

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой общей физики ФТИ

 А.М. Лидер

«29» 09 2016 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2-12

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ НА КОНТАКТАХ
ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЗЕЕБЕКА

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Общая физика» по теме «Электричество и магнетизм»
для студентов всех направлений и специальностей

Томск-2016

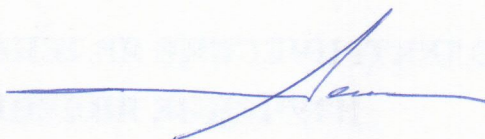
УДК 53 (076.5)

Электрические явления на контактах. Изучение явления Зеебека. Методические указания к выполнению лабораторной работы № 2 - 12 по курсу «Общая физика» по теме «Электричество и магнетизм» для студентов всех направлений и специальностей.

Составитель Т.Н. Мельникова
 В.М. Петелина

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры общей физики *Н.В.* 2016 г.

Зав. кафедрой ОФ: А.М. Лидер.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ НА КОНТАКТАХ

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЗЕЕБЕКА

Цель работы: изучение электрических явлений на контактах и количественная оценка удельной ЭДС термопары.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка, состоящая из мультиметров для измерения термоэдс трех термопар, нагревательный элемент, набор термопар, приборная стойка.

Краткое теоретическое введение

При соприкосновении двух проводников электроны вследствие теплового движения переходят из одного проводника в другой. Если соприкасающиеся проводники различны или если их температура в разных точках неодинакова, то оба потока диффузии неодинаковы и один из проводников заряжается *положительно*, а другой – *отрицательно*. Поэтому в пограничном слое между проводниками появляется *электрическое поле*, уравнивающее разность диффузионных потоков. Существованием электрических полей обусловлен ряд электрических явлений, таких как:

1. Работа выхода электронов из металла.
2. Внутренняя контактная разность потенциалов (внутренняя КРП).
3. Внешняя контактная разность потенциалов (внешняя КРП).

Работа выхода

Так как электроны проводимости, имеющиеся в металлах, удерживаются внутри металла, то значит, вблизи поверхности существуют силы, действующие на электроны и направленные внутрь металла. Чтобы электрон мог выйти из металла за его пределы, должна быть совершена определенная работа A против этих сил – **работа выхода электрона из металла**. Наличие работы выхода показывает, что в поверхностном слое металла существует электрическое поле, а, следовательно, **электрический потенциал** при переходе через этот поверхностный слой изменяется на некоторую величину ϕ . Эта поверхностная разность потенциалов связана с работой выхода соотношением

$$A = e\phi. \quad (1)$$

Изменение потенциала внутри металла в отсутствие тока можно представить при помощи диаграммы рис. 1 (так называемой **потенциальной ямы** или **потенциального ящика**).

По вертикальной оси отложена потенциальная энергия электрона, т. е. произведение $e\phi$, причем значение потенциала вне металла принято равным нулю. Потенциальная энергия электрона вне металла постоянна, в поверхностном слое она быстро изменяется – уменьшается на величину работы выхода, а внутри металла опять становится постоянной.

Потенциальная энергия электрона в металле отрицательна относительно

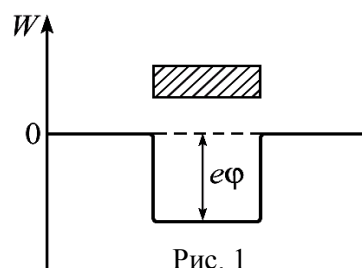


Рис. 1

вакуума, а так как заряд электрона отрицательный, потенциал внутри металла имеет относительно вакуума положительное значение.

Внутренняя контактная разность потенциалов

Возникновение **внутренней контактной разности потенциалов** (КРП) можно объяснить следующим образом. Если взять два различных металла 1 и 2 (рис. 2) при одной температуре и привести их в соприкосновение, то электроны проводимости вследствие теплового движения будут переходить из проводника 1 в проводник 2 и обратно.

Пусть концентрация электронов n_1 в металле 1 больше концентрации n_2 в металле 2. Тогда поток диффузии электронов из металла 1 будет больше потока диффузии в обратном направлении, и металл 1 будет заряжаться положительно, а металл 2 – отрицательно. В результате этого между металлами возникнет разность потенциалов и появится электрическое поле, которое вызовет дополнительное движение электронов в обратном направлении – от металла 2 к металлу 1; поэтому общее количество электронов, переходящих от 1 к 2, будет уменьшаться, а идущих в противоположном направлении – увеличиваться.

При некоторой разности потенциалов между металлами установится равновесие. Это и есть внутренняя контактная разность потенциалов обоих металлов. Энергетическая диаграмма, характеризующая вышесказанное, приведена на рис. 2.

На диаграмме ось ординат характеризует потенциальную энергию электрона внутри металла

$$W = eU,$$

где U – значение потенциала, а по оси абсцисс – перемещение вдоль металла. Так как в отсутствие тока потенциал внутри металла одинаков, то и энергия W постоянна в различных точках одного и того же металла. Однако ее значение в обоих металлах различно и меньше в металле 1, заряженном положительно (т.к. заряд электрона $e < 0$). Разность энергий электрона в обоих проводниках равна eU_i .

