

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ Ф5

«Изучение термоэлектрических явлений»

по дисциплине

«Физические основы электронной техники»

для студентов специальности

1-36 04 02 «Промышленная электроника»

очной и заочной форм обучения

Брест 2018

УДК 538.91, 539.22.18, 548.73

Методические указания предназначены для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» очной (дневной, вечерней) и заочной форм обучения, выполняющих лабораторные работы по физическим основам электронной техники. Указания содержат теоретические сведения, описание лабораторной установки и методику измерений, а также задания для самостоятельной работы, контрольные вопросы и рекомендуемую литературу.

Составители: Н.Н. Ворсин, к. физ.-мат. наук, доцент
И.С. Янусик, старший преподаватель
М.М. Барковская, к. физ.-мат. наук, доцент

Рецензент: В. С. Секержицкий, к. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей и теоретиче-

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Ф5

«Изучение термоэлектрических явлений»

1. **Цель работы:** ознакомление с основными термоэлектрическими явлениями в металлах и полупроводниках; практическое изучение прямого (эффекта Зеебека) и обратного (эффекта Пельтье) термоэлектрических эффектов; измерение величины термо-ЭДС.
2. **Приборы и принадлежности:** компьютер; узел питания и сопряжения с компьютером; термобатарея; вентилятор.
3. **Теоретические сведения**
 - 3.1. **Термоэлектрические явления**

К *термоэлектрическим явлениям* относятся физические явления прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, а также обратные им явления охлаждения или нагревания проводников электрическим током. Так, при составлении замкнутой цепи из двух разнородных проводников в местах их соединения возникает контактная разность потенциалов, величина которой зависит только от химического состава и температуры соприкасающихся тел. Контактные разности потенциалов будут одинаковы и противоположны по знаку, если во всех точках цепи температура проводников будет одинаковой. Ток в цепи будет равен нулю, а система в целом будет находиться в состоянии термодинамического равновесия. При нагреве или охлаждении одного из спаев это равновесие нарушается. В результате чего контактные разности потенциалов разнородных спаев не компенсируют друг друга, и в цепи возникает электрический ток, называемый термоэлектрическим.

Таким образом, термоэлектрические явления обусловлены взаимосвязью тепловых и электрических процессов, происходящих в металлах и полупроводниках, а общей причиной их возникновения является нарушение теплового равновесия в потоке носителей электрического заряда.

К термоэлектрическим явлениям относят *эффект Зеебека, эффект Пельтье и эффект Томсона*. Они лежат в основе работы датчиков температуры, источников тока, в которых происходит прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Эти явления играют важную роль при любых измерениях в физике полупроводников, поэтому ознакомление с ними имеет не только познавательный, но и практический интерес.

Эффект Зеебека. Рассмотрим простейший термоэлемент (ТЭМ) – *термопару*, представляющую собой соединение двух разнородных проводников *A* и *B*, спаиваемых в точках *(A, B)* (рисунок 1). Если температура контактов различна $T_1 > T_2$, то в замкнутой цепи возникает термоэлектрический ток. Следует отметить, что при изменении знака у разности температур спаев (т. е. при $T_1 < T_2$) термоэлектрический ток будет течь в противоположном направлении. При разрыве цепи в произвольном месте, на ее концах появляется разность потенциалов, носящая название *термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС)*.

Данный эффект был обнаружен в 1821 году немецким физиком Томасом Зеебеком и заключается в том, что *в замкнутой цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников (или полупроводников) A и B, возникает термо-ЭДС, если места контактов (A, B) поддерживают при разных температурах*.

Т. Зеебек экспериментально обнаружил, что величина возникающей термо-ЭДС зависит от температур горячего T_1 и холодного T_2 спаев, образующих термопару, и природы применяемых материалов.

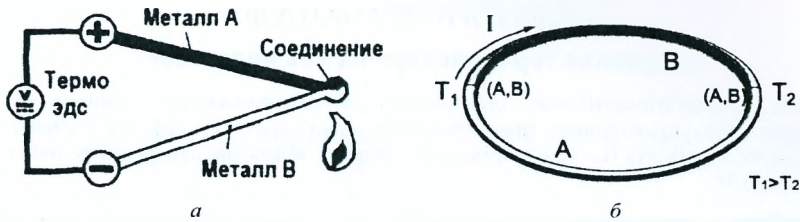


Рисунок 1 – Пояснение к эффекту Зеебека (а) и схема, иллюстрирующая возникновение термо-ЭДС в цепи из последовательно соединенных разнородных проводников (б)

В небольшом интервале температур величину термо-ЭДС U_T можно считать пропорциональной разности температур:

$$U_T = \alpha(T_2 - T_1) \quad (1)$$

где α – коэффициент термо-ЭДС или коэффициент Зеебека, определяемый, в основном, материалами, составляющими термопару ($\alpha = 10^{-4} - 10^{-5} \text{ В} \cdot \text{К}^{-1}$).

При большой разности температур было выявлено, что термо-ЭДС зависит не только от разности температур спаев. Поэтому для характеристики термоэлектрических свойств какой-либо пары проводников пользуются удельной термо-ЭДС, которая равна термоэлектродвижущей силе, возникающей при разности температур спаев в один градус.

Качественно эффект Зеебека можно объяснить следующим образом. Согласно представлениям электронной теории, проводимость металлов обусловлена наличием в них свободных электронов, находящихся в состоянии беспорядочного теплового движения. Концентрация электронов проводимости n у разных металлов неодинакова и имеет порядок $10^{25} - 10^{27} \text{ м}^{-3}$. Предположим, что концентрации электронов в двух металлах неодинаковы ($n_1 \neq n_2$). Тогда за одно и то же время через контакт из металла с большей концентрацией электронов перейдет больше, чем в обратном направлении (концентрационная диффузия). В результате, в области контакта концентрация электронов будет плавно изменяться от n_1 до n_2 . Далее рассмотрим электроны проводимости как некоторый электронный газ, удовлетворяющий представлениям молекулярно-кинетической теории идеальных газов. Поскольку их концентрации неодинаковы, то и давления, создаваемые ими в проводниках, также будут различны ($p_1 \neq p_2$). Под влиянием разности давлений возникнет поток электронов через границу раздела металлов из области большего давления в направлении основания и в области контакта дополнительно возникнет разность потенциалов $\Delta\phi_{\text{элект}}$. Равновесие наступит тогда, когда сила возникшего электрического поля с напряженностью E станет равной силе давления электронного газа. Таким образом, сторонние силы, создающие термо-ЭДС, имеют кинетическое происхождение, и одной из причин её возникновения является наличие разности в плотности электронного газа для различных металлов (более подробно рассмотрено в Приложении I).

