

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА «ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА»

С.О. Зубович, Г.А. Рахманкулова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ТЕРМОПАРЫ

Методические указания



Волгоград
2015

УДК 53 (075.5)

Рецензент:

Канд. физ.-мат. наук, доцент Т.А. Сухова

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

С.О. Зубович, **Определение электродвижущей силы термопары** [Электронный ресурс]: методические указания / С.О. Зубович, Г.А. Рахманкулова //Сборник «Методические указания» Выпуск 3.-Электрон. текстовые дан.(1файл:141Kb) – Волжский: ВПИ (филиал) ГОУВПО ВолгГТУ, 2015.-Систем.требования: Windows 95 и выше; ПК с процессором 486+; CD-ROM.

Методические указания содержат рекомендации к выполнению лабораторной работы, представленной в третьей части практикума кафедры «Прикладная физика и математика» Волжского политехнического института.
Предназначены для студентов всех форм обучения.

©Волгоградский
государственный
технический
университет, 2015
© Волжский
политехнический
институт, 2015

Лабораторная работа № 351

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ТЕРМОПАРЫ

351.1. Цель работы: Определение зависимости термоэлектродвижущей силы термопары от разности температур спаев.

351.2. Содержание работы

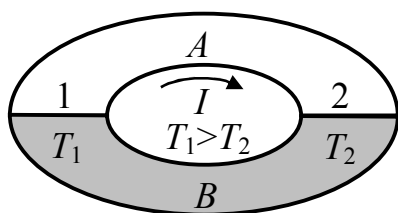


Рис. 351.1

В замкнутой цепи (рис. 351.1), состоящей из разнородных проводников (или полупроводников) A или B , возникает электродвижущая сила (ЭДС) ε_T и течет ток I , если контакты 1 и 2 этих проводников поддерживаются при различных температурах T_1 и T_2 . Данное явление было обнаружено в 1831 г. и получило название по фамилии первооткрывателя – явление *Зеебека*. Возникающая ЭДС называется *термоэлектродвижущей силой (термо-ЭДС)*, а электрическая цепь из двух разнородных проводников называется *термопарой*.

При изменении знаков разности температур спаев изменяется направление тока термопары.

Известны три причины возникновения термо-ЭДС:

1. образование направленного потока носителей зарядов в проводнике при наличии градиента температур;
2. увеличение электронов фононами;
3. изменение положения уровня Ферми в зависимости от температуры.

Рассмотрим эти причины подробнее.

При наличии градиента температуры $dT/d\ell$ вдоль проводника электроны на горячем его конце обладают большей кинетической энергией, а значит и большей скоростью хаотического движения по сравнению с электронами холодного конца. В результате возникает преимущественный по-

ток электронов от горячего конца проводника к холодному, на холодном конце накапливается отрицательный, а на горячем остается нескомпенсированный положительный заряд. Накопление продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет равный обратный поток электронов. Алгебраическая сумма таких разностей потенциалов в цепи создает объемную составляющую термо-ЭДС.

Помимо этого, имеющийся градиент температуры в проводнике приводит к возникновению преимущественного движения (дрейфа) *фононов* (квантов колебательной энергии кристаллической решетки проводника) от горячего конца к холодному. Существование такого дрейфа приводит к тому, что электроны, рассеиваемые на фононах, сами начинают совершать направленное движение от горячего конца к холодному. Накопление электронов на холодном конце проводника и обеднение электронами горячего конца приводит к возникновению «фононной» составляющей термо-ЭДС. Причем при низких температурах вклад этой составляющей является основным в возникновении термо-ЭДС.

В результате обоих процессов внутри проводника возникает электрическое поле, направленное навстречу градиенту температуры. Напряженность E этого поля можно представить в виде:

$$E = -\frac{d\varphi}{d\ell} = -\frac{d\varphi}{dT} \cdot \frac{dT}{d\ell} = -\beta \frac{dT}{d\ell}, \quad (351.1)$$

где:

$$\beta = \frac{d\varphi}{dT}. \quad (351.2)$$

Соотношение (351.1) связывает напряженность электрического поля E с градиентом температуры $dT/d\ell$. Возникающее поле и градиент температуры имеют противоположные направления, поэтому они имеют разные знаки.

Определяемое выражением (351.1) поле является полем сторонних сил. Проинтегрировав напряженность этого поля по участку цепи A (рис. 351.1) от спая 2 до спая 1 и предполагая, что $T_2 > T_1$, получим термо-ЭДС, действующую на этом участке:

$$\varepsilon_{2A1} = -\int_2^1 \beta_A \frac{dT}{d\ell} d\ell = \int_{T_1}^{T_2} \beta_A dT. \quad (351.3)$$

(Знак изменился при изменении пределов интегрирования). Аналогично определим термо-ЭДС, действующую на участке B от спая 1 до спая 2:

$$\varepsilon_{1B2} = -\int_1^2 \beta_B \frac{dT}{d\ell} d\ell = -\int_{T_1}^{T_2} \beta_B dT. \quad (351.4)$$

Третья причина возникновения термо-ЭДС заключается в зависимости положения уровня Ферми от температуры.