Оценить величину U_i можно, используя классическую электронную теорию металлов. В этом случае задача о равновесии электронов в двух соприкасающихся проводниках не отличается от задачи о распределении частиц в силовом поле (распределение Больцмана):

$$n_1 = n_2 e^{-\frac{eU_i}{kT}}; \quad (2)$$

где n_1 и n_2 – концентрация электронов в обоих металлах; k – постоянная Больцмана; T – температура металла; e – заряд электрона.

Отсюда

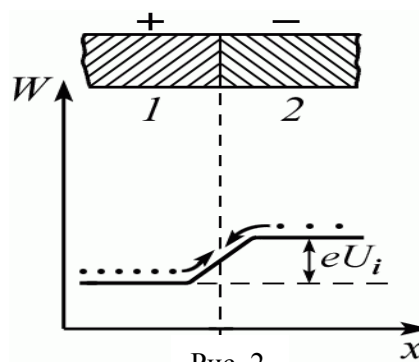


Рис. 2

$$U_i = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} . \quad (3)$$

При комнатной температуре ($T = 300 \text{ К}$)

$$\frac{kT}{e} = 0,026 \text{ В},$$

величина

$$\ln \frac{n_2}{n_1}$$

составляет значение порядка единицы. Поэтому U_i имеет порядок, равный ($10^{-2} - 10^{-3}$) В.

Внешняя контактная разность потенциалов

На диаграммах рис. 3 показано возникновение внешней контактной разности потенциалов (КРП) при соприкосновении двух разнородных металлов. Два различных металла 1 и 2, разобщенные друг от друга, характеризуются своими потенциальными ямами, причем, с точки зрения классической теории металлов, глубина потенциальной ямы равна термоэлектронной работе выхода электрона из металла $e\phi$.

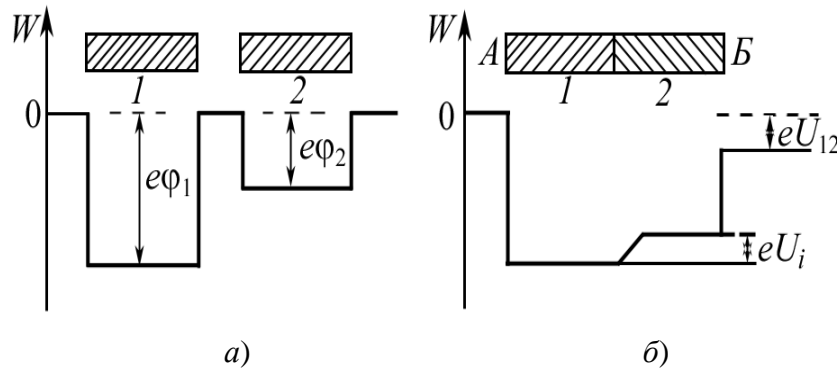


Рис. 3

При соприкосновении кусков металла в контактном слое вследствие диффузии электронов установится скачок потенциала U_i , равный внутренней КРП, и между днами обеих потенциальных ям будет энергетическое расстояние eU_i (рис. 3,б). Но так как глубины потенциальных ям различны, то их внешние края окажутся на разных высотах. Это значит, что между двумя любыми точками A и B , находящимися вне металлов, но расположенными в непосредственной близости от их поверхностей, возникает разность потенциалов. Она получила название внешней КРП между двумя металлами (**первый закон Вольты**) и равна

$$U_{12} = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} . \quad (4)$$

Здесь A_1 и A_2 – работы выхода электронов соответственно из металлов 1 и 2; T – абсолютная температура спая.

Все термоэлектрические явления относятся к явлениям переноса и обусловлены электрическими или тепловыми потоками, возникающими в среде

при наличии электрических и тепловых полей. Причиной всех термоэлектрических явлений является то, что средняя энергия носителей в потоке отличается от средней энергии в состоянии равновесия.

Так как в электрических схемах и приборах всегда имеются спаи и контакты различных проводников, то при колебаниях температуры в местах контактов возникают термоэдс, которые необходимо учитывать при точных измерениях.

Эффект Зеебека

К термоэлектрическим явлениям относятся эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона. Эти явления нашли широкое применение, в частности эффект Зеебека, положенный в основу измерения температур с помощью термоэлектрических термометров.

Явление Зеебека открыто в 1821 г. и заключается в том, что в термопарах, спаи которых находятся при различных температурах, возникает термоэлектродвижущая сила (термоэдс).

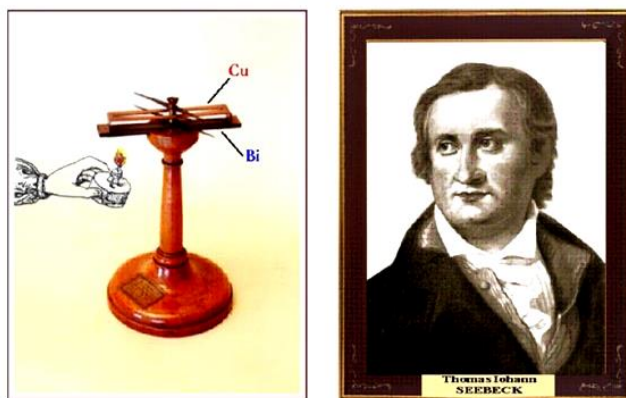


Рис. 4

Если вдоль проводника существует градиент температур, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном; в полупроводниках в дополнение к этому концентрация электронов проводимости растет с температурой. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному и на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся не скомпенсированный положительный заряд.