Эффект Пельтье. Эффект был открыт в 1834 году французским физиком Жаном Пельтье, спустя 13 лет после открытия Г. Зеебека. Эффект Пельтье – явление, заключающееся в том, что при прохождении электрического тока через контакт (спай) двух различных проводников на нём, помимо теплоты Джоуля-Ленца, происходит выделение или поглощение дополнительной теплоты (в зависимости от направления тока). Эффект Пельтье является обратным по отношению к эффекту Зеебека.

В отличие от теплоты Джоуля-Ленца, которая пропорциональна квадрату силы тока, **теплота Пельтье** Q_P пропорциональна первой степени силы тока I , времени его прохождения t , и меняет знак при изменении направления тока:

$$Q_P = \Pi I, \quad (2)$$

где Π – коэффициент Пельтье, зависящий от природы находящихся в контакте материалов.

Коэффициент Пельтье можно определить как количество тепла, выделяющегося (или поглощающегося) на контакте при прохождении через него единицы заряда:

$$\Pi = \frac{Q_{\text{п}}}{I} = \frac{Q_{\text{п}}}{q} \quad (3)$$

Следует отметить, что коэффициенты Пельтье для полупроводников p -типа (например, кремния) имеют отрицательное значение, а для n -типа – положительное.

Причину возникновения эффекта Пельтье можно объяснить следующим образом. В точке соприкосновения двух проводников имеется контактная разность потенциалов, которая создаст внутреннее контактное электрическое поле с напряженностью E_k . Если через контакт протекает электрический ток, то это поле будет способствовать прохождению тока либо ему препятствовать. Если ток идет против контактного поля E_k , то внешний источник должен затратить дополнительную энергию, которая выделяется в контакте, что приведет к его нагреву. Если же ток идет по направлению контактного поля E_k , то он может поддерживаться этим полем, которое и совершает работу по перемещению зарядов. Необходимая для этого энергия отбирается у вещества, что приводит к охлаждению его в месте контакта.

Явление Томсона. Спустя 30 лет после открытия эффекта Зеебека из-за возросшего интереса ко всем видам превращения энергии, занявшись исследованием термо электрических явлений, Уильям Томсон устанавливает связь между эффектами Зеебека и Пельтье:

$$\Pi = \alpha T \quad (4)$$

В 1856 г. он открывает новое явление, которое заключается в следующем: *при прохождении тока по неравномерно нагретому проводнику (т. е. в нём поддерживается градиент температуры) помимо выделения теплоты Джоуля-Ленца происходит дополнительное выделение или поглощение теплоты, аналогично тому, как это имеет место в эффекте Пельтье.*

Рассмотрим эффект Томсона более подробно. Поскольку различные участки проводника нагреты неодинаково, то и их физические состояния различаются (рисунок 2). В той области проводника, где его температура выше, концентрация носителей заряда будет больше, поэтому градиент температуры приводит к градиенту концентрации, вследствие чего возникает диффузионный поток носителей заряда, нарушающий электронейтральность проводника. Разделение зарядов порождает электрическое поле, препятствующее его дальнейшему разделению. Таким образом, если в проводнике имеется градиент температуры, то в нем имеется объемное электрическое поле E_k .



Рисунок 2 – Схема наблюдения эффекта Томсона

Предположим, что через такой образец пропускается электрический ток под действием внешнего электрического поля E . Если ток идет против внутреннего поля E_k , то внешнее поле должно совершать дополнительную работу при перемещении зарядов относительно поля E_k , что приведет к выделению тепла, дополнительного к джоулевым потерям. Если ток (или внешнее поле E) направлен по E_k , то объемное электрическое поле E_k само совершает работу по перемещению зарядов для создания тока. В этом случае внешний источник тратит энергию для поддержания тока меньшей, чем в том случае, когда внутреннее поля E_k нет. Работа поля E_k может совершаться только за счет тепловой энергии самого проводника, поэтому он охлаждается.

Таким образом, проводник нагревается, когда поля E и E_T противоположно направлены, и охлаждается, когда их направление совпадает.

Эффект Томсона проявляется во всем объеме проводника и является внутренней, объемной модификацией эффекта Пельтье. Количество переносимой теплоты (*теплота Томсона Q_T*) пропорционально градиенту температур $(T - T_0)$ и силе протекающего тока I , и меняет свой знак при изменении направления тока:

$$Q_T = \tau(T - T_0)I, \quad (5)$$

где τ – коэффициент Томсона.

Коэффициент Томсона τ является характеристикой материала проводника, а его температурная зависимость определяет коэффициенты Зеебека и Пельтье:

$$\alpha = \int_0^T \frac{T_1}{T} dT - \int_0^{T_2} \frac{T_2}{T} dT. \quad (6)$$

Оба соотношения Томсона (4) и (6) были подтверждены экспериментально.

Таким образом, между всеми указанными явлениями существует определенная количественная связь, вытекающая из термодинамики обратимых процессов. В отличие от чисто необратимой теплоты Джоуля-Ленца, выделяемой током независимо от его направления, все термоэлектрические эффекты меняют знак с изменением направления электрического тока и градиента температуры.

3.2. Термоэлектрические явления в полупроводниках

Практическую значимость термоэлектрические эффекты получили после того, как были открыты и исследованы свойства полупроводников, в которых данные эффекты проявляются в несколько раз сильнее. В полупроводниках абсолютные значения всех термоэлектрических коэффициентов в десятки и сотни раз больше, чем в металлах и сплавах. Это связано с тем, что в полупроводниках концентрация свободных носителей заряда намного меньше, и возможен её рост с температурой. Кроме того, даже когда концентрация не меняется с температурой, то существенно меняется энергия носителей, что практически не наблюдается для металлов. Потому нагрев одного их концов полупроводника (например, *n*- типа) создаст диффузионный поток носителей заряда (электронов) от горячего конца к холодному. В результате на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остается нескомпенсированный положительный заряд (рисунок 3 а). Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не уравновесится встречным потоком электронов, созданным электрическим полем, т. е. возникает термо-ЭДС. Затем установится динамическое равновесие.

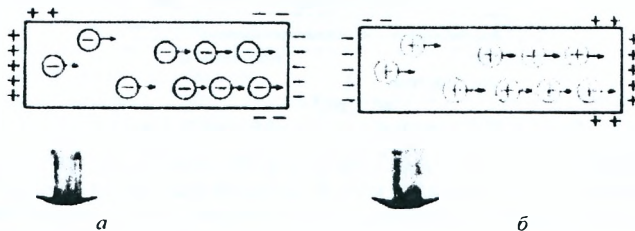


Рисунок 3 – Распределение носителей заряда при нагреве в полупроводниках *n*- типа (а) и *p*- типа(б)

В полупроводниках *p*- типа (носители заряда – дырки) описанные выше явления протекают аналогично, с той лишь разницей, что на холодном конце скапливаются положительно заряженные дырки, а на горячем остается нескомпенсированный отрицательный заряд (рисунок 3 б).