Наивысший энергетический уровень, занятый электронами при 0 K , называется *уровнем Ферми*. Уровню Ферми соответствует энергия Ферми E_F , которую могут иметь электроны на этом уровне. *Энергия Ферми* – это максимальная энергия, которую могут электроны проводимости в металле при 0 K . Работу выхода электрона из металла нужно отсчитывать не от дна «потенциальной ямы», как это делалось в классической теории, а от уровня Ферми, т.е. от верхнего из занятых электронами энергетических уровней. Уровень Ферми будет тем выше, чем больше плотность электронного газа. Например (рис. 351.2); E_{FA} – энергия Ферми для металла A , а E_{FB} – для металла B .

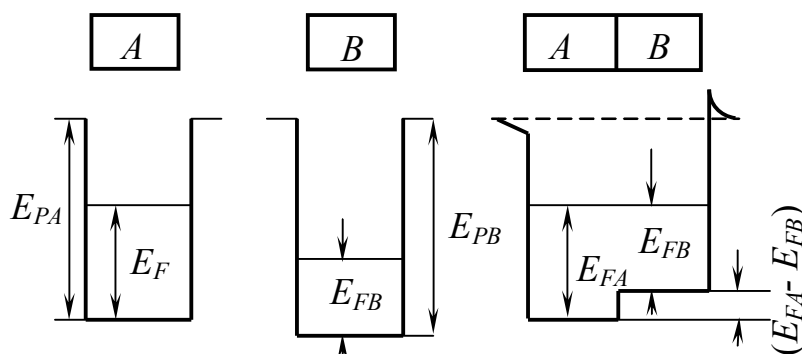


Рис. 351.2

Значения E_{PA} и E_{PB} – это наибольшая потенциальная энергия электронов в металлах A и B соответственно.

При контакте двух разнородных металлов A и B наличие разности уровней Ферми ($E_{FA} > E_{FB}$) приводит к возникновению перехода электронов из металла A (с более высоким уровнем) в металл B (с низким уровнем Ферми). При этом металл A заряжается положительно, а металл B отрицательно.

Появление этих зарядов вызывает смещение энергетических уровней металлов, в том числе уровней Ферми. Как только уровни Ферми выравниваются, причина, вызывающая преимущественный переход электронов из металла A в металл B , исчезает, и между металлами устанавливается динамическое равновесие. Из рис. 351.2 видно, что потенциальная энергия электрона в металле A меньше, чем в B , на величину $E_{FA} - E_{FB}$. Соответственно потенциал внутри металла A выше, чем внутри B , на величину:

$$U_{AB} = \frac{E_{FA} - E_{FB}}{e}. \quad (351.5)$$

Это выражение (351.5) дает *внутреннюю контактную разность потенциалов*. На такую величину убывает потенциал при переходе из металла A в металл B .

Причиной возникновения контактной разности потенциалов является различие концентрации электронов в контактных металлах, и она зависит от температуры T . Внутренняя контактная разность потенциалов возникает в двойном электрическом слое, образующимся в приконтактной области называемым *контактным слоем* и равно 10^{-10} м, т.е. соизмерим с междузельными расстояниями в решетке металла. Следовательно, электрический ток через контакт двух металлов проходит так же легко, как и в металле в любом направлении.

Если оба спая термопары (рис. 351.1) находятся при одной и той же температуре, то контактные разности потенциалов равны и направлены в противоположные стороны. В этом случае они компенсируют друг друга.

Известно, что уровень Ферми хоть и слабо, но зависит от температуры. Поэтому, если температура спаев 1 и 2 различна, то разность $U_{AB}(T_1) - U_{AB}(T_2)$ на контактах дает свой «контактный» вклад в термо-ЭДС и равен:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{конт}} &= U_{AB}(T_1) - U_{AB}(T_2) = \frac{1}{e} \{ [E_{FA}(T_1) - E_{FB}(T_1)] + [E_{FB}(T_2) - E_{FA}(T_2)] \} = \\ &= \frac{1}{e} \{ [E_{FB}(T_2) - E_{FB}(T_1)] - [E_{FA}(T_2) - E_{FA}(T_1)] \} \end{aligned} \quad (351.6)$$

Последнее выражение можно представить следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{конт}} = \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{1}{e} \frac{dE_{FB}}{dT} \right) dT - \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{1}{e} \frac{dE_{FA}}{dT} \right) dT. \quad (351.7)$$