Процесс накопления заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток электронов в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие.

В электрической цепи, составленной из разных проводников (M_1 и M_2), возникает термоэдс, если места контактов (A , B) поддерживаются при разных температурах. Когда цепь замкнута, в ней течет электрический ток (называемый **термотоком**), причем изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления термотока (рис. 5).

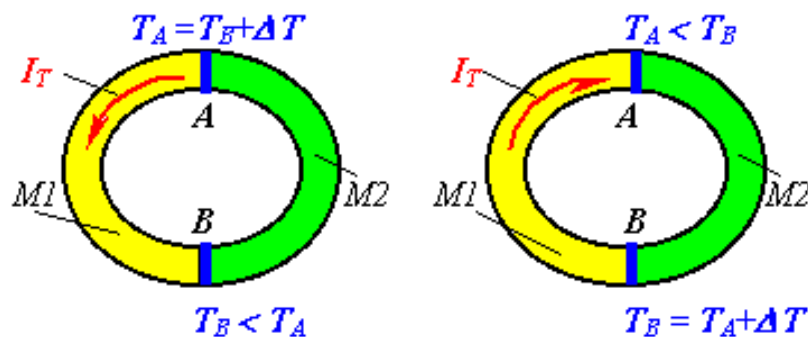


Рис. 5

Возникновение термоиндуцированного тока в двух спаянных проводниках при различных температурах контактов

Величина термоэдс зависит от абсолютных значений температур спаев (T_A , T_B), разности этих температур и от природы материалов, составляющих термоэлемент. В небольшом интервале температур термоэдс ε можно считать пропорциональной разности температур:

$$\varepsilon = \alpha_{12}(T_2 - T_1), \quad (5)$$

или

$$d\varepsilon = \alpha_{12}dT;$$

$$\varepsilon = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{12}dT. \quad (6)$$

Здесь α_{12} – термоэлектрическая способность пары (или **коэффициент термоэдс**) металла 1 по отношению к металлу 2, который является характеристикой обоих металлов термопары. На практике это создает определенные неудобства. Поэтому условились величину α измерять по отношению к одному и тому же металлу, за который удобно принять **свинец**, т.к. *для образца из свинца не возникает никакой разности потенциалов между его нагретым и холодным концами.*

Значения коэффициентов термоэдс металлов M_1 и M_2 по отношению к свинцу обозначают соответственно α_1 и α_2 и называют **абсолютными коэффициентами термоэдс**. Тогда

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2.$$

Направление термотока определяется следующим образом: в нагретом спае ток течет от металла с меньшим значением α к металлу, у которого коэффициент термоэдс больше. Например, для термопары железо (M_1) - константан (M_2): $\alpha_1 = +15,0$ мкВ/К; $\alpha_2 = -38,0$ мкВ/К. Следовательно, ток в горячем спае направлен от константана к железу (от M_2 к M_1). Именно эта ситуация (когда $\alpha_2 < \alpha_1$) иллюстрируется для электрической цепи, изображенной на рис. 4.

Коэффициент термоэдс определяется физическими характеристиками проводников, составляющих термоэлемент: *концентрацией, энергетическим спектром, механизмами рассеяния носителей заряда, а также интервалом*

температур. В некоторых случаях при изменении температуры происходит даже изменение знака α .

Термоэдс обусловлена **тремя причинами:**

1) температурной зависимостью уровня Ферми, что приводит к появлению контактной составляющей термоэдс;

2) диффузией носителей заряда от горячего конца к холодному, определяющей объемную часть термоэдс;

3) процессом увлечения электронов фононами, который дает еще одну составляющую – фононную.

Первая причина. Несмотря на то, что в проводниках уровень Ферми слабо зависит от температуры (электронный газ вырожден), для понимания термоэлектрических явлений эта зависимость имеет принципиальное значение. Если оба спая термоэлемента находятся при одной и той же температуре, то контактные разности потенциалов равны и направлены в противоположные стороны, то есть компенсируют друг друга. Если же температура спаев различна, то будут неодинаковы и внутренние контактные разности потенциалов. Это ведет к нарушению электрического равновесия и возникновению контактной термоэдс (ε_{12}^k):

$$\varepsilon_{12}^k = \int_{T_2}^{T_1} \alpha_{12}^k dT = \int_{T_2}^{T_1} (\alpha_1^k - \alpha_2^k) dT, \quad (8)$$

$$\alpha^k = -\frac{1}{e} \frac{\partial E_F}{\partial T}, \quad (9)$$

где E_F – энергия Ферми;

k – постоянная Больцмана;

e – заряд электрона.

Для свободных электронов α^k должно линейно меняться с температурой.

Вторая причина обуславливает объемную составляющую термоэдс, связанную с неоднородным распределением температуры в проводнике. Если градиент температуры поддерживается постоянным, то через проводник будет идти постоянный поток тепла. В металлах перенос тепла осуществляется в основном движением электронов проводимости. Возникает диффузионный поток электронов, направленный против градиента температуры. В результате, концентрация электронов на горячем конце уменьшится, а на холодном увеличится. Внутри проводника возникнет электрическое поле E_T , направленное против градиента температуры, которое препятствует дальнейшему разделению зарядов (рис. 6).