Эффект Пельтье, как и другие термоэлектрические явления, будет особенно сильно выражен в электрической цепи, составленной из последовательно соединенных полупроводников *n*- и *p*- типа, и являющейся основой для элемента Пельтье (рисунк 4). Допустим, что электрическое поле имеет такое направление, что электроны в полупроводнике *n*- типа и дырки в полупроводнике *p*- типа будут двигаться навстречу друг другу. После прохождения границы раздела электрон из свободной зоны полупроводника *n*- типа попадает в заполненную зону полупроводника *p*- типа и там занимает место дырки. В результате происходит рекомбинация электрона и дырки, и в контакте освобождается энергия в виде тепла.

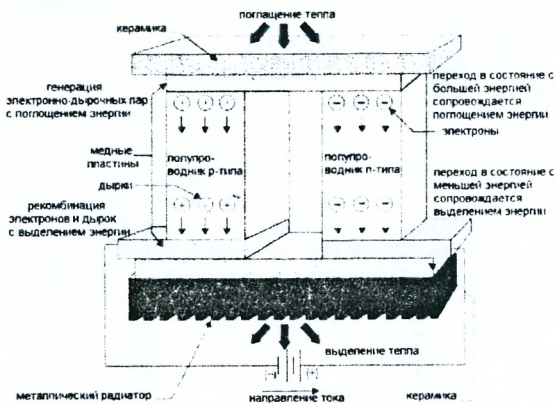


Рисунок 4 – Эффект Пельтье в полупроводниках *n*- и *p*- типа

В случае изменения направления электрического поля на противоположное электроны в полупроводнике *n*- типа и дырки в полупроводнике *p*- типа будут двигаться в противоположные стороны. Дырки, уходящие от границы раздела, будут пополняться в результате образования новых пар электронов и дырок при переходах электронов из заполненной зоны полупроводника *p*- типа в свободную зону. На образование таких пар требуется энергия, которая поставляется тепловыми колебаниями атомов решетки. Электроны и дырки, образующиеся при рождении таких пар, увлечаются в противоположные стороны электрическим полем. Поэтому, пока через контакт идет ток, непрерывно происходит рождение новых пар. В результате в контакте тепло будет поглощаться.

Таким образом, в зависимости от направления электрического тока через контакт полупроводников разного типа вследствие взаимодействия зарядов – электронов и дырок – происходит рекомбинация и образование пар зарядов, а энергия либо выделяется, либо поглощается. В результате данных взаимодействий и порожденных энергетических процессов тепло либо поглощается, либо выделяется.

Поскольку термо-ЭДС одиночного термоэлемента мала, то на практике обычно используется термобатарея (*модуль Пельтье*) – множество последовательно соединенных полупроводников *n*- и *p*- типа, образующих *p-n*- и *n-p*- переходы, каждый из которых имеет тепловой контакт с одним из двух радиаторов. Термо-ЭДС батареи равна сумме термо-ЭДС отдельных термоэлементов. Объединение большого количества пар полупроводников *n*- и *p*- типа позволяет создавать охлаждающие элементы – основу для термоэлектрического холодильника – устройство, использующее эффект Пельтье для получения холода. В результате одна из сторон охлаждающего элемента с помощью радиатора и обдува рассеивает тепло в окружающий воздух, а другая охлаждается при пропускании тока и охлаждает соприкасающийся с ней теплоизолированный объем.

4. Экспериментальная часть

4.1. Описание лабораторной установки

Для изучения прямого (эффекта Зеебска) и обратного (эффекта Пельтье) термоэлектрических явлений, а также расчёта коэффициента термо-ЭДС собрана лабораторная установка, схема которой приведена на рисунке 5. Конструктивно данная установка состоит из термобатареи и радиатора, соединённых узлом питания и сопряжения с компьютером.

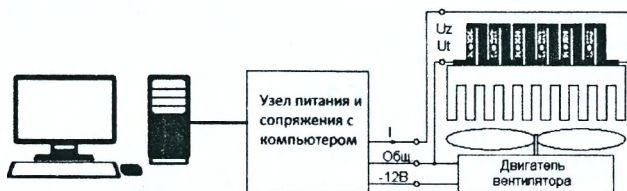


Рисунок 5 – Схема экспериментальной лабораторной установки

Термобатарея представляет собой n термоэлектрических модулей, в которых единичным элементом является термопара из двух разнородных полупроводниковых элементов с p - и n - типами проводимости (рисунок 6). Элементы соединяются между собой последовательно при помощи коммутационных пластин из меди. В термоэлектрическом модуле термопары помещаются между двух плоских керамических пластин на основе оксида алюминия, при этом с точки зрения тепловых потоков все термоэлектрические элементы соединены параллельно.

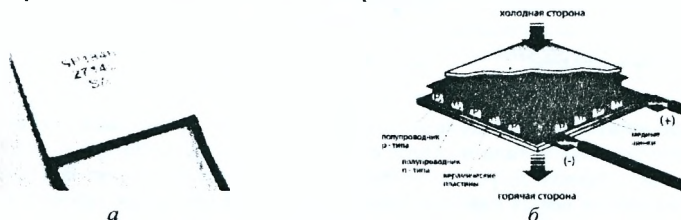


Рисунок 6 – Внешний вид термоэлектрического модуля (а) и его конструктивное исполнение (б)

Нижняя поверхность термобатареи прижата к массивному алюминиевому радиатору (для рассеивания тепла), который обдувается вентилятором. Благодаря этому на нижней стороне температура остается всегда постоянной и имеет значение, близкое к комнатной температуре. Ток на неё подается через четырехполюсный переключатель от источника питания. Верхняя поверхность термобатареи остается свободной, что позволяет изменять её температуру во время эксперимента. Так, при изучении эффекта Зеебека ее можно подогреть теплом пальца руки или ощутить её охлаждение при проверке эффекта Пельтье, потрогав поверхность пальцем при прохождении тока в цепи термобатареи.

4.2. Методика управления измерениями и снятия показаний установки

Для наблюдения эффекта Пельтье используется узел питания и сопряжения с компьютером, позволяющий пропускать через исследуемую термобатарею постоянный ток. Варьирование тока осуществляется смещением движка регулятора в нижней части экранной вкладки на мониторе компьютера.

