

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.17\*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Цель работы: измерение температурной зависимости электропроводности металла (медь) и полупроводника (германий) в диапазоне температур 20 –120 °С.

Литература: [2] 3.6, [4] гл. 11 §§ 11.2–11.4, [7] гл.7, §§ 38-40, гл.8 §§ 43-43, [13] гл.VII §§ 99-100, [19] гл.4 §§ 4.2, 4.3.

Измерительная установка содержит два блока: объект исследований и измерительное устройство, выполненные в виде конструктивно законченных изделий, устанавливаемых на лабораторном столе и соединяемых между собой кабелем.

#### ВВЕДЕНИЕ

Электропроводимость металла  $\sigma$  может быть выражена как

$$\sigma = en_e\mu_e, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $n_e$  – концентрация электронов,  $\mu_e$  – подвижность электронов, численно равная дрейфовой скорости электрона в электрическом поле с единичной напряженностью.

Для полупроводников, где, кроме электронов, перенос заряда осуществляют подвижные носители положительного заряда – дырки, формула (1) должна быть дополнена еще одним слагаемым:

$$\sigma = en_e\mu_e + en_p\mu_p, \quad (2)$$

где  $\mu_p$  и  $n_p$  – подвижность и концентрация дырок.

Из соотношений (1) и (2) видно, что температурная зависимость электропроводности различных веществ определяется температурными зависимостями подвижностей и концентраций свободных носителей заряда.

Классическая теория электропроводности не в состоянии объяснить наблюдаемые на опыте зависимости  $\sigma(T)$ . В рамках классической теории неясно также, почему одни кристаллы – хорошие проводники, другие – диэлектрики или полупроводники. Ответы на эти и многие другие вопросы дала квантовая **зонная теория твердых тел**.

При объединении атомов в кристаллическое тело структура энергетических уровней электронов претерпевает важные изменения. Эти изменения почти не затрагивают уровней внутренних, заполненных оболочек. Волновые же функции наружных электронов в существенной мере перекрываются, что приводит к обобществлению этих электронов: они принадлежат не отдельным атомам, а всему кристаллу. Энергетические уровни внешних электронов расщепляются, образуя разрешенные энергетические зоны, разделенные запрещенными зонами. Ширина зон определяется величиной связи между атомами в кристалле и не зависит от числа атомов в кристалле, а количество уровней в зоне равно числу атомов. Таким образом, расстояние между уровнями оказывается столь малым, что говорить о положении отдельных уровней в зоне не имеет смысла. Состояния обобществленных электронов, находящихся на различных уровнях одной и той же зоны, различаются импульсом (или, точнее говоря, квазиимпульсом), а, значит, направлением и скоростью движения.

Проводимость кристаллов определяется распределением электронов по уровням. В *изоляторах* электроны доверху заполняют последнюю из занятых зон (валентную зону). Следующая разрешенная зона (зона проводимости) не содержит электронов. Ширина запрещенной зоны велика по сравнению с характерной тепловой энергией  $kT$ , так что электроны в

обычных условиях не в состоянии ее «перепрыгнуть». В силу симметрии кристалла количество электронов, находящихся в валентной зоне и движущихся в противоположные стороны, одинаково – электрический ток отсутствует. В присутствии электрического поля электроны не могут изменить своего движения, так как нет свободных энергетических состояний в зоне.

В *металле* электроны лишь частично заполняют последнюю из занимаемых зон. В присутствии поля электроны могут занимать свободные состояния, соответствующие получению импульса «против поля», и кристалл проводит ток.

К *полупроводникам* относятся вещества, которые при низких температурах являются изоляторами. Ширина запрещенной зоны  $\Delta E$  в полупроводниках невелика, поэтому уже при обычных температурах тепловое движение перебрасывает часть электронов из валентной зоны в зону проводимости. Электропроводность, связанная с наличием электронов в зоне проводимости, называется электронной, а из-за появления свободных состояний в валентной зоне возникает так называемая дырочная проводимость.

Рассмотрим температурную зависимость **концентрации** свободных носителей заряда  $n$  в металлах и полупроводниках..

В металлах концентрация свободных электронов велика ( $\sim 10^{28} \div 10^{29} \text{ м}^{-3}$ ) и не меняется с температурой.

В чистых полупроводниках, напротив, концентрация свободных носителей заряда сильно зависит от температуры. При  $T=0$  валентная зона полностью заполнена электронами, а зона проводимости пуста. Если повысить температуру кристалла, то в равных количествах возникнут электроны проводимости и дырки, концентрация которых в чистом полупроводнике определяется вероятностью такого перехода:

$$n_e = n_p \approx n_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $n_0$  – некоторая постоянная. В этом случае говорят о *собственной проводимости* полупроводника.