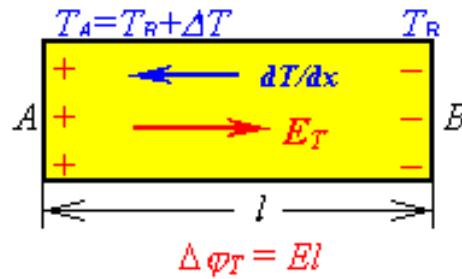


Рис. 6

Возникновение термоЭДС в однородном материале вследствие пространственной неоднородности температуры

В равновесном состоянии наличие градиента температуры вдоль образца создает постоянную разность потенциалов на его концах. Это и есть *диффузионная* (или *объемная*) составляющая термоэдс, которая определяется температурной зависимостью концентрации носителей заряда и их подвижностью. Электрическое поле возникает в этом случае в объеме металла, а не на самих контактах.

В случае положительных носителей заряда (дырки) нагретый конец зарядится отрицательно, а холодный положительно, что приведет к смене знака термоэдс. В проводниках смешанного типа от горячего конца к холодному диффундируют одновременно и электроны, и дырки, возбуждая электрические поля в противоположных направлениях. В некоторых случаях эти поля компенсируют друг друга, и никакой разности потенциалов между концами не возникает. Именно такой случай имеет место в свинце.

Третий источник термоэдс – эффект увлечения электронов фононами. При наличии градиента температуры вдоль проводника возникает дрейф фононов, направленный от горячего конца к холодному. Сталкиваясь с электронами, фононы сообщают им направленное движение, увлекая их за собой. В результате, вблизи холодного конца образца будет накапливаться отрицательный заряд (а на горячем – положительный) до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не уравнивает эффект увлечения. Эта разность потенциалов и представляет собой дополнительную составляющую термоэдс, вклад которой при низких температурах становится определяющим.

Наиболее общее выражение для коэффициента термоэдс металлов (то есть для *сильно вырожденного электронного газа*) имеет вид:

$$\alpha = \frac{\pi^2}{3} \frac{k^2 T}{e} \left(\frac{\partial \ln(\sigma)}{\partial E} \right)_{E=E_F} \quad (10)$$

Считая, что зависимость проводимости металлов (s) от энергии (E) достаточно слабая, для свободных электронов получается формула:

$$\alpha = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2 T}{e E_F} \quad (11)$$

Абсолютные значения всех термоэлектрических коэффициентов растут с уменьшением концентрации носителей.

В металлах концентрации свободных электронов очень велики и не зависят от температуры; электронный газ находится в вырожденном состоянии

и поэтому уровень Ферми, энергия и скорости электронов также слабо зависят от температуры. Поэтому термоэдс «классических» металлов очень мала (порядка нескольких мкВ/К). Для полупроводников α может превышать 1000 мкВ/К.

Для сравнения, в таблице приведены значения α некоторых металлов (по отношению к свинцу) для интервала температур 0 °С до 100 °С (положительный знак α приписан тем металлам, к которым течет ток через нагретый спай).

Металл	α , мкВ/К
Платина	-4,4
Олово	-0,2
Свинец	0,0
Серебро	+2,7
Медь	+3,2
Сурьма	+4,3

Все термоэлектрические явления относятся к явлениям переноса и обусловлены электрическими или тепловыми потоками, возникающими в среде при наличии электрических и тепловых полей. *Причиной всех термоэлектрических явлений является то, что средняя энергия носителей в потоке отличается от средней энергии в состоянии равновесия.*

Эффект Зеебека, как и другие термоэлектрические явления, имеет феноменологический характер.

Так как в электрических схемах и приборах всегда имеются спаи и контакты различных проводников, то при колебаниях температуры в местах контактов возникают термоэдс, которые необходимо учитывать при точных измерениях.

С другой стороны, термоэдс находит широкое практическое применение. Эффект Зеебека в металлах используется в термопарах для измерения температур. Что касается термоэлектрических генераторов, в которых тепловая энергия непосредственно преобразуется в электрическую, то в них используются полупроводниковые термоэлементы, обладающие гораздо большими термоэдс.

Наиболее важной технической реализацией эффекта Зеебека в металлах является **термопара – термочувствительный элемент в устройствах для измерения температуры.**

Термопара состоит из двух последовательно соединенных пайкой или сваркой разнородных металлических проводников M_1 и M_2 . В сочетании с электроизмерительными приборами термопара образует термоэлектрический термометр, шкала которого градуируется непосредственно в К или °С.

Практическое применение эффекта Зеебека.

Устройство термопары

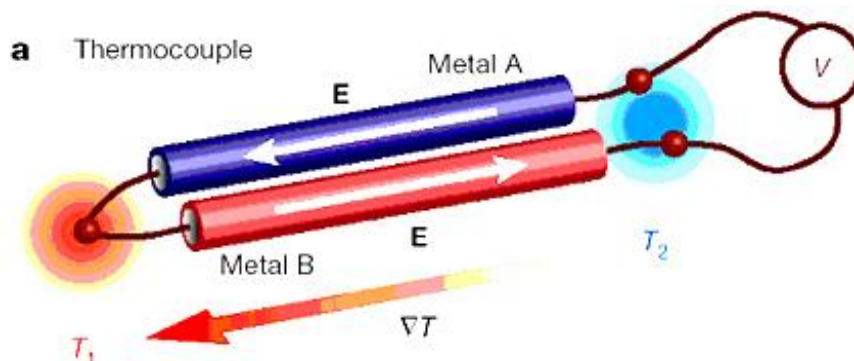


Рис. 7а

Замкнутая цепь, состоящая из двух разнородных металлов, места соединения которых поддерживаются при различных температурах, называется термопарой (рис. 7а). Технически термопара представляет собой две проволоки из различных металлов, в месте контактов которые свариваются или спаиваются. Один из контактов помещается в термостатированную среду большой теплоемкости с известной и постоянной температурой T_0 , а второй в область, температура которой измеряется T .