Установка позволяет одновременно измерять напряжение на термобатареи U_z и термо-ЭДС U_T , возникающую из-за разности температур на верхней и нижней поверхностях. Для измерения термо-ЭДС U_T ток через батарею кратковременно выключается. Оба измеряемых параметра – напряжение и величина тока – индицируются на монитор компьютера.

Для запоминания в файле данных текущих значений тока и напряжений вкладка имеет кнопку «запомнить». При нажатии на неё данные, имеющиеся в текущий момент времени, записываются в виде строки в текстовый файл *actual.dat*. Одновременно наносятся точки на график и к ним прочерчиваются линии от предшествующих точек.

4.3. Методика экспериментального определения термо-ЭДС и термоэлектрической эффективности элемента

Поскольку термоэлемента состоит из n одинаковых термоэлементов, то рассмотрим процессы, происходящие только в одном из них. Пусть термоэлемент состоит из двух полупроводниковых (n - и p - типа) стержней соединенных металлической контактной перемычкой (рисунок 7), каждый из которых имеет длину l и площадь поперечного сечения S .

При прохождении электрического тока в указанном направлении нижняя перемычка нагревается (будет находиться при комнатной температуре благодаря интенсивному обдуву радиатора вентилятором). В то время как верхняя будет охлаждаться, т. е. на ней будет устанавливаться некоторая температура, отличная от комнатной, благодаря выделению теплоты Джоуля-Ленца и теплоты Пельтье.

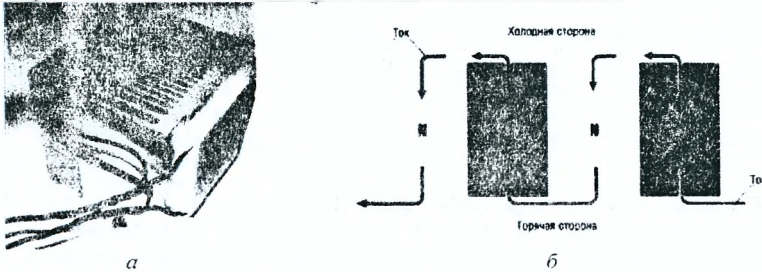


Рисунок 7 – Термоэлектрическая батарея (а) и её принципиальная схема (б)

Количество теплоты Пельтье $\delta Q_{пл}$, выделяемое в термоэлементе в единицу времени dt , с учетом формулы (1) можно выразить следующим образом:

$$\delta Q_{пл} = \Pi Idt = \alpha T_0 Idt, \quad (7)$$

где T_0 – температура холодного спая.

Выделяемое количество теплоты Джоуля-Ленца $Q_{дж}$ в единицу времени dt равно:

$$\delta Q_{дж} = I^2 r dt, \quad (8)$$

где r – омическое сопротивление одного термоэлемента.

Будем считать, что количество теплоты Джоуля-Ленца $\delta Q_{дж}$ распределяется поровну между горячим и холодном спаями.

Тогда в области контакта двух полупроводников, имеющих различную температуру, будет выделяться количество теплоты δQ_T , поток которой идет от горячего спая к холодному и зависит от теплопроводности ветвей термоэлемента:

$$\delta Q_T = \chi (T - T_0) \frac{2S}{l} dt, \quad (9)$$

где χ – коэффициент теплопроводности полупроводниковых стержней.

$2S$ – суммарная площадь их поперечного сечения (2 – количество стержней).

Через некоторое время установится тепловое равновесие, когда количество выделяющегося тепла будет равно теплу, переходящему на первый контакт и в воздух из-за теплопроводности. Запишем уравнение теплового баланса:

$$\delta Q_T = \delta Q_{пл} - \delta Q_{дж}, \quad (10)$$

или

$$\chi(T - T_0) \frac{2S}{l} = \alpha T_0 I - \frac{1}{2} I^2 r. \quad (11)$$

Из равенства (11) определим равновесную разность температур:

$$\chi(T - T_0) = \frac{\alpha T_0 I - \frac{1}{2} I^2 r}{2S} l. \quad (12)$$

Омическое сопротивление пары стержней, образующих термоэлемент, можно выразить через параметры: длину l , площадь поперечного сечения S и удельное сопротивление ρ :

$$r = \frac{2\rho l}{S}. \quad (13)$$

Подставив полученное выражение в формулу (12), получим:

$$\chi(T - T_0) = \frac{\alpha T_0 I - \frac{1}{2} I^2 \frac{2\rho l}{S}}{2S} l = \frac{\alpha T_0 I \rho l}{2S\rho} - \frac{1}{2\rho} \left(\frac{l\rho}{S} \right)^2. \quad (14)$$

В выражении (4) величину $\frac{2I\rho l}{S}$ обозначим как напряжение U , равное разности напряжения U_Z на термоэлементе и термо-ЭДС U_T .

$$U = U_Z - U_T. \quad (15)$$

Следовательно, уравнение (14) можно записать в следующем виде:

$$(T - T_0) = \frac{\alpha T_0 U}{4\rho\chi} - \frac{1}{8\rho\chi} U^2. \quad (16)$$

Следует учесть, что материалы для термоэлектрических преобразователей характеризуются таким параметром как **термоэлектрическая эффективность элемента** (термоэлектрическая добротность) Z , который связан с максимальной разностью температур контактов ΔT_{\max} соотношением:

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} Z T^2. \quad (17)$$

Параметр Z для металлических термоэлементов равен $\sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, для полупроводниковых материалов $\sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, и определяется только физическими свойствами материала: термо-ЭДС α , электропроводность σ и теплопроводность χ :

$$Z = \frac{\alpha^2}{\sigma\chi}. \quad (18)$$

Следовательно, умножив выражение (16) на величину α , перенишем его с учетом параметра Z :

$$\alpha(T - T_0) = Z \left(\frac{T_0 U}{4} - \frac{U^2}{8\alpha} \right). \quad (19)$$

Выразим термоэлектрическую эффективность Z термоэлемента с учетом формулы (15):

$$Z = \frac{4U_T}{T_0(U_Z - U_T) - \frac{(U_Z - U_T)^2}{2\alpha}}. \quad (20)$$

Формула (20) справедлива и для термобатарей из последовательно соединенных n термоэлементов, поскольку измеряются суммарные величины nU_T , nU_Z , $n\alpha$ и при их подстановке количество элементов n сокращается.