Результирующая термо-ЭДС ε_T складывается из ЭДС, действующих в контактах 1 и 2 и ЭДС, действующих на участках A и B :

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{2A1} + \varepsilon_{1B2} + \varepsilon_{\text{конт}}. \quad (351.8)$$

Подставив в (351.8) выражения (351.3), (351.4) и (351.7) и проведя преобразования, получим

$$\varepsilon_T = \int_{T_1}^{T_2} \left(\beta_A - \frac{1}{e} \frac{dE_{FA}}{dT} \right) dT - \int_{T_1}^{T_2} \left(\beta_B - \frac{1}{e} \frac{dE_{FB}}{dT} \right) dT. \quad (351.9)$$

Величина:

$$\alpha = \beta - \frac{1}{e} \frac{dE_F}{dT} \quad (351.10)$$

называется *коэффициентом термо-ЭДС*. Так как и β и dE_F/dT зависят от температуры, то коэффициент α является функцией T .

Приняв во внимание (351.10), выражение для термо-ЭДС можно представить в виде:

$$\varepsilon_T = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_A dT - \int_{T_1}^{T_2} \alpha_B dT, \quad (351.11)$$

или

$$\varepsilon_T = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{AB} dT, \quad (351.12)$$

где

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B. \quad (351.13)$$

Величину α_{AB} называют *дифференциальной* или *удельной термо-ЭДС* данной пары металлов. Размерность $[\alpha_{AB}] = B/K$ и существенно зависит от природы контактирующих материалов, интервала температур, достигая порядка $(10^{-5} - 10^{-4}) B/K$.

В небольшом интервале температур (0-100°C) удельная термо-ЭДС слабо зависит от температуры. Тогда формулу (351.12) можно с достаточной степенью точности представить в виде

$$\varepsilon_T = \alpha_{AB} (T_2 - T_1). \quad (351.14)$$

В полупроводниках, в отличие от металлов, существует сильная зависимость концентрации носителей зарядов и их подвижности от температуры. Поэтому рассмотренные выше эффекты, приводящие к образованию термо-ЭДС, выражены в полупроводниках сильнее, удельная термо-ЭДС значительно больше, достигая значений порядка $10^{-3} B/K$.

Явление Зеебека используется для измерения температуры с помощью *термоэлементов* или *термопар*. На практике часто используются термопары, состоящие из особо подобранных сплавов, например: ХК – хромель – копель, ХА – хромель – алюмель. Термопары могут быть соединены по-

следовательно, т.е. образовывать термобатареи. Термобатареи создают ЭДС, равную $\varepsilon_{бат} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_n$.

Такие устройства разность температур непосредственно преобразуют в разность потенциалов.

351.3. Описание лабораторной установки

Для изучения зависимости термо-ЭДС от разности температур спаев (контактов) в настоящей работе используется термопара, изготовленная из двух отрезков проволоки, один из которых является сплавом на основе хрома (хромель), а другой – сплавом на основе алюминия (алюмель). Один спай вместе с термометром помещен в сосуд с водой, температура T_2 в котором может изменяться путем нагрева на электроплитке. Температура другого спаю T_1 поддерживается постоянной, равной комнатной температуре (рис.351.3).

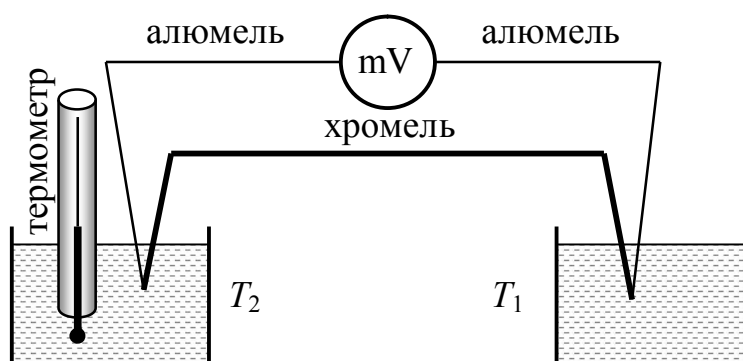


Рис. 351.3

Возникающая термо-ЭДС измеряется цифровым вольтметром В7-21 (PD) в интервале $(1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-2})$ В с дискретностью $1 \cdot 10^{-6}$ В.

351.4. Методика эксперимента

В работе используются прямые измерения возникающей в термопаре ЭДС. Температура спаев определяется по температуре воды в сосудах с помощью термометра (рис. 351.3).