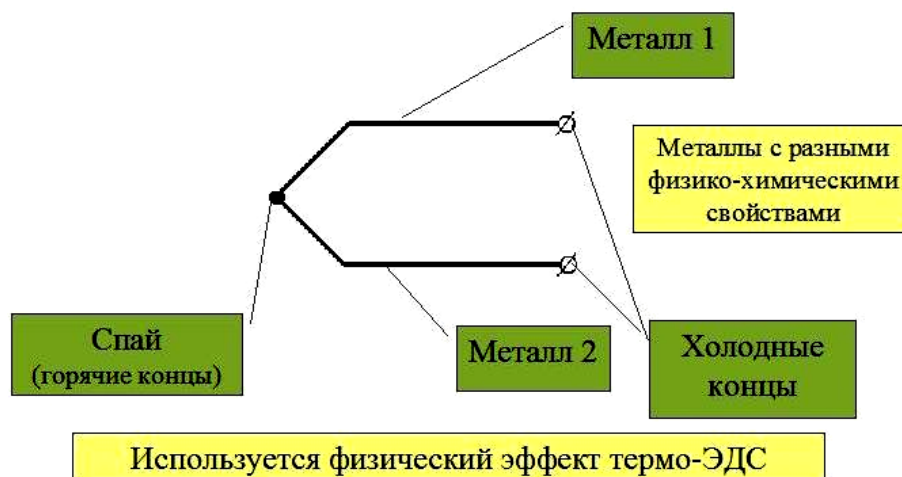


Рис. 7б

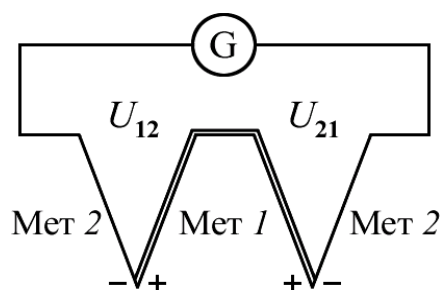


Рис. 8

Схема включения дифференциальной термопары

Для измерения возникающей термоэдс в цепь необходимо включить гальванометр. Для подключения этого прибора разрыв цепи производится по

проводнику, приобретающему положительный потенциал в контакте с другим. Так, в термопаре медь–константан разрыв осуществляется по меди. Зависимость термоэдс от температуры для данной пары металлов, составляющей термопару, обычно заранее известна в виде градуировочного графика

$$\varepsilon = \alpha(T_1 - T_2), \quad (12)$$

где α – угол наклона этого графика к оси температур. Такая термопара называется *дифференциальной*, т.к. с ее помощью можно измерять разность температур.

Оценить температуру какой-то среды можно и с помощью термопары, схема измерения которой представлена на рис. 8.

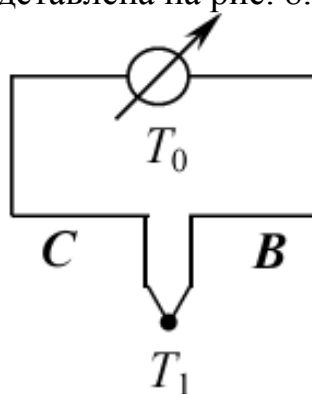


Рис.9

Схема включения термопары

В этом случае показания термопары в значительной степени будут зависеть от колебаний температуры окружающей среды T_0 (роль второго спая играет контакт с гальванометром). Погрешность определения температуры с помощью термопар определяется в основном неоднородностью термопарной проволоки и составляет как правило, несколько градусов, и лишь у некоторых особо однородных сплавов достигает 0,1 К. ЭДС термопары генерируется на тех участках проволоки, где есть градиент температуры. Если градиент температуры в разных измерениях будет падать на разных участках проволоки, отличающихся по своим свойствам, то и термоЭДС будет немного отличаться. Проволоки большего диаметра, как правило, более однородны. Проволоки из чистых металлов, как правило, демонстрируют большую однородность, чем из сплавов.

При высоких температурах зависимость ЭДС термопары ε от температуры T близка к линейной, соответственно чувствительность $d\varepsilon/dT$ слабо зависит от температуры.

При низких температурах чувствительность большинства термопар (за исключением специальных низкотемпературных) падает при приближении к абсолютному нулю температуры.