Таким образом, задача определения термоэлектрической эффективности Z элемента сводится к измерению с помощью вольтметра величин термо-ЭДС U_T и напряжения U_Z на термоэлементе, и к определению величины термо-ЭДС α . Если напряжение на термоэлементе невелико, то вторым слагаемым в знаменателе формулы (20) можно пренебречь, и термоэлектрическая эффективность Z приблизительно равна:

$$Z \approx \frac{4U_T}{T_0(U_Z - U_T)}. \quad (21)$$

5. Задания для самостоятельной работы

1. Ознакомьтесь с элементами лабораторной установки и зарисуйте схематическое изображение её строения в тетради.
2. Включите компьютер. На рабочем столе откройте папку «seebeck_peltier» и запустите на исполнение файл zeebeck.exe (помечен серой).
3. Нажмите на появившейся вкладке кнопку «Пуск». После появления сообщения об открытии порта нажмите кнопку «ОК». В верхней части монитора компьютера появятся следующие значения: n – номер отсчёта, I – величина тока, U_Z – напряжение на термобатарее, U_T – термо-ЭДС.
4. Включите вилку питания установки в розетку электросети, индикатором включения является вентилятор, который должен завращаться. Установка готова к проведению эксперимента.
5. Проверьте эффект Зеебека с помощью лабораторной установки. Для этого верхнюю поверхность термобатареи нагрейте пальцем руки. Запишите в тетради наблюдаемую на мониторе компьютера величину термо-ЭДС U_T . Определите температуру окружающей среды.
6. Изучите эффект Пельтье с помощью лабораторной установки. Для этого измерьте напряжение U_Z и равновесную величину термо-ЭДС U_T при прохождении электрического тока I через термобатарею. Полученные данные сохраните нажатием кнопки «Запомнить».
7. Накопите файл соответствующих данных для построения графика зависимости напряжений U_Z и U_T от величины тока I , изменяя значение тока в диапазоне от 0 до 5 А с шагом 0,2 А. Для этого повторите последовательно ряд следующих операций:
 - измените положение движка – регулятора тока – на 1-2 позиции, контролируя величину тока;
 - выдержите временную паузу до наступления термоэлектрического равновесия;
 - нажмите кнопку «запомнить».

После этого текущие значения тока I и напряжений U_Z и U_T записываются в файл *actual.dat*, и на мониторе экрана добавляются новые точки графиков зависимости, схематически представленные на рисунке 8. Синей линией (на рисунке 8 обозначено под цифрой 1) прорисовывается график $U_Z(I)$, а красной (на рисунке 8 обозначено под цифрой 2) – $U_T(I)$.

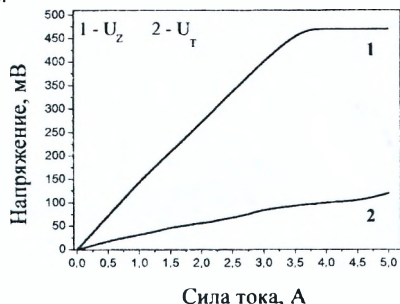


Рисунок 8 – Схематическое изображение графика зависимостей $U_Z(I)$ и $U_T(I)$

8. Выключите установку после завершения эксперимента.

6. Обработка результатов эксперимента

6.1. Изучив эффект Зеебека, вычислите коэффициент термо-ЭДС α по формуле:

$$\alpha = \frac{U_T}{\Delta T} = \frac{U_T}{T - T_0},$$

где T – температура пальца руки, равная 33°C .

6.2. Изучив эффект Пельтье и используя данные файла *actual.dat*, постройте графики зависимости напряжения U_Z от величины тока I и зависимости величины напряжения термо-ЭДС U_T от величины тока I .

6.3. Используя накопленные данные, с помощью программного обеспечения *Microsoft Excel* (или другого) определите термоэлектрическую эффективность исследуемой термобатареи Z по формуле (21).

6.4. Аппроксимируя зависимость $U_T = f(U_Z - U_T)$, рассчитайте коэффициент термо-ЭДС исследуемого элемента (для выдающихся студентов).

6.5. Сделайте соответствующие выводы.

Приложение 1. Причины возникновения термо-ЭДС

В замкнутой цепи, составленной из двух или более разнородных металлов или полупроводников, градиенты температур вызывают появление электродвижущих сил (ЭДС) благодаря тепловому движению электронов (или дырок) в месте их контактов. Возникновение термо-ЭДС обусловлено тремя причинами:

1) зависимостью уровня Ферми от температуры, приводящей к появлению контактной составляющей термо-ЭДС;

2) диффузией носителей заряда (электронов или дырок) от горячего конца к холодному, определяющей объемную составляющую термо-ЭДС;

3) процессом увлечения электронов фононами, определяющим фоннную составляющую термо-ЭДС.

Рассмотрим первую причину. Покажем возникновение контактной составляющей термо-ЭДС, воспользовавшись представлениями зонной теории. Рассмотрим зонные энергетические диаграммы двух металлов до их соприкосновения (рисунок 9 а), на которых схематически представлены энергетические уровни зоны проводимости, вписанные в потенциальную яму (пунктиром обозначены незачятые уровни). Пусть E_0 – энергия покоящегося электрона проводимости в вакууме, где его потенциальная энергия равна нулю (на рисунке 9 а выбрана за начало отсчёта энергии), а E_F – энергия Ферми, т. е. максимальная кинетическая энергия электрона проводимости в металле при температуре $T = 0\text{ K}$.

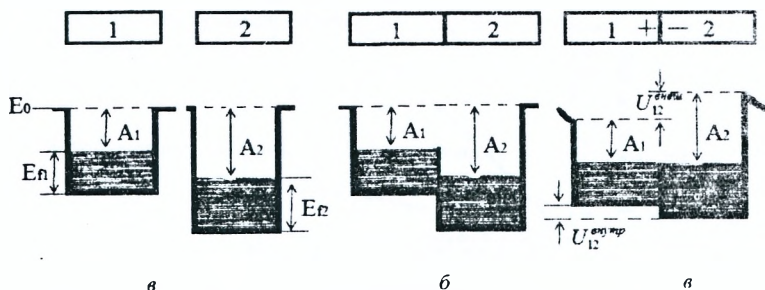


Рисунок 9 – Энергетическая диаграмма двух металлов между которыми:
 а – нет контакта, б – в контакте, но нет равновесия,
 в – в контакте, есть равновесие

Тогда относительно этого уровня кинетическая энергия электрона проводимости в металле зависит от температуры и уровня Ферми, а потенциальная энергия определяется его внутренней потенциальной энергией $e\phi$ и эффективной работой выхода $A_{\text{вых}}$:

$$A_{\text{вых}} = e\phi, \quad (\text{П1})$$

где e – абсолютная величина заряда электрона, равная $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

ϕ – контактный потенциал данного металла (имеющий значение в пределах от 1 до 10 В).

Следовательно, полная энергия электрона проводимости равна $E_f - e\phi$.

