

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 69

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЗЕЕБЕКА (ЯВЛЕНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТЕРМО-ЭДС)

1. Цель работы

Целью настоящей работы является изучение физики эффекта Зеебека, градуировки термоэлектрического преобразователя, измерение величины термо-ЭДС.

2. Краткая теория

В 1881 г. Зеебек обнаружил, что если спаи разнородных металлов А и В, образуют замкнутую цепь (рис. 3), имеют неодинаковую температуру, в цепи течет электрический ток. Изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления тока. Возникающая взаимосвязь между тепловыми и электрическими процессами в металлах и полупроводниках обуславливает явления, которые называются *термоэлектрическими*.

Термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС) вызвана тремя причинами: 1) зависимостью уровня Ферми от температуры; 2) диффузией электронов (или дырок) и 3) увлечение электронов фононами.

Рассмотрим первую причину. На рис. 1 схематично представлены энергетические уровни зоны проводимости металла, вписанные в

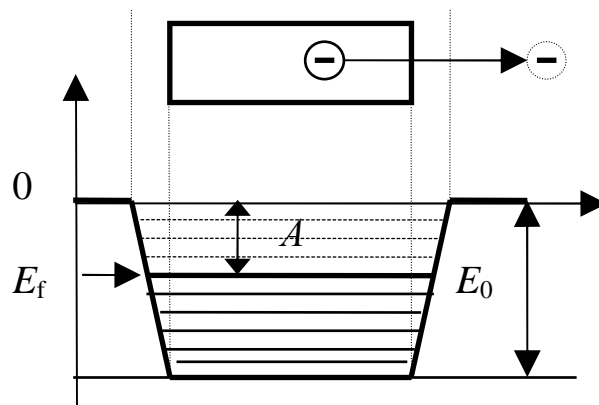


Рис. 1. Диаграмма зоны проводимости металлов

потенциальную яму (пунктиром обозначены незанятые уровни).

За начало отсчета энергии выбрана потенциальная энергия электрона в вакууме. Как видно из рис. 1, для удаления разных электронов за пределы металла нужно совершить различную работу. Так, для того, чтобы удалить электрон, находящийся на самом нижнем уровне зоны проводимости, необходимо совершить работу, равную величине энергии E_0 , а для удаления электрона, находящегося на уровне Ферми, достаточна работа:

$$A = e \cdot \varphi = -E_f. \quad (1)$$

Наименьшая энергия A , которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы удалить его из твердого или жидкого тела в вакуум, называется *работой выхода*. Величина φ носит название *контактного потенциала* данного металла. Для различных металлов контактный потенциал меняется в пределах от 1 до 10 В. При других температурах работу выхода также определяют как разность глубины потенциальной ямы и уровня Ферми. Это же определение применяется и для полупроводников.

Приведем два разных металла в соприкосновение. До их контакта потенциал в воздухе между металлами был одинаков (рис. 2). При соприкосновении металлов часть электронов из 1-го металла, где верхние заполненные уровни имеют энергию больше, чем во 2-ом, переходят на более низкие свободные уровни второго металла. В результате потери части электронов первый металл заряжается положительно относительно второго, его потенциал возрастает, а потенциальная энергия электронов в нем уменьшается. Наоборот, второй металл, приобретший эти электроны, заряжается отрицательно, и потенциальная энергия его электронов возрастает. Зонная схема уровней 1-го металла начинает смещаться вниз, 2-го - вверх. Этот переход продолжается до тех пор, пока уровни Ферми в обоих контактируемых металлах не сравняются. После этого установится динамическое равновесие, при котором электроны в одинаковом количестве диффундируют через контакт в ту и другую сторону. Возникшая между металлами разность потенциалов носит название *контактной разности потенциалов* U_{12}^1 , которая, равна разности контактных потенциалов этих металлов или разности работ выхода для второго и первого металлов, деленной на заряд электрона.

$$U_{12}^1 = (A_2 - A_1) / e = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (2)$$

Как показано на рис. 2, величина U_{12}^1 есть разность потенциалов между поверхностями обоих металлов в окружающем их пространстве.

Поэтому ее называют *внешней контактной разностью потенциалов*. Часто, говоря о контактной разности потенциалов, подразумевают под ней именно внешнюю.