Из выражения (3) видно, что концентрация собственных электронов и дырок  $n_e$  и  $n_p$  стремится к нулю при убывании температуры. Однако концентрация носителей не падает до нуля, поскольку в любом полупроводнике есть примеси, которые являются поставщиками электронов (в материале  $n$ -типа проводимости) или дырок (в материале  $p$ -типа). Так как энергия ионизации примесей  $\Delta E_{пр} \approx 10^{-2} \Delta E$ , то при температурах, когда  $n_e = n_p \rightarrow 0$ , примеси полностью ионизованы. Это так называемая “область истощения примесей” – диапазон температур, в котором не меняется концентрация носителей тока, полученных за счет ионизации примесей.



Рис. 5.17.1

На рисунке 5.17.1 пунктирной кривой показана температурная зависимость концентрации электронов проводимости в полупроводниках. Диапазон температур  $T_2 - T_1$  соответствует области истощения примесей ( $kT_1 \geq \Delta E_{пр}$ ).

**Подвижность** носителей заряда в кристаллических твердых телах связана с рассеянием их на дефектах (отклонениях от идеальности) кристаллической решетки. Мы рассмотрим один вид таких дефектов: тепловые колебания ионов около положения равновесия при  $T > 0$ . При тепловом колебательном движении ион периодически смещается от положения равновесия, вызывая рассеяние носителей заряда. Чем больше средняя энергия колебания ( $\sim kT$ ), тем больше амплитуда колебаний атомов

в узлах кристаллической решетки и тем меньше подвижность, т.е. с повышением температуры подвижность падает. Строгий расчет показывает, что

$$\mu \sim T^{-\alpha}, \quad (4)$$

При этом для металлов  $\alpha \approx 1$ , а для полупроводников  $\alpha \approx 3/2$ .

Проанализировав температурные зависимости концентрации и подвижности, мы можем сделать некоторые предварительные заключения о температурной зависимости проводимости металлов и полупроводников.

В металлах концентрация носителей неизменна ( $n = const$ ), и поэтому температурная зависимость проводимости определяется только подвижностью электронов. С повышением температуры проводимость металлов падает, а сопротивление увеличивается. Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  от температуры характеризуют *температурным коэффициентом сопротивления* данного металла:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}.$$

Вообще говоря, температурный коэффициент сопротивления данного металла различен при разных температурах. Однако изменение  $\alpha$  с температурой не очень велико, поэтому в не слишком широком диапазоне температур его можно считать постоянным, а зависимость  $\rho$  от температуры – линейной:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (5)$$

где  $\rho_0$  - удельное сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ,  $t$  - температура по шкале Цельсия.

В полупроводниках с температурой меняются и концентрация и подвижность свободных носителей заряда. При достаточно низких температурах, в области истощения примесей ( $n=const$ ), электропроводность  $\sigma(T)$  пропорциональна  $\mu(T)$ , поэтому, как и у

металлов, с повышением температуры проводимость падает, а сопротивление растёт.

При достаточно высоких температурах ( $T > T_2$ ) в области собственной проводимости

$$\sigma = en_e\mu_e + en_p\mu_p = e(\mu_p + \mu_e)n_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right); \quad (6)$$

так как  $\mu_e$  и  $\mu_p$  слабо (по сравнению с экспонентой) зависят от температуры, то (6) можно приближенно записать:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (7)$$

где  $\sigma_0 = e(\mu_e + \mu_p)n_0$ .

Температурные зависимости проводимости полупроводников и металлов представлены на рисунке 5.17.1 сплошной кривой.

Ширину запрещенной зоны полупроводника можно определить по зависимости его сопротивления  $R$  от температуры. Так как  $R = l/(\sigma S)$ , где  $l$  - длина образца,  $S$  - площадь его поперечного сечения, то из (7) следует, что в области собственной проводимости

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right),$$

или

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2kT} \quad (8).$$

В данной работе исследование сопротивления полупроводника производится при  $T \geq T_2$ . В зависимости от чистоты образца и температуры примесная проводимость может вносить больший или меньший вклад. Она искажает температурный ход собственной проводимости. *Чтобы правильно определить ширину запрещенной зоны, надо проделать измерения в широком диапазоне температур и выбрать участок, где зависимость сопротивления от  $1/T$  имеет экспоненциальный характер.*

Для определения ширины запрещенной зоны строится график зависимость  $\ln R$  от  $1/T$ . Согласно формуле (8), в области собственной проводимости график должен иметь вид прямой линии, тангенс угла наклона которой равен  $\frac{\Delta E}{2k}$ , откуда

$$\Delta E = 2k \cdot \operatorname{tg} \alpha . \quad (9)$$

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка позволяет измерять сопротивления образцов и их температуру в процессе нагревания и охлаждения.