Допустим, что у двух разнородных металлов работа выхода не одинакова ($A_{\text{вых}1} < A_{\text{вых}2}$), тогда у них также различны уровни Ферми ($E_{f1} > E_{f2}$) и концентрация электронов проводимости $n_1 > n_2$.

При сближении двух металлов на расстояние порядка периода кристаллической решетки, резко возрастает вероятность перехода электронов из одного металла в другой, т. е. возникает диффузия электронов проводимости (рисунок 9 б). Поскольку в металле 1 имеются заполненные энергетические уровни, расположенные выше уровня Ферми E_{f2} металла 2, то при контакте металлов электроны металла 1 с высших уровней будут переходить на нижележащие свободные уровни металла 2, расположенные выше уровня Ферми E_{f2} . Это приведет к тому, что металл 2 будет заряжаться отрицательно, а металл 1 – положительно. Одновременно происходит относительное смещение энергетических уровней: в положительно заряжающемся металле 1 все уровни (в том числе и уровень Ферми) смещаются вниз, а в отрицательно заряжающемся металле 2 – вверх (рисунок 9 в). В области контактов возникает электрическое поле, следовательно, и **внутренняя контактная разность потенциалов**, препятствующая дальнейшему перемещению электронов. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока между соприкасающимися металлами не установится динамическое равновесие, которое характеризуется выравниванием уровней Ферми в обоих металлах (рисунок 9 в).

Совмещение уровней Ферми определяется равенством полной энергии электронов в металлах:

$$E_{f1} + e\phi_1 = E_{f2} + e\phi_2. \quad (\text{П2})$$

Отсюда следует выражение для **внутренней контактной разности потенциалов**:

$$U_{12}^{\text{внутр}} = \phi_1 - \phi_2 = \frac{E_{f1} - E_{f2}}{e}. \quad (\text{П3})$$

После установления динамического равновесия свободные концы металлов имеют теперь разные потенциальные энергии, т. к. выравниваются только уровни Ферми, а работа выхода металлов $A_{\text{вых}1}$ и $A_{\text{вых}2}$ не изменяется. Следовательно, между ними устанавливается внешняя контактная разность потенциалов, которая, как следует из рисунка 1 в, равна:

$$U_{12}^{\text{внеш}} = \phi_2 - \phi_1 = \frac{A_2 - A_1}{e} \quad (\text{П4})$$

Внешняя контактная разность потенциалов или просто контактная разность потенциалов, равна разности контактных потенциалов двух металлов или разности работ выхода для второго и первого металлов, деленной на заряд электрона.

Если создать замкнутую цепь из двух разнородных проводников, находящихся при одинаковой температуре, то в каждом из контактов возникнет внутренняя контактная разность потенциалов, равная по величине и имеющая противоположные знаки, поэтому электрического тока в такой цепи не будет (по правилу Вольты результирующая контактная разность потенциалов равна нулю).

Однако, если контакты замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, поддерживать при различных температурах ($T_1 \neq T_2$), то сумма скачков потенциала в спаях будет отлична от нуля, и в цепи возникает термо-ЭДС, и следовательно, электрический ток, направление которого изменяется при изменении знака разности температур.

Тогда термо-ЭДС, обусловленная контактными разностями потенциалов, определяется следующим образом (вывод формулы не приводится):

$$\varepsilon_k = \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{e} \frac{dE_{f2}}{dT} dT - \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{e} \frac{dE_{f1}}{dT} dT. \quad (115)$$

Рассмотрим вторую причину. Вторая составляющая термо-ЭДС связана с процессами, влияющими на появление стороннего поля в проводнике, и обусловлена объёмными эффектами. Рассмотрим однородный металлический проводник, концы которого поддерживаются при разных температурах (рисунок 10). Предположим, что $T_1 > T_2$. Если вдоль проводника существует градиент температуры dT/dx , то через него будет идти постоянный поток тепла, перенос которого осуществляется движением электронов проводимости. Тогда электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии (соответственно и скорости), чем на холодном. Диффузионный поток электронов, возникающий за счёт градиента концентрации электронов с данными значениями энергий, будет направлен против градиента температуры. В результате, на холодном конце проводника появляется отрицательный потенциал, а на горячем – положительный. Внутри объёма самого проводника возникает электрическое поле E_T , направленное против градиента температуры и препятствующее дальнейшему разделению зарядов.

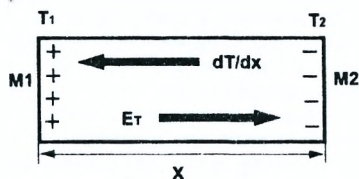


Рисунок 10 – Возникновение термо-ЭДС в однородном проводнике вследствие пространственной неоднородности температуры

При соединении двух проводников этот процесс происходит в каждом из них и продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов (на концах каждого из проводников) не вызовет поток электронов, равный первичному в обратном направлении. В результате чего в цепи установится равновесие.

Следует также отметить, что описанные выше процессы возникновения электрического поля внутри неравномерно нагретого металла имеют место и в полупроводниках. Так, при наличии градиента температуры в полупроводнике p - типа дырки – носители заряда – диффундируют в большом числе к холодному концу и создают вблизи него избыточный положительный заряд. Поэтому у полупроводников p - типа потенциал холодного конца будет выше, чем потенциал нагретого. У полупроводников n - типа – наоборот.

Таким образом, в равновесном состоянии наличие градиента температуры вдоль соединенных проводников создает постоянную разность потенциалов на его концах – диффузионную (или объёмную) составляющую термо-ЭДС, определяемой температурной зависимостью концентрации носителей заряда и их подвижностью.

Рассмотрим третью причину. Термоэлектрические явления могут возникать в твёрдых телах, имеющих кристаллическую структуру, в которой узлы кристаллической решетки непрерывно совершают колебательные движения (в основном это тепловые колебания). С точки зрения квантовой механики колебательные движения решетки можно моделировать фононами – частицами, подобными квантам света, но движущимися со скоростью звука.

При наличии градиента температуры в проводнике число фононов, движущихся от горячего конца к холодному, будет больше, чем в обратном направлении. В результате вдоль проводника возникает направленный поток фононов. Сталкиваясь с электронами, фононы увлекут их за собой, и на холодном конце проводника будет возникать отрицательный потенциал (на горячем – положительный). Процесс будет идти до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не уравнивает эффект увлечения.

Эта разность потенциалов и представляет собой дополнительную третью составляющую термо-ЭДС, вклад которой при низких температурах становится определяющим.