Например, у медь-константановой термопары при комнатной температуре чувствительность порядка 40 мкВ/К, а при температуре жидкого азота ($T = 77$ К) чувствительность уже 10 мкВ/К. Следует отметить, что полуметаллы (висмут, сурьма) и особенно полупроводниковые материалы позволяют

получить значительно более высокую чувствительность, чем металлы – до 1000 мкВ/К, но они не годятся для термометрии вследствие плохой воспроизводимости (свойства полупроводников определяются небольшим количеством легирующих примесей и поэтому воспроизводимость их свойств всегда хуже, чем у металлов и металлических сплавов) и невозможности изготовить из них гибкую проволоку. Полупроводниковые элементы применяются в прямом преобразовании энергии из тепловой формы в электрическую и наоборот.

Термопара платина-сплав (платина + 10 % родий) имеет стандартную градуировку от 0 °С до 1600 °С, а в области температур 630 °С – 1064 °С является эталонным интерполяционным прибором для установления практической температурной шкалы по реперным точкам затвердевания сурьмы, серебра и золота. Однако она содержит драгметалл, что несколько мешает ее широкому использованию. Для точной работы необходима индивидуальная градуировка того сорта проволоки, из которой изготовлена термопара, причем градуировку часто представляют в виде поправок к стандартной таблице. Константан из различных партий может иметь существенно отличающиеся (до 5 %) термометрические характеристики, что не позволяют создать стандартные таблицы для константановых термопар.

Конструктивное исполнение термопар различно для работы в области низких и высоких температур. Использование термопар при высоких температурах ограничивается термостойкостью (плавлением и окислением) самих проводов термопары. Обычно диаметр проволок термопары составляет (0,2 – 0,5) мм (более толстая проволока, как правило, более однородна).

Высокотемпературные термопары изготавливают сваркой голых проволок, электроизоляция выполняется керамической соломкой (есть специальная двухканальная), иногда термопара заключается в металлический чехол с герметизацией на холодном конце. В низкотемпературных (ниже 100 °С) термопарах можно применять простые электроизолированные провода ПЭЛ или ПЭЛШО, а измерительный спай можно спаять обычным припоем.

Достоинствами термопары являются:

1. простота изготовления,
2. воспроизводимость,
3. малая теплоемкость и поэтому малая инерционность показаний,
4. удобство измерения именно разности температур,
5. нулевая рассеиваемая мощность на термопаре,
6. простота регистрирующей аппаратуры – не нужен источник питания,
7. малое выходное сопротивление.

Неудобствами являются:

1. Необходимость термостатирования опорного спая, часто недостаточная чувствительность ($d\varepsilon/dT$), особенно в области низких температур.
2. Относительно большой теплоподвод к измеряемому объекту теплопроводностью по проволокам термопары.
3. Проблема вывода электродов из герметичного объема.

Явление Зеебека и термопары широко используются в устройствах для измерения температур в различных технологических процессах. Термопары из полупроводниковых материалов, имеющие более высокий КПД, начинают применяться как источники электроэнергии.

Описание экспериментальной установки

На рис. 10 приведена принципиальная схема установки для наблюдения термоэлектрического эффекта (эффекта Зеебека).

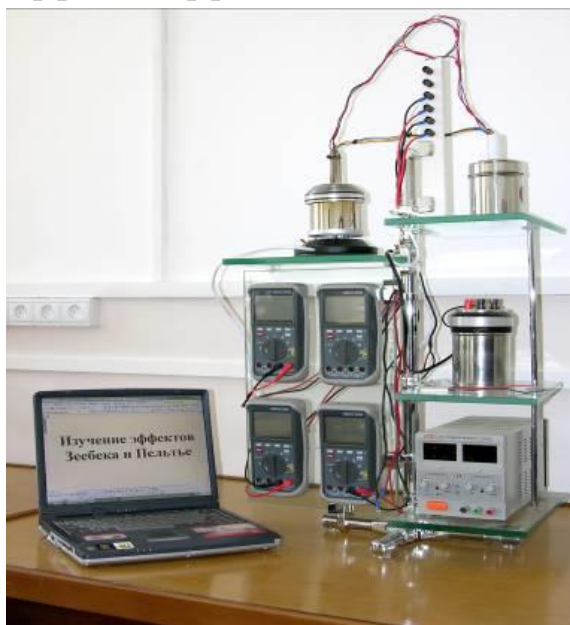


Рис. 10

Принципиальная упрощенная электрическая блок-схема учебной установки для наблюдения термоэлектрического эффекта

В состав установки для изучения термоэлектронных явлений входят три термопары, одна из которых является эталонной: ХА – хромель-алюмель (для нее приводится таблица зависимости ЭДС от разности температур «холодного» и «горячего» спаев); одни спаи термопар помещены в печь («горячие»), а другие находятся при комнатной температуре («холодные»). За эталонную термопару можно взять термопару «хромель-алюмель». Печь включается в сеть 220 В. Каждая термопара подключается к своему мультиметру (мультиметру) для измерения термоэдс.

Методика и техника измерений

Изучение явления Зеебека

Для изучения явления Зеебека предлагается проградуировать две термопары по известной зависимости термоэдс эталонной термопары хромель-алюмель. Табличка с температурной зависимостью термоэдс эталонной термопары находится на рабочем месте. При градуировке термопар, т.е. получении зависимости $\varepsilon = f(t^\circ)$, значения термоэдс (ε) снимаются с соответствующего прибора, а значения температуры при данной ε определяются по таблице для эталонной термопары.

1. Определите комнатную температуру t_x по термометру, находящемуся в аудитории. Значение температуры занесите в отчет (таблица 1).