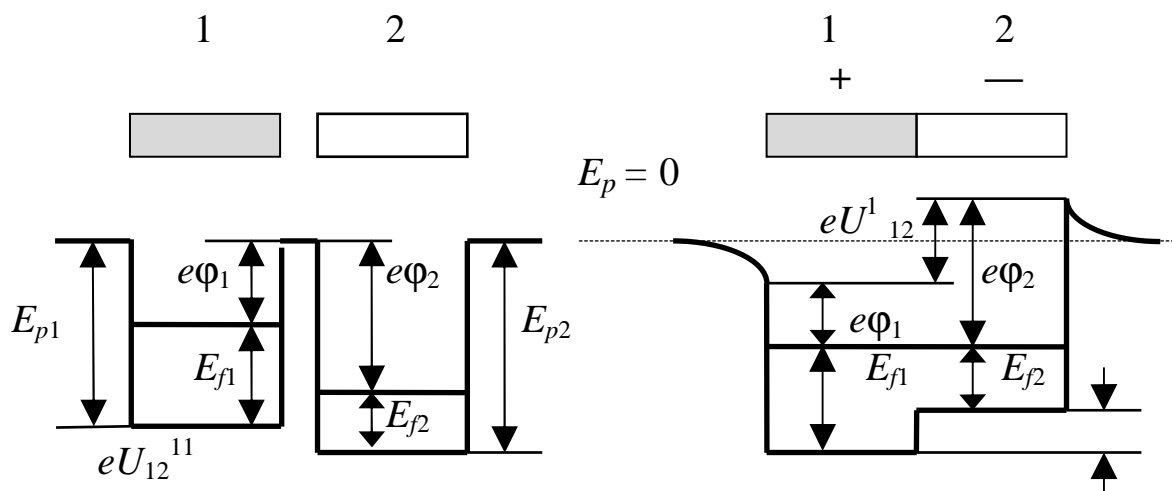


Рис. 2. Зонные диаграммы до и после соприкосновения металлов

Необходимо подчеркнуть, что совмещение уровней Ферми означает равенство общей энергии электронов в металлах, состоящей из кинетической и потенциальной. При образовании контакта изменяется только потенциальная энергия, а кинетическая остается прежней и неодинаковой, если она была неодинакова до образования контакта. Разница в кинетических энергиях электронов в металлах приводит к тому, что электроны с большей кинетической энергией переходят через контакт в большем количестве, чем с меньшей энергией.

$$U_{12}^{11} = (E_{f1} - E_{f2}) / e. \quad (3)$$

Это приводит к появлению дополнительной разности потенциалов между внутренними точками металлов, называемой *внутренней разностью потенциалов*. Из рис. 2 видно, что на такую величину убывает потенциал при переходе из первого металла во второй.

Контактная разность потенциалов возникает не только между металлами, но и между металлом и полупроводником, а также между двумя полупроводниками.

Если цепь замкнуть и все контакты проводников поддерживать при одинаковой температуре, то сумма скачков потенциалов по правилу Вольты будет равна нулю. Поэтому термо-ЭДС (соответственно электрический ток) в такой цепи возникнуть не может.

В то же время, простая картина распределения потенциалов и энергий электронов в металлах, изображенная на рис. 1, является точной лишь при абсолютном нуле. При повышении температуры в металле появляется небольшое количество электронов с энергиями, несколько превышающими величину E_f . Кроме того, с изменением температуры изменяется само положение уровня Ферми на зонной картине. Поэтому контактная разность потенциалов U_{12}^{11} будет также несколько меняться с температурой. Одного этого было бы достаточно для возникновения термо-ЭДС, а, следовательно, и тока в замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных проводников, если их спаи поддерживать при разных температурах (рис. 3). Само значение термо-ЭДС при этом определяется следующим образом:

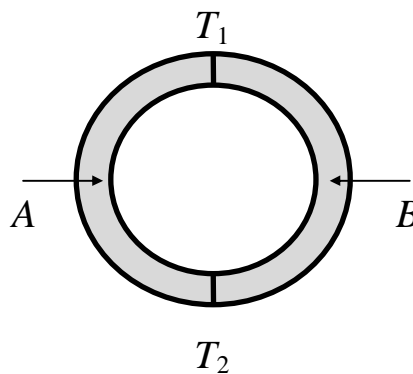


Рис. 3. Цепь, составленная из разнородных проводников A и B

$$\varepsilon_k = \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{1}{e} \frac{dE_{fB}}{dT} \right) dT - \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{1}{e} \frac{dE_{fA}}{dT} \right) dT . \quad (4)$$

где ε_k - контактная составляющая термо-ЭДС, обусловленная зависимостью уровня Ферми от температуры.

Вторая причина возникновения термо-ЭДС. Чтобы понять ее, рассмотрим однородный металлический проводник, концы которого поддерживаются при разных температурах (рис. 4). Предположим, что $T_1 < T_2$. В этом случае концентрация электронов с $E > E_f$ у нагретого конца будет больше, чем у холодного; концентрация электронов с $E < E_f$ будет, наоборот, у нагретого конца меньше. Вдоль проводника возникнет градиент концентрации электронов с данным значением энергии, что повлечет за собой диффузию более быстрых электронов к холодному концу, а более медленных - к теплему. Диффузионный поток быстрых электронов будет больше, чем поток медленных электронов. Поэтому вблизи холодного конца образуется избыток электронов, а вблизи горячего - их недостаток.

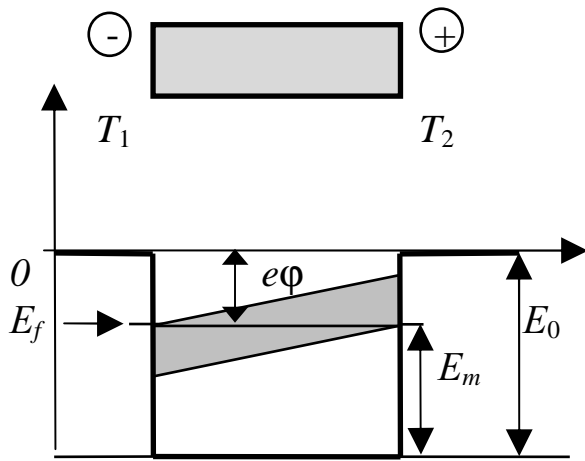


Рис. 4. К возникновению диффузии электронов

Третья причина возникновения термо-ЭДС. При наличии градиента температур вдоль проводника возникает направленный поток фононов. Сталкиваясь с электронами, фононы сообщают им направленное движение от более нагретого конца проводника к менее нагретому. Оба рассмотренных процесса приводят к избытку электронов вблизи холодного конца и недостатку их вблизи горячего конца. Внутри стержня возникает электрическое поле,

препятствующее дальнейшему разделению зарядов и выравнивающее потоки электронов в противоположных направлениях. Таким образом, в равновесном состоянии наличие градиента температуры вдоль стержня создает постоянную разность потенциалов на его концах, величина которой пропорциональна градиенту температуры.

Описанный процесс возникновения электрического поля внутри неравномерно нагретого металла имеет место и в полупроводниках. В случае дырочной проводимости дырки, диффундируя в большем числе к холодному концу, создают вблизи него избыточный положительный заряд. К такому же результату приводит увлечение дырок фононами. Поэтому у полупроводников *p*-типа потенциал холодного конца будет выше, чем потенциал нагретого. У полупроводников *n*-типа - наоборот.

Термо-ЭДС на участке цепи металла *A* от спая, находящегося при температуре T_2 до спая, при температуре T_1 (рис. 3) определяется выражением:

$$\varepsilon_A = \int_{T_1}^{T_2} \beta_A dT, \quad \text{где } \beta_A = \frac{d\varphi_A}{dT}. \quad (5)$$

Аналогично определяется термо-ЭДС, действующая на участке *B*:

$$\varepsilon_B = - \int_{T_1}^{T_2} \beta_B dT, \quad \text{где } \beta_B = \frac{d\varphi_B}{dT}. \quad (6)$$

Тогда полная термоэлектродвижущая сила, действующая в данной цепи, равна:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_k + \varepsilon_A + \varepsilon_B. \quad (7)$$

Принимая во внимание (4) - (6) и (7), выражение для термо-ЭДС можно представить в виде:

$$\varepsilon_T = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_A dT - \int_{T_1}^{T_2} \alpha_B dT = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{AB} dT, \quad (8)$$

где $\alpha = \beta - \frac{1}{e} \frac{dE_f}{dT}$, $\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$.

Когда контакт образует пара из полупроводников *n*- и *p*-типа, то коэффициенты α_A , α_B имеют разный знак и $\alpha_{AB} = \alpha_A + \alpha_B$.

Величину α_{AB} называют *дифференциальной термо-ЭДС* данной пары металлов или полупроводников. Она характеризует возрастание термо-ЭДС для данной пары металлов при нагревании одного из спаев на 1 К. Для большинства пар металлов α_{AB} имеет порядок (10^{-5} - 10^{-4}) В/К; для полупроводников она может быть гораздо больше (до $1,5 \cdot 10^{-3}$ В/К).