351.5. Порядок выполнения работы

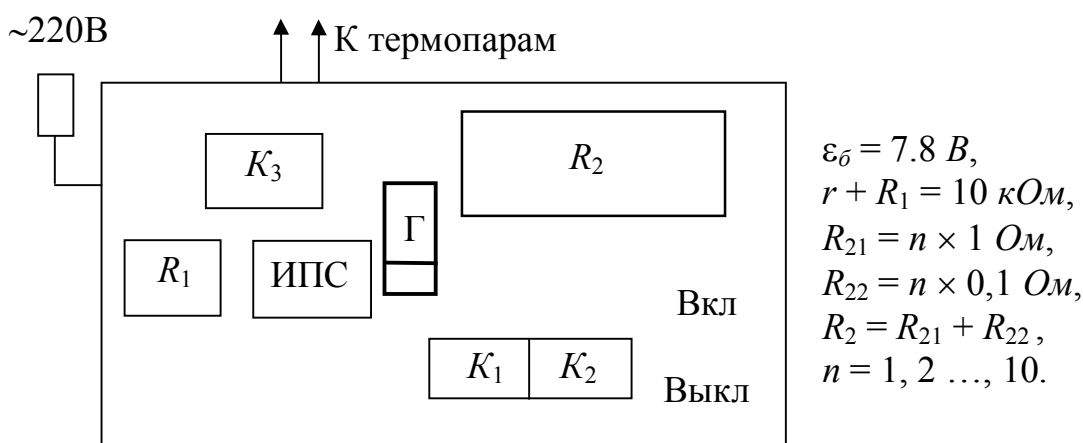


Рис. 351.4

ИПС-1 – источник стабилизированного питания, K_1 – ключ включения нагревающего элемента (электроплитки), K_2 – ключ включения гальванометра, Γ – гальванометр, R_1 – дополнительное сопротивление, R_2 – компенсирующее сопротивление (магазин сопротивлений).

1. Погрузите оба спая термопары в стаканы с водой и подайте напряжение 220 В на схему (рис. 351.4). Замкните ключи K_1 и K_3 , ручки магазина сопротивлений установите на «0» (при этом стрелка гальванометра установится на «0»).

2. Замкните ключ K_2 , т.е. начните нагревание правого спая с помощью электроплитки.

3. При нагревании правого спая стрелка гальванометра начнет отклоняться. Для возвращения ее на «0» необходимо увеличивать сопротивление на магазине сопротивлений с помощью ручек « R_{21} » и « R_{22} ». Запишите в табл. 351.1 значение $R_2 = R_{21} + R_{22}$, когда разность температур спаев достигнет 5°C .

4. Продолжайте повышать температуру горячего спая до 90°C и через каждые 5°C снимать показания R_2 , при котором произошла компенсация термо-ЭДС.

5. Отключите электроплитку, разомкнув ключ K_2 , затем разомкните ключи K_1 и K_3 .

351.6. Обработка результатов измерений

1. Вычислите значение ЭДС термопары в вольтах по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{r + R_1} R_2,$$

и постройте график зависимости ЭДС термопары (ось ординат) от разности температур спаев $\Delta T = T_2 - T_1$ (ось абсцисс).

2. По графику $\varepsilon(\Delta T)$ определите удельную термо-ЭДС: $\alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T}$.

3. Результаты расчетов запишите в табл. 351.1:

Таблица 351.1. *Определение удельной термо-ЭДС термопары.*

№	$\varepsilon_0,$ В	$r+R,$ Ом	T_1 (хол), К	T_2 (гор), К	$\Delta T,$ К	$R_2,$ Ом	$\varepsilon,$ В	$\alpha,$ В/К

351.7. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы Вольта для контакта разных потенциалов.
2. Объясните причины возникновения термо-ЭДС.
3. Изобразите зонную схему возникновения контактной разности потенциалов двух металлов.
4. В чем заключается различие в определении работы выхода электрона из металла между классической теорией и квантовой физикой?
5. Объясните смысл термина «внутренняя контактная разность потенциала».
6. Что такое дифференциальная термо-ЭДС?
7. В чем заключается явление Зеебека? Где оно применяется?
8. В чем заключается явление Пельтье? Где оно применяется?
9. В чем заключается явление Томсона? Где оно применяется?

Литература, рекомендуемая для обязательной проработки: [1], §9.4; [2], §§246, 247.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики в 4-х томах. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: КноРус, 2012. – Т.3. – 368 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – 20-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 560 с.

Учебное издание

Сергей Олегович **Зубович**
Галлия Алиевна **Рахманкулова**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ТЕРМОПАРЫ

Методические указания

План электронных изданий 2010 г. Поз. № 16В
Подписано на « Выпуск в свет» 08.10.10. Уч-изд. л. 1,08.
На магнитоносителе.

Волгоградский государственный технический университет.
400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.