Тогда термо-ЭДС металла A на участке цепи от спая, находящегося при температуре T_2 до спая, при температуре T_1 определяется выражением:

$$\varepsilon_A = \int_A^B d\varphi = \int_A^B \frac{d\varphi_A}{dT} dT = \int_{T_1}^{T_2} \beta_1 dT, \quad (П6)$$

где β_1 – коэффициент объемной термо-ЭДС в первом металле.

Аналогично определяется термо-ЭДС для металла B :

$$\varepsilon_B = - \int_A^B d\varphi = - \int_A^B \frac{d\varphi_B}{dT} dT = - \int_{T_1}^{T_2} \beta_2 dT, \quad (П7)$$

где β_2 – коэффициент объемной термо-ЭДС во втором металле.

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

$$\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_k + \varepsilon_A + \varepsilon_B. \quad (П8)$$

Подставив выражения (П5) – (П7) в равенство (П8), получим:

$$\varepsilon_T = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_A dT - \int_{T_1}^{T_2} \alpha_B dT = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{AB} dT, \quad (П9)$$

где $\alpha = \beta - \frac{1}{e} \frac{dF_f}{dT}$ – коэффициент термо-ЭДС, являющийся функцией температуры.

Величина $\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$ называется *дифференциальной (удельной) термо-ЭДС* данной пары металлов и характеризует возрастание термо-ЭДС для данной пары металлов при нагревании одного из спаев на 1 К. Если контакт образован парой из полупроводников n - и p - типа, то $\alpha_{AB} = \alpha_A + \alpha_B$ (коэффициенты α_A и α_B имеют разный знак). Для большинства пар металлов величина α_{AB} имеет порядок $(10^{-5} - 10^{-4})$ В·К⁻¹; для полупроводников она гораздо больше (до $1,5 \cdot 10^{-3}$ В·К⁻¹).

В отдельных случаях дифференциальная термо-ЭДС слабо зависит от температуры. Тогда формулу (П9) можно приближенно представить в виде:

$$\varepsilon_T = \alpha_{AB} (T_2 - T_1). \quad (П10)$$

В заключение отметим, что между контактной разностью потенциалов и термо-ЭДС существует принципиальная разница. Контактные потенциалы имеют сравнительно большую величину (порядка нескольких вольт) и характеризуют электрическое поле вне проводников между их наружными поверхностями. Контактная разность потенциалов – статический эффект, не исчезающий при абсолютном нуле температур. В противоположность тому термо-ЭДС представляет собой кинетический эффект, наблюдаемый при наличии потоков тепла и исчезающий при абсолютном нуле. При этом возникающие разности потенциалов по абсолютной величине малы.

Приложение 2. Термоэлектрические приборы и их практическое применение

Термоэлектрические явления нашли практическое использование только в середине XX в. благодаря работам выдающегося советского ученого – физика Абрама Федоровича Иоффе. Он заложил основу для развития самостоятельной области техники – термоэнергетики, которая занимается вопросами прямого преобразования тепловой энергии в электрическую (эффект Зеебека), так и вопросами термоэлектрического охлаждения и нагрева (эффект Пельтье). В настоящее время создано множество различных устройств для измерения температуры, а также охлаждающих и обогревающих приборов. Рассмотрим их более подробно.

Термоэлектрические приборы, работающие на эффекте Зеебека

Термопара – простейший термоэлектрический прибор, представляющий собой две проволоки из различных металлов, в месте контактов которые спаиваются или свариваются (рисунок 3). Для защиты от внешних воздействий рабочий спай термопары обычно помещается в защитную тугоплавкую оболочку (например, керамическую трубку).

В технике термопары применяют для контроля и измерения температуры. Если для термопары известна постоянная и один из её спаев держать при известной и постоянной температуре T_0 , то по возникающей термо-ЭДС, измеренной вольтметром, можно определить температуру T области, в которой она измеряется. Кроме этого, существует возможность использовать их для дистанционного контроля температуры.



1 – защитная гильза, 2 – штуцер, 3 – головка, 4 – розетка, 5 – патрбук, 6 – трубка.
7 – термоэлектроды, 8 – погружаема часть длиной L

Рисунок 11 – Внешний вид термопары (а) и схематическое изображение щупа (б)

Диапазон температур, измеряемых при помощи термопар, очень велик (таблица). Термопары применяются как для измерения ничтожно малых разностей температур, так и для измерения очень высоких и очень низких температур (например, внутри доменных печей или жидких газов). Точность определения температуры с помощью термопар составляет, как правило, несколько кельвин, и только для некоторых особо однородных сплавов может достигать $\approx 0,01$ К.

Таблица – Основные типы термопар и их параметры в соответствии с международной спецификацией

Обозначение, ANSI	Материал электродов		Диапазон рабочих температур, °С	Максимальная погрешность
	положительного	отрицательного		
J	железо (Fe)	константан (Cu-Ni)	от -210 до +1200	2,2 °С или 0,75%
K	хромель (Cr-Ni)	алюмель (Ni-Al)	от -270 до +1372	2,2 °С или 0,75%
T	медь (Cu)	константан (Cu-Ni)	от -270 до +400	1,0 °С или 0,75%
E	хромель (Cr-Ni)	константан (Cu-Ni)	от -270 до +1000	1,7 °С или 0,50%
N	никросил (Ni-Cr-Si)	нисил (Ni-Si-Mg)	от -270 до +1300	2,2 °С или 0,75%
R	платина-родий (Pt-Rh 13 %)	платина (Pt)	от -50 до +1768	1,5 °С или 0,25%
S	платина-родий (Pt-Rh 10 %)	платина (Pt)	от -50 до +1768	1,5 °С или 0,25%
B	платина-родий (Pt-Rh 30 %)	платина-родий (Pt-Rh 6 %)	от 0 до +1820	0,5% свыше 800 °С
C	вольфрам-рений (W-Re 5 %)	вольфрам-рений (W-Re 26 %)	от 0 до +2320	4,5 °С до 425 °С 1 % до 2320 °С

При высоких температурах зависимость ЭДС термопары ϵ от температуры T близка к линейной, соответственно чувствительность $d\epsilon/dT$ слабо зависит от температуры. При низких температурах чувствительность большинства термопар (за исключением специальных низкотемпературных) падает при приближении к абсолютному нулю температуры. Например, при комнатной температуре чувствительность медь-константановой термопары составляет порядка 40 мкВ/К, а при температуре жидкого азота ($T=77$ К) чувствительность уже 10 мкВ/К. Для повышения чувствительности термопары можно последовательно соединять в термобатарей.

