

Лабораторная работа № 4
Исследование температурной зависимости
электропроводности металлов и полупроводников

Цель работы:

Освоить мостовой метод измерения сопротивлений; используя этот метод, изучить зависимость электропроводности металла и полупроводника от температуры.

Зависимость удельного сопротивления r металлов от температуры t° в достаточно широком интервале температур имеет линейный характер.

$$r = r_0(1 + a \cdot t^\circ),$$

где r_0 - удельное сопротивление проводника при 0°C ; a - температурный коэффициент сопротивления (для металлов $a > 0$).

Правильное истолкование указанной зависимости может быть дано только на основе квантовой теории металлов. Согласно этой теории, скорость свободных электронов при нагревании проводника почти не изменяется. Но при этом заметно возрастает амплитуда колебаний ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки. Вследствие чего увеличивается рассеяние свободных электронов на ионах, а их длина свободного пробега уменьшается. По этой причине сопротивление металлов возрастает.

Удельная проводимость полупроводника

$$\gamma = e(n_+ b_+ + n_- b_-),$$

где e - заряд электрона,

n_+ - объемная концентрация дырок в полупроводнике;

n_- - объемная концентрация электронов в полупроводнике;

b_+ - подвижность дырок;

b_- - подвижность электронов.

Концентрация и подвижность носителей тока зависит от температуры. Однако, концентрация носителей тока зависит от температуры значительно сильнее, чем их подвижность. Это при-

водит к тому, что удельная проводимость каждого типа проводника зависит от температуры по закону

$$\gamma = \gamma_0 \mathbf{l}^{-\frac{\Delta E}{2kT}},$$

где ΔE - энергия, необходимая для перевода электрона полупроводника из нормального состояния в свободное (энергия активации);

k - постоянная Больцмана;

γ_0 - соответствует значению удельной проводимости при $T \rightarrow \infty$.

Следовательно, при повышении температуры удельная проводимость полупроводников растет по экспоненциальному закону, а сопротивление уменьшается.

Электрические свойства полупроводников чрезвычайно чувствительны к изменению химического состава. Посторонние включения или избыточные атомы вещества являются источниками свободных зарядов, при чем энергия активации ΔE_2 для них часто значительно меньше, чем ΔE_1 . При низких температурах число электронов примеси гораздо больше, чем число электронов, поставляемых атомами решетки. Результирующая удельная проводимость примесного полупроводника может быть представлена в виде суммы двух слагаемых, соответствующих собственной и примесной проводимости, т.е.

$$\gamma = \gamma_0 \mathbf{l}^{-\frac{\Delta E_1}{2kT}} + \gamma_0 \mathbf{l}^{-\frac{\Delta E_2}{2kT}} \quad (1)$$

Для более наглядного изображения хода зависимости $\gamma(T)$ строят график, откладывая по оси абсцисс $\ln \gamma$, а по оси ординат - $\frac{1}{T}$. Прологарифмировав (1), получим

$$\ln \gamma = \ln \gamma_0 \left(-\frac{\Delta E_1}{2k} \cdot \frac{1}{T} \right) + \ln \gamma_0 \left(-\frac{\Delta E_2}{2k} \cdot \frac{1}{T} \right) \quad (2)$$

Графиком уравнения (2) является кривая 1 (рис. 1), имеющая точку перегиба C , которой соответствует при некоторой температуре изменение характера проводимости полупроводника.

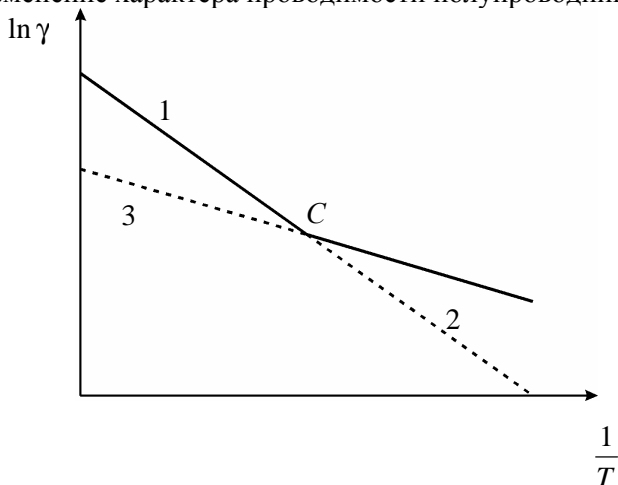


Рис.1.

При температуре $T > T_C$, кривая 1 почти полностью совпадает с прямой 2, изображающей первое слагаемое в (1); при $T < T_C$ кривая совпадает с прямой 3, соответствующей примесной проводимости.