2. Используя таблицу соответствия термоэдс (мВ) термопар и температуры ($^{\circ}\text{C}$), которая находится на рабочем месте, запишите значения термоэдс для эталонной термопары хромель-алюмель от 0 мВ до 11 мВ в отчет (таблица 1).

3. Подключите мультиметры к термопарам. Переключатель видов измерений установите на измерение постоянного напряжения с пределом измерения 200 мВ.

4. Включите тумблер «Сеть». Тумблер находится на обратной стороне мультиметров.

5. Включите нагреватель в сеть 220 В.

6. Для значений термоэдс, соответствующих эталонной термопаре, снимите значения термоэдс для неизвестных термопар 1 и 2.

(Значения термоэдс необходимо снять при одной и той же температуре!)

7. Результаты измерений занесите в отчет (таблица 1).

8. По завершении эксперимента выключите нагреватель.

9. Определите разность температур, пользуясь таблицей соответствия термоэдс (мВ) термопар и температуры ($^{\circ}\text{C}$). В таблице значение термоэдс находится на пересечении вертикальной и горизонтальной колонок соответствующих температур. Занесите результаты в отчет (таблица 1).

(Например: для значения термоэдс, равного $\varepsilon = 5,33$ мВ, имеем – по горизонтали 100°C , по вертикали 30°C . Следовательно, разность температур составляет $\Delta t = 130^{\circ}\text{C}$.)

10. Определите температуру «горячего» спая в эксперименте по формуле:

$$t_r = \Delta t + t_x,$$

где Δt – разность температур «горячего» и «холодного» спаев при 0°C термопары;

t_r – температура «горячего» спая термопары в эксперименте;

t_x – температура «холодного» спая в эксперименте (равная комнатной температуре).

Таблица 1

№ п/п	Комнатная температура, t_x	Разность температур, Δt	Температура горячего спая, t_r	Термоэдс, мВ		
				Эталонная термопара хромель – алюмель	Термопара 1	Термопара 2
1						
2						
...						
10						

11. По результатам измерений постройте график зависимости термоэдс от температуры «горячего» спая $\varepsilon = \varepsilon(t)$ для трех термопар.

12. С помощью построенного графика $\varepsilon = \varepsilon(t)$ определите, используя формулу (12), удельную термоэдс градуируемых термопар в интервалах температур: (0 – 100) °С; (100 – 200) °С; (200 – 300) °С. Результаты запишите в таблицу 2.

Таблица 2

Термопары	Удельная термоэдс (α), мВ/К		
	(0 – 100) °С	(100 – 200) °С	(200 – 300) °С
Эталон ХА			
Термопара 1			
Термопара 2			

1. По результатам измерений сделайте качественный вывод о влиянии температуры на концентрацию электронов в исследуемых парах различных металлов.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. В чем заключается явление Зеебека?
2. Что такое контактная разность потенциалов?
3. От чего зависит величина внутренней контактной разности потенциалов?
4. Выведите формулу для величины контактной разности потенциалов, основываясь на представлениях классической электронной теории.
5. В чем заключается явление термоэлектричества?
6. При каком условии появляется термоэдс в цепи, состоящей из разнородных материалов?
7. Что такое удельная термоэдс, от чего зависит и в каких единицах СИ измеряется?
8. При измерении температуры предпочтительно выбирать термопару с большей или меньшей удельной термоэдс?
9. Чем определяется нижний и верхний предел измеряемых температур с помощью термопар?
10. Где используется явление Зеебека?
11. Каким образом внешняя контактная разность потенциалов связана с работами выхода соприкасающихся тел?
12. Пусть при соприкосновении тел A и B тело A зарядилось положительно. У какого из тел работа выхода больше и почему?
13. В чем состоит разница в экспериментальном осуществлении внешней и внутренней контактной разности потенциалов?
14. В чем состоят физические механизмы возникновения внутренней и внешней контактной разности потенциалов? Сравните их между собой.
15. При каких условиях электроны не могут обладать энергиями большими энергии Ферми?

16. Охарактеризуйте особенности распределения Ферми – Дирака для электронов в металлах при комнатной температуре.
17. В чем состоит связь между работой выхода и энергией Ферми?
18. Каков порядок размеров области вблизи поверхности тела, в которой проявляются силы, обуславливающие существование работы выхода?
19. Оцените величину внутренней контактной разности потенциалов между медью и калием при температуре 27 °С.
20. Каков порядок величины внутренней и внешней контактной разности потенциалов для разных металлов?
21. Может ли создаваться разность потенциалов в однородном проводнике, имеющем в разных точках различную температуру? Ответ обосновать.
22. Что такое энергия Ферми?
23. Почему происходит нагревание (охлаждение) спаев термопары при пропускании через них тока?
24. Почему полупроводниковые термоэлементы имеют значительно большую термоэдс, чем термоэлементы из металлов?
25. Что такое коэффициент теплопроводности, от чего он зависит и в каких единицах измеряется?