В сборном корпусе 1 объекта исследования установлены: электропечь с размещенными внутри образцами, температурный датчик (термометр сопротивления), вентилятор для охлаждения образцов и источники питания электропечи и вентилятора. Электропечь служит для нагрева образцов до максимальной температуры  $120^{\circ}\text{C}$  в течение 15 – 20 минут. Вентилятор служит для ускорения охлаждения образцов. На передней панели корпуса 2 размещены органы управления и индикации.

Положениям переключателя ОБРАЗЕЦ соответствует подключение следующих образцов:

«1» – металл (медь);

«2» – сплав с низким температурным коэффициентом сопротивления (манганин или константан);

«3» – полупроводник (полупроводниковый терморезистор);

«0» – измерительный вход устройства закорочен.

На передней панели измерительного устройства 2 размещены кнопки НАГРЕВ и ВЕНТ для включения и выключения (путем повторного нажатия) электропечи и вентилятора. Индикаторы Ом и °С указывают значения сопротивления и температуры образцов в процессе работы.

С помощью кнопки СТОП ИНД можно остановить индикацию значений температуры и сопротивления. При включении режима остановки показания на этих индикаторах фиксируются в том состоянии, в котором они находились при нажатии кнопки, при этом режим работы установки не меняется. При повторном нажатии на индикаторах снова отображаются текущие значения измеряемых величин.

## **ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ**

Подключите сетевые шнуры измерительного устройства и объекта исследования к сети и включите установку выключателями СЕТЬ на задней панели измерительного устройства и передней панели объекта. Дайте установке прогреться в течение 5 минут.

**Задание 1. Измерение температурного коэффициента сопротивления металла.**

Переключатель ОБРАЗЕЦ установите в положение «1»: металл.

Нажмите кнопку НАГРЕВ на передней панели измерительного устройства. Наблюдая за индикаторами температуры (°С) и сопротивления, измеряйте зависимость  $R(t)$  через каждые 5 °С в диапазоне от комнатной температуры до 120 °С. (При нагревании до 125 °С срабатывает защита: автоматически выключается нагреватель и включается вентилятор.) При

достижении максимальной температуры  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  выключите нагреватель, нажав кнопку НАГРЕВ, и включите вентилятор для охлаждения образца кнопкой ВЕНТ. Продолжая наблюдать за индикаторами, снимите зависимость  $R(t)$  при охлаждении образца. Результаты измерений представьте в виде таблиц.

Небольшое несоответствие значений сопротивлений при одних и тех же температурах при измерении их в режиме нагрева и охлаждения объясняется различной тепловой инерционностью температурного датчика и образцов.

Постройте на одном графике зависимости  $R(t)$ , полученные при нагревании и охлаждении. Путем экстраполяции определите значение сопротивления  $R_0$  при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По наклону графиков и значению  $R_0$  рассчитайте температурный коэффициент сопротивления металла.

Оцените погрешность полученного результата.

**Задание 2. Вычисление ширины запрещенной зоны полупроводника.**

Переключатель ОБРАЗЕЦ установите в положение «3»: полупроводник.

Проведите измерения  $R(t)$  при нагревании и охлаждении так же, как в задании 1.

**По окончании измерений установите переключатель ОБРАЗЕЦ в положение «0» и отключите питание установки.**

Постройте график зависимости  $R(t)$ .

Постройте график  $\ln R = f(1/T)$  и по наклону его прямолинейной части (при более высоких температурах) рассчитайте ширину  $\Delta E$  запрещенной зоны исследуемого полупроводника в электронвольтах.

Оцените погрешность полученного результата.

## ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Какова температурная зависимость удельного сопротивления полупроводников и металлов?
2. В чем различие энергетического спектра состояний электронов в полупроводниках и диэлектриках?
3. Какова температурная зависимость подвижности свободных носителей заряда в металлах и полупроводниках? Концентрация свободных носителей?
4. Каковы особенности собственной и примесной проводимости полупроводников?
5. Какой статистикой описываются состояния электронов в металле? Что такое энергия Ферми? Рассчитайте энергию Ферми для меди, приняв число свободных электронов равным числу атомов.
6. Что такое вырожденный электронный газ? Является ли электронный газ при комнатной температуре вырожденным в металле? в полупроводнике?