В данной работе в качестве полупроводника используется термистор, проводимость которого сильно зависит от температуры. Термисторы изготавливают из поликристаллических полупроводниковых материалов: смеси TiO_2 и MgO , окислов Cu , Co и Ni , Fe_2O_3 с $MgAlO_4$, $MgCr_2O_4$ и др. Они широко применяются в качестве чувствительных датчиков различных тепловых эффектов.

Для измерения сопротивления медной проволоки и термистора при различных температурах в работе применен метод моста постоянного тока. Простейшим мостом является мост Уитстона.

УПРАЖНЕНИЕ 1

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТА УИТСТОНА

Мост Уитстона состоит из четырех сопротивлений, соединенных в замкнутый четырехугольный контур (рис 2). В одну диагональ такого контура (она называется измерительной) включает-ся гальванометр G , а в другую – источник тока \mathcal{E} .

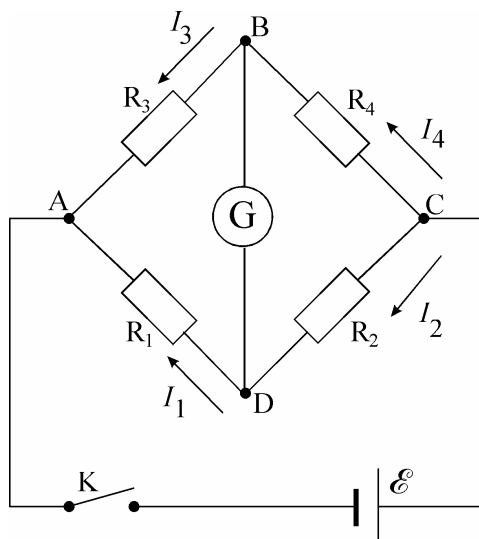


Рис. 2.

При произвольных сопротивлениях R_1 , R_2 , R_3 , R_4 в диагонали, содержащей чувствительный гальванометр G , будет протекать некоторый ток, вызывающий отклонения стрелки гальванометра в ту или иную сторону. Однако указанные сопротивления можно подобрать так, что ток в цепи гальванометра будет отсутствовать. Пусть в плечах AD , DC , AB , BC моста Уитстона текут токи I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , а потенциалы точек A , B , C , D соответственно будут j_A , j_B , j_C , j_D . Если $j_B = j_D$, то в диагонали BD тока не будет и в этом случае

$$I_1 = I_2 \text{ и } I_3 = I_4.$$

$$\text{Отсюда } \frac{I_1}{I_3} = \frac{I_2}{I_4} \quad (3)$$

Согласно закону Ома для участка цепи

$$I_1 = \frac{U_{AD}}{R_1} = \frac{j_A - j_D}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_{AC}}{R_2} = \frac{j_A - j_C}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{R_3} = \frac{j_A - j_B}{R_3}, \quad I_4 = \frac{U_{BC}}{R_4} = \frac{j_B - j_C}{R_4} \quad (4)$$

где U_{AB} , U_{BC} , U_{AD} , U_{DC} - падения напряжения на участках AB , BC , AD и DC .

Подставив в (3) значения токов (4), с учетом $j_B = j_D$ получим $\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$ (5).

Следовательно, пользуясь мостом Уитстона, по известным трем сопротивлениям можно определить неизвестное четвертое, если мост уравновешен.

На практике обычно сопротивления R_1 и R_2 заменяют реохордом. Реохорд представляет собой калиброванную проволоку с большим удельным сопротивлением, натянутую между двумя клеммами, по которой может скользить контакт D.

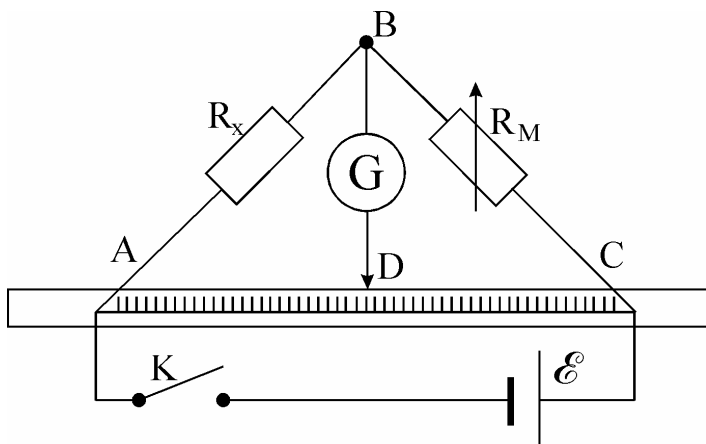


Рис. 3

Если собрать схему (рис. 3), состоящую из реохорда AC , неизвестного сопротивления R_x и магазина сопротивления R_M , то нахождение условия равновесия моста значительно упрощается: необходимо только передвигать контакт до тех пор, пока стрелка гальванометра при включенном источнике тока не установится в нулевом положении.