Глоссарий

- 1. Абсолютный нуль температуры** — минимальный предел температуры, которую может иметь физическое тело. Абсолютный нуль служит началом отсчёта абсолютной температурной шкалы, например, шкалы Кельвина. В 1954 году X Генеральная конференция по мерам и весам установила термодинамическую температурную шкалу с одной реперной точкой — тройной точкой воды, температура которой принята 273,16 К (точно), что соответствует 0,01 °С, так что по шкале Цельсия абсолютному нулю соответствует температура $-273,15$ °С.
- 2. Внешняя контактная разность потенциалов**, определяющаяся разностью работ выхода электронов из металлов, обеспечивает равенство плотностей токов термоэлектронной эмиссии.
- 3. Внутренняя контактная разность потенциалов** возникает в двойном электрическом слое, образующемся в приконтактной области, называемом контактными слоями.
- 4. Классическая электронная теория (теория Друде)** — классическое описание движения электронов в металлах. Эта теория была предложена немецким физиком Паулем Друде через 3 года после открытия электрона как частицы — в 1900 году. Она отличается простотой и наглядностью, хорошо поясняет эффект Холла, удельную проводимость в постоянном и переменном токе и теплопроводность в металлах и поэтому до сегодняшнего дня актуальна.
- 5. Контактная разность потенциалов** – это разность потенциалов между проводниками, возникающая при соприкосновении двух различных проводников, имеющих одинаковую температуру.

6. Мультиметр — комбинированный электроизмерительный прибор, объединяющий в себе несколько функций. В минимальном наборе это вольтметр, амперметр и омметр. Существуют цифровые и аналоговые мультиметры.

7. Работа выхода — разница между максимальной энергией (обычно измеряемой в электрон-вольтах), которую необходимо сообщить электрону для его «непосредственного» удаления из объёма твердого тела, и энергией Ферми.

8. Свободная энергия Гиббса (или просто **энергия Гиббса**, или **потенциал Гиббса**, или **термодинамический потенциал** в узком смысле) — это величина, показывающая изменение энергии в ходе химической реакции и дающая таким образом ответ на принципиальную возможность протекания химической реакции; это термодинамический потенциал следующего вида:

$$G = U + PV - TS.$$

9. Статистика Ферми — Дирака — квантовая статистика, применяемая к системам тождественных фермионов (как правило, частиц с полуцелым спином, подчиняющихся принципу запрета Паули, то есть, одно и то же квантовое состояние не может занимать более одной частицы); определяет распределение вероятностей нахождения фермионов на энергетических уровнях системы, находящейся в термодинамическом равновесии; предложена в 1926 году итальянским физиком Энрико Ферми и одновременно английским физиком Полем Дираком, который выяснил её квантово-механический смысл; позволяет найти вероятность, с которой фермион занимает данный энергетический уровень.

10. Термопара — (термоэлектрический преобразователь температуры — термоэлемент, применяемый в измерительных и преобразовательных устройствах, а также в системах автоматизации.

11. Термоэлектричество — представляет собой совокупность явлений, в которых разница температур создаёт электрический потенциал, или электрический потенциал создаёт разницу температур.

12. Термоток. При тесном соприкосновении (например, спайка или сварка) двух разнородных металлических проводников часть свободных электронов из металла, где концентрация их выше, а силы, удерживающие внутри металла, меньше, переходит в другой металл. В связи с этим в контактном слое образуется электрическое поле и возникает разность потенциалов. Эта разность потенциалов значительно увеличивается при нагревании спаев. При замыкании холодных концов проводников в цепи образуется ток (термоток), по величине прямо пропорциональный разности температур нагретого и холодного спаев. Термоток измеряют микроамперметром, и подобное устройство, называемое термопарой, применяют для измерения температуры электрическим методом.

13. Удельная (дифференциальная) термоэлектродвижущая сила проводника (термоЭДС) — величина, равная отношению термоэлектродвижущей силы проводников к разности температур двух контактов.

14. Фермион — по современным научным представлениям: элементарные частицы, из которых складывается вещество. К фермионам относят кварки, электрон, мюон, тау-лептон, нейтрино.

15. Химический потенциал μ — один из термодинамических параметров системы, а именно энергия добавления одной частицы в систему без совершения работы. Определение химического потенциала можно записать в виде:

$$dE = TdS - PdV + \mu dN,$$

где E — энергия системы, S — её энтропия, N — количество частиц в системе.

Эта формула определяет, кроме химического потенциала μ , также давление p и температуру T .

Можно доказать, что химический потенциал задаётся формулой

$$\mu = \frac{E - TS + PV}{N} = \frac{G}{N},$$

где G — потенциал Гиббса.

16. Энергия Ферми — одно из центральных понятий физики твёрдого тела. Энергия Ферми (E_F) системы невзаимодействующих фермионов — это увеличение энергии основного состояния системы при добавлении одной частицы. Это эквивалентно химическому потенциалу системы в ее основном состоянии при абсолютном нуле температур. Энергия Ферми может также интерпретироваться как максимальная энергия фермиона в основном состоянии при абсолютном нуле температур.

Физический смысл уровня Ферми: вероятность обнаружения частицы на уровне Ферми составляет 0,5 при любых температурах. Название дано в честь итальянского физика Энрико Ферми.

Рекомендуемая литература

1. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика. Ч.3. Оптика. Квантовая физика. Учебное пособие для технических университетов. – Томск. Изд. ТГУ. 2005. – 740 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высш. шк., 2002. 718 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн.5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. М.: АСТ, 2001. □ 368 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. шк, 2002. 542 с.
5. Шпольский Э.В. Атомная физика. Т.1. Введение в атомную физику. - М.: Наука. 1974. 576 с.