C}$  и температуре  $t$ ;  $\alpha$  и  $\beta$  – индивидуальные константы конкретного металла (определяемые из опыта),  $t$  – температура.

Приближенно для сравнительно узкого интервала температур можно считать зависимость сопротивления от температуры линейной.

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \quad (3)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления (может быть определен при измерении сопротивления при двух значениях температуры).

В полупроводниках (строение энергетических зон – рис. 1б) собственная проводимость возникает в результате перехода электронов с верхних уровней валентной зоны в зону проводимости (в случае, если энергия возбуждения более ширины запрещенной зоны  $kT > \Delta E_g$  (при нагреве),  $h\nu > \Delta E_g$  (освещение) и т.д.).

Электропроводность собственных полупроводников растет с

температурой, изменяясь по закону:

$$\begin{aligned}\sigma_e &= \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E_g}{2kT}} \\ \rho_e &= \rho_0 e^{\frac{\Delta E_g}{2kT}}\end{aligned}\quad (4)$$

где  $\sigma_0$  - электропроводность при  $T = \infty$  (что соответствует отрыву от всех атомов валентных электронов). В пределах температур, при которых производятся исследования полупроводников,  $\sigma_0 = \text{const}$ ;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

В примесных полупроводниках возможны два различных процесса электропроводимости (электронный и дырочный). Логарифмируя выражение (4), получим:

$$\begin{aligned}\lg \sigma_e &= \lg \sigma_0 - 0,43 \frac{\Delta E_g}{2kT}; \\ \lg \rho_e &= \lg \rho_0 + 0,43 \frac{\Delta E_g}{2kT};\end{aligned}\quad (5)$$

$$Y = a + bx, \quad Y = \lg \rho, \quad x = \frac{1}{T}, \quad b = 0,43 \frac{\Delta E_g}{2kT}.$$

откуда видно, что  $\lg \sigma \sim 1 / T$  (рис. 2)

Рис.2. Температурная зависимость электропроводности собственного (а) и примесного (б) полупроводников.

По наклону прямой (Рис. 2а) можно определить значение  $\Delta E_g$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = 0,43 \frac{\Delta E_g}{2kT}, \quad \Delta E_g = \frac{2k \operatorname{tg} \alpha}{0,43}\quad (6)$$

Для примесных (n -, p – типа) полупроводников аналогичным образом можно оценить энергию ионизации примесей (донорных и акцепторных, соответственно) (Рис. 2б).

Из полупроводников изготавливают чувствительные терморезисторы (это брусочек материала с омическими контактами на торцах).

Построив зависимость  $\ln R = f(1/T)$  для такого терморезистора, по формуле:

$$\Delta E_g = 2k \frac{T_1 T_2}{(T_1 - T_2)} \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)\quad (7)$$

можно оценить значение ширины запрещенной зоны собственного полупроводника (если терморезистор изготовлен из него) или энергию активации примесей (если полупроводник примесный).

### Порядок выполнения работы.

1. Собрать рабочую схему (рис. 6.1).
2. Подключить исследуемый проводник в схему.
3. С помощью латра, изменяя ток в нагревателе используя таблицу 22.1 "Зависимости температуры вольфрама от тока нагревателя", задать указанную преподавателем температуру, для каждого замера осуществить выдержку нагревания в 50 – 60 с.
4. Измерить через каждые 10 – 15 К величину сопротивления. Замеры провести не менее трех раз. Определить средние значения.
5. По полученным данным построить зависимость  $R = R(T)$  и по формуле

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{RT_2 - RT_1} = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)}$$

определить температурный коэффициент сопротивления металла.

6. Аналогично опыты провести с полупроводником и по полученным значениям построить зависимость  $\ln R = f(1/T)$  и по формуле

$$\Delta E_g = 2k \frac{T_1 T_2}{(T_1 - T_2)} \ln \left( \frac{R_1}{R_2} \right)$$

определить энергию активации (ширину запрещенной зоны) полупроводника.

Рис.6.1а. Принципиальная схема.

Таблица 6.1. Зависимость температуры вольфрама от тока нагревателя.

|                           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Температура вольфрама, °С | 22  | 27  | 34  | 44  | 52  | 76  | 101 | 131 | 191 |
| Ток нагревателя, мА       | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 | 600 | 800 |

Таблица 6.2. Зависимость температуры терморезистора от тока нагревателя.

|                                |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Температура терморезистора, °С | 27  | 34  | 42  | 49  | 57  | 67  | 78  | 97  |
| Ток нагревателя, мА            | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |

Рис. 6.1б. Схема соединений.

Рис. 6.1с. Схема расположения элементов в термостате.

При наличии шести выводов на термостате схема расположения элементов будет иметь вид:

Рис. 6.1е. Схема расположения элементов в термостате (вид снизу).

### **Вопросы.**

1. Как изменяется сопротивление металлов с изменением температуры (и почему)?
2. Как зависит проводимость (и сопротивление) полупроводников от температуры?
3. Что такое ширина запрещенной зоны (энергия активизации) полупроводника? Как ее можно оценить?
4. Какие примеси в полупроводниках называются донорными (акцепторными)?
5. Поясните порядок выполнения работы и ее графического оформления.

### **Литература:**

1. А.Н.Матвеев. Электричество и магнетизм. М., "Высшая школа", 1983г. §§ 1,2,31 стр. 16-28, 226-228.