Поскольку $R = r \frac{l}{S}$ (r и S - одни и те же по всей длине реохорда), то $\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}$, где l_1 и l_2 - части длины проволоки реохорда, на которые ее делит контакт D в данном положении. Тогда формула (5) при $R_3 = R_x$, $R_4 = R_M$ примет вид

$$\frac{R_x}{R_M} = \frac{l_1}{l_2} \quad \text{или} \quad R_x = R_M \frac{l_1}{l_2} \quad (6)$$

Формулой (6) пользуются для вычисления неизвестного сопротивления по методу моста Уитстона. Следует помнить, что наиболее точное измерение сопротивления моста Уитстона достигается при условии, если величина измеряемого сопротивления не превышает сопротивления реохорда в 100 раз, если длины плеч реохорда l_1 и l_2 мало отличаются друг от друга.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Соберите цепь согласно рис. 3. В качестве сопротивления R_x включите одно из предложенных сопротивлений; после проверки преподавателем собранной схемы, приступите к измерениям.

2. Установите подвижный контакт D посередине реохорда, длина реохорда 1 м, и подберите сопротивление R_M магазина так, чтобы ток в цепи гальванометра исчез.

3. Изменяя дважды плечи реохорда l_1 и l_2 в пределах не более 10 см каждое, опять уравновесьте мост.

4. Аналогично выполните измерения второго сопротивления, а также их общее сопротивление при последовательном R' и параллельном соединении R'' .

5. По данным l_1 , l_2 и R_M рассчитайте по формуле (6) сопротивление R_x для рассмотренных случаев.

Все результаты измерений и расчетов занесите в таблицу 1

6. Используя средние значения R_x двух резисторов рассчитайте по соответствующим формулам их общее сопротивление при последовательном и параллельном соединении. Сравните данные расчетов с результатами измерений.

Таблица 1.

Измеряемое сопротивление	№ измерений	l_1 , мм	l_2 , мм	R_M , Ом	R_x , Ом	R_{xcp} , Ом
R_1	1					
	2					
	3					
R_2	1					
	2					
	3					
R'	1					
	2					
	3					
R''	1					
	2					
	3					

где R' - последовательное соединение резисторов; R'' - параллельное соединение резисторов

УПРАЖНЕНИЕ 2.

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ячейка с двумя образцами – металл и полупроводник – и хромель-копелевой термопарой помещается в нагревательную печь. Температура образцов измеряется термопарой, подключенной к миллиамперметру, Миллиамперметр показывает ток термопары. Зная ток термопары, по градуировочному графику определяется соответствующая температура в градусах Цельсия. Градуировочный график термопары прилагается к работе. Сопротивления полупроводникового образца и металла измеряются универсальным измерителем L, C, R .

1. Электрическая цепь состоит (рис. 4) из $НП$ нагревательная печь, $ТП$ - термопара, R и R_{II} - проволочное сопротивление и полупроводник соответственно, $E7-11$ - измеритель L, C, R универсальный, $M95$ - миллиамперметр.

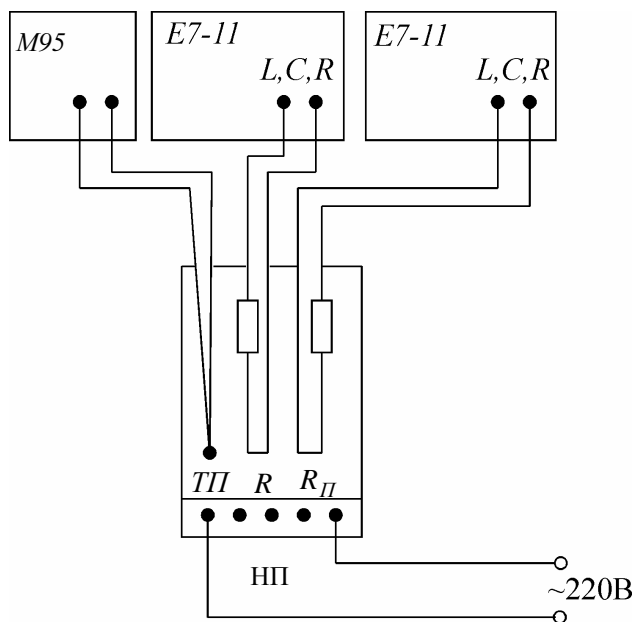


Рис. 4.