Для изготовления измерительных термопар выбираются пары металлов или сплавов, дающие достаточно большие, стабильные и воспроизводимые термо-ЭДС. Для наиболее точных измерений, а также для работы при очень высоких температурах применяются не очень чувствительные, но высокостабильные термопары, в которых измеряемый диапазон температур ограничивается термостойкостью самих проводов. Так, например, термопара из платины и сплава (платина с 10 % родия) имеет стандартную градуировку от 0 до 1600 °С, а в области температур 630–1064 °С является *эталонным интерполяционным прибором* для установления практической температурной шкалы по реперным точкам затвердевания сурьмы, серебра и золота.

Термопары хромель-алюмель (сплавы никеля с хромом и алюминия) обладают большой термо-ЭДС и хорошей стойкостью к высоким температурам (до 1400 °С). При более низких температурах (до 400 °С) хорошо работает термопара медь-константан (60 % Cu, 40 % Ni), особенно удобная тем, что она изготавливается из хорошо распространенных электротехнических материалов.

Конструктивное исполнение термопар, применяемых для работы в области низких и высоких температур, также различно. Так, высокотемпературные термопары заключаются в металлический чехол с герметизацией на холодном конце и изготавливают сваркой голых проводов диаметром 0,2–0,5 мм, электроизоляция выполняется керамической соломкой. В низкотемпературных (ниже 100 °С) термопарах применяются простые электроизолированные провода, а измерительный спай сплавается обычным припоем.

Термо-ЭДС сильно зависит от состава проводников и наличия в них примесей. Следовательно, термопары требуют индивидуальной градуировки. Для облегчения градуировки пользуются справочными таблицами, составленными по усредненным данным для большого числа термопар данного типа. Следует отметить, что полуметаллы (висмут, сурьма) и особенно полупроводниковые материалы позволяют получить значительно более высокую чувствительность, чем металлы. Однако они не годятся для термометрии, поскольку из них невозможно изготовить гибкую проволоку, и они обладают плохой воспроизводимостью (свойства полупроводников определяются небольшим количеством легирующих примесей и поэтому воспроизводимости их свойств всегда хуже, чем у металлов и металлических сплавов). Полупроводниковые элементы применяются в прямом преобразовании энергии из тепловой формы в электрическую и наоборот.

Термоэлектрический генератор электроэнергии – устройство, представляющее собой последовательно соединенные полупроводники n - и p - типа, токи которых совпадают по направлению и усиливают друг друга. Такой генератор является компактным автономным бесшумным источником энергии, не имеющим движущихся частей. Кроме того, он прост в обслуживании, надежен и очень долговечен.

Всем известен знаменитый «Партизанский котелок», разработанный в годы Великой Отечественной войны академиком А. Ф. Иоффе. Специально для партизанских отрядов им был разработан термоэлектродгенератор, служивший источником питания для радиоприемников и передатчиков. Он состоял из нескольких десятков термопар сурьмянистых цинк-константан, крепившихся ко дну солдатского котелка. Когда в котелок наливали воду и помещали над костром, спаи термопар, размещенные в его дне, нагревались пламенем костра, а другие – внутренние – оставались холодными (имели температуру воды). Перепада температур в 250–300 °С было достаточно чтобы выработать электроэнергию для надежного обеспечения питания переносной радиоаппаратуры. Подобные термогенераторы-котелки помогали партизанам радиосвязь, были просты по конструктивному оформлению и в эксплуатации и готовы к использованию в любое время.

Термоэлектрические охлаждающие приборы, работающие на эффекте Пельтье

Модуль (элемент) Пельтье – устройство, основой которого служат полупроводники, состоящие из одной или более пар полупроводниковых параллелепипедов n - и p - типа. В качестве термоэлектрических материалов в производстве охлаждающих устройств наиболее часто используется теллурид висмута и германид кремния (см. рисунок 6). Полупроводники попарно соединяются металлическими легкоплавкими перемычками, выполняющими роль термоконтактов и напрямую соприкасающимися с керамической пластиной или подставкой. Поскольку пары полупроводников соединены последовательно, то разные виды проводимости контактируют друг с другом. С одной стороны модуля имеются лишь n - p - переходы, с другой – p - n - переходы. При прохождении электрического тока через элемент Пельтье на его сторонах наблюдается тепловой эффект: группы противоположных контактов либо охлаждаются, либо нагреваются в зависимости от направления тока. Поэтому можно говорить о переносе током тепловой энергии с одной стороны модуля Пельтье на другую и, как следствие, возникновении на нем разности температур.

Экономичность работы такого термоэлемента определяется **холодильным коэффициентом**, который равен отношению количества тепла, поступающего на холодный спай, к количеству электрической энергии, потребляемой термоэлементом. Холодильный коэффициент термоэлектрического модуля существенным образом зависит от разности температур (резко снижается с ее увеличением), поэтому при больших перепадах температур модуль работает неэкономично. Для его повышения используют каскадирование термоэлектрических модулей. Каскадная батарея представляет собой конструкцию, состоящую из нескольких термоэлектрических модулей, технически сопряженных между собой по тепловому потоку последовательно, т. е. холодная сторона одних модулей отводит тепло от горячих спаев других.

Каскадирование применяется в устройствах с малым тепловыделением и позволяет распределить общий перепад температур между каскадами и тем самым получить выигрыш в величине потребляемой мощности, а его важным достоинством является увеличение предельно допустимого перепада температур.

Термоэлектрические охлаждающие устройства нашли применение в различных областях жизнедеятельности человека, в частности в военной технике, медицине, электронной технике и других областях, где термоэлектрический способ охлаждения является единственно приемлемым. Их применение существенно улучшает характеристики изделий электронной техники, делает их работу надежной и стабильной, повышает их быстродействие. Так, модули Пельтье широко используются там, где возникает необходимость охлаждения и термостатирования различных электронных устройств – от маломощных микросхем, фотоэлектроники и процессоров до электронных шкафов систем телекоммуникаций (например, в диодных лазерах с целью стабилизации длины волны их излучения, в цифровых фотокамерах, позволяющих добиться заметного уменьшения теплового шума при длительных экспозициях).

Элементы Пельтье – основа компактных холодильников потребительского назначения, к которым можно отнести портативные пикник-боксы, переносные домашние холодильники, охладители для напитков, стационарные охладители-фильтры воды и др. Использование постоянного тока делает очень удобным применение термоэлектрических охладителей на транспорте. В настоящее время разработаны автомобильные мини-холодильники, автомобили с термостатированным кузовом, охладители питьевой воды для самолетов и пассажирских железнодорожных вагонов.

По сравнению с другими системами охлаждения термоэлектрические охлаждающие устройства имеют такие преимущества, как: неограниченный ресурс работы, отсутствие хладагентов, надежность, малые габариты и вес, бесшумность, независимость от ориентации в пространстве, локальное охлаждение, высокая