В отдельных случаях дифференциальная термо-ЭДС слабо зависит от температуры. Тогда формулу (8) можно приближенно представить в виде:

$$\varepsilon_T = \alpha_{AB} (T_2 - T_1). \quad (9)$$

В заключение теоретического осмысления темы необходимо подчеркнуть принципиальную разницу между контактной разностью потенциалов и термо-ЭДС. Контактные потенциалы имеют сравнительно большую величину (порядка нескольких вольт) и характеризуют электрическое поле вне проводников между наружными поверхностями последних. Контактная разность потенциалов есть статический эффект, не исчезающий и при абсолютном нуле температур. В противоположность этому термо-ЭДС представляет собой чисто кинетический эффект, наблюдаемый при наличии потоков тепла. Возникающие при этом разности потенциалов по абсолютной величине малы. При абсолютном нуле это явление исчезает.

Области применения термоэлектрических явлений достаточно разнообразны. Это, в первую очередь, измерение температуры тел в широком диапазоне (практически от 30 до 3000 К). Не менее значимым является конструирование и изготовление термоэлектрических источников питания - термоэлектродгенераторов (ТЭГ), используемых в различных областях народного хозяйства (питание радиоаппаратуры,

защита от коррозии газо- и нефтепроводов, бортовое питание спутников и др.).

В геологии исследуются термодвижущие силы минералов - полупроводников - с целью установления особенностей генеза, возможной связи с золотоносностью и иных задач.

3. Выполнение работы

3.1. Необходимые приборы:

- термоэлектрический преобразователь (термопара);
- вольтметр постоянного тока с высоким входным сопротивлением;
- сосуд Дьюара;
- нагреватель и емкость для воды.

3.2. Порядок выполнения работы

Включить вольтметр постоянного тока в сеть, дать прогреться в течение 5 мин.

Перед началом работы пригласить преподавателя, чтобы он проверил готовность установки к эксперименту.

Убедившись, что термопара подключена к вольтметру, измерить термо-ЭДС, соответствующую комнатной температуре воздуха.

Полученное значение записать в табл. 1.

Нагреть воду в сосуде до кипения, включив нагреватель в сеть.

Не отключая нагревателя, поместить термопару в кипящую воду и измерить термо-ЭДС, сняв отсчет по вольтметру.

Записать полученное значение в табл. 1, выключить вольтметр.

Выключить нагреватель и вынуть термопару из воды.

Начертить градуировочный график, учитывая, что термо-ЭДС измеряется относительно точки плавления льда. Для этого ось абсцисс разметить от 0 до 100 °С с масштабом 10 °С в 1 см. Ось ординат размечается в зависимости от типа применяемой термопары. Для термопары хромель – алюмель, используемой в этой работе, значения термо-ЭДС не превышают 5 мВ в интервале от 0 до 100 °С. Поэтому ось ординат нужно разметить от 0 до 5 мВ с масштабом 1 мВ в двух см. Затем отметить значение термо-ЭДС, измеренное при 100 °С. Полученную точку соединить прямой с точкой 0 мВ, воспользовавшись линейкой. На оси термо-ЭДС отметить точку, соответствующую комнатной температуре. Провести через нее линию, параллельную оси температур, до

пересечения с градуировочной линией и опустить перпендикуляр на ось температур. Полученное значение комнатной температуры записать в табл. 1, сравнить его с показаниями комнатного термометра, сделать вывод.

Таблица 1

Измеренные значения термо-ЭДС

Измеряемая среда	Термо-ЭДС, мВ	Температура, °С
Кипящая вода		100
Воздух		

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается эффект Зеебека (явления термо-ЭДС)?
2. Изобразите потенциальную энергию электронов в металле.
3. Изобразите зонную схему возникновения контактной разности потенциалов двух металлов.
4. Укажите причины возникновения контактного потенциала.
5. Укажите и объясните вклады различных механизмов возникновения термо-ЭДС в общую термо-ЭДС.
6. Изобразите схему установки.
7. Что такое дифференциальная термо-ЭДС? Как она вычисляется?
8. Назовите единицы измерения термо-ЭДС и дифференциальной термо-ЭДС.
9. Приведите примеры применения явления термо-ЭДС.
10. Как производится градуировка термопары?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дубровский, И. М., Егоров, Б. В., Рябопашка, К. П.* Справочник по физике / И. М. Дубровский, Б. В. Егоров, К. П. Рябопашка.-Киев: Наукова думка. 1986.- 558 с.
- Зисман Г. А., Тодес О. М.* Курс общей физики / Г. А. Зисман , О. М. Тодес.- М.: Наука, 1965.
- Савельев, И. В.* Курс общей физики. Т.3 / И. В. Савельев.- М.: Наука. 1989.- 304 с.
- Трофимова Т. И.* Курс физики / Т. И. Трофимова.- М.: Высшая школа, 1994.- 541 с.