2. Измерить сопротивление полупроводника и металла при комнатной температуре для чего:

а) Проверить подсоединение измеряемых объектов к зажимам соединительного кабеля L, C, R ;

б) Переключатель " $L, C, R_{\sim}, R_{=}$ " установить в положение " R_{\sim} ", переключатель "*Частота* Hz" - в положение "100";

в) Переключатель "*Пределы*" поставить в крайнее левое положение (первый предел);

г) Ручку "*Чувствительность*" установить в крайнее правое положение;

д) Выбрать нужный предел измерения. Для этого вращением ручки "*Пределы*" поочередно меняйте установленный предел до тех пор, пока знак напряжения разбаланса на индикаторе баланса не изменится на противоположный. Это будет нужный для измерений предел;

е) Уравновесить мост вращением ручек "*Множитель*", постепенно увеличивая чувствительность до величины, обеспечивающей индикацию разбаланса на $1/2$ погрешности измерения для данной величины;

ж) Измеренная величина сопротивления равна произведению отсчета по шкале "*Множитель*" на значение сопротивления, соответствующее выбранному пределу и указанное в таблице на передней панели прибора.

Примечание. Отсчетное устройство "*Множитель*" имеет две шкалы. Показания одной шкалы меняются ступеньками, другой – плавно. Показания обеих шкал образуют единый строчечный цифровой отсчет. Отсчет, изображенный на рис. 5, должен быть прочтен как 0,275.

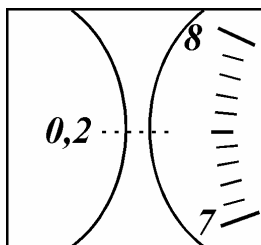


Рис. 5

Если показания на плавной шкале больше или равно 10, то это означает, что единица должна быть перенесена (добавлена) в предыдущий раздел отсчета.

3. Включить печь в сеть переменного тока для нагрева образцов. Измерять сопротивления образца, желательно через каждые четыре деления шкалы миллиамперметр. Нагрев образцов довести до температуры 100°C . Результаты занести в таблицу 2.

4. Выключить нагревательную печь, и по мере охлаждения ее, измерить сопротивление полупроводника при тех же значениях температуры в обратном направлении. Результаты занести в таблицу 2.

5. Найти средние значения сопротивления и проводимости $G = \frac{1}{R_n}$ полупроводника. Результат всех расчетов занести в таблицу 2.

Таблица 2. Зависимость сопротивления металла и полупроводника от температуры.

$R_{\text{металл}}$ Ом	R_n , Ом		n , дел.	$t^{\circ}\text{C}$	T, K	$R_{n, \text{ср}}$, Ом	$G_{\text{ср}}$, Ом $^{-1}$	$\frac{1}{T}, \text{K}^{-1}$
	на- грев	охл.						

6. Построить графики зависимости сопротивления металла и полупроводника от температуры $R = f(t^{\circ})$. По графику опреде-

лить начальное сопротивление металла R_0 при 0°C . Рассчитать температурный коэффициент сопротивления α по формуле $\alpha = \frac{k}{R_0}$, где k - угловой коэффициент графика.

7. Построить график зависимости $\ln G = f\left(\frac{1}{T}\right)$, откладывая по оси ординат $\ln G$, а по оси абсцисс $\frac{1}{T}$.

8. На основании графика зависимости $\ln G = f\left(\frac{1}{T}\right)$ определить энергию активации полупроводника в электрон-вольтах, используя метод, описанный в п. 6.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. В чем состоит сущность мостового метода измерения сопротивлений?

2. Выведите условия равновесия моста Уитстона.

3. Каким сопротивлением должен обладать реохорд, чтобы чувствительность мостовой схемы была высокой?

4. Выведите формулы для расчета участка цепи, состоящего из параллельно и последовательно включенных сопротивлений.

5. Почему сопротивление металлов увеличивается с увеличением температуры?

6. Что называется температурным коэффициентом сопротивления и в каких единицах он измеряется?

7. Проанализируйте экспериментально полученные графики зависимости $R = f(t^\circ)$.

8. Как зависит удельная проводимость полупроводников от температуры и почему?

9. Как влияют примеси на проводимость полупроводников?

10. Проанализируйте экспериментально полученный график зависимости $\ln G = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

Литература

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. учеб. пособие для втузов- М. : Астрель : АСТ, 2003.- 336с
2. А.Н. Матвеев. Электричество и магнетизм. Учеб. пособие для студ. вузов.- М. : ОНИКС 21 век: Мир и Образование , 2005.- 463с
3. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Электричество. : учеб. пособие для студ. физических спец. вузов- 4-е изд., стереотип.- М. : Физматлит: МФТИ , 2002.- 656с.
4. И.Е. Иродов. Электромагнетизм. Основные законы. М., ЛБЗ, 2001.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество. М. : Наука , 1985.- 576с.
2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, вып. 5,6. Электричество и магнетизм. М., Мир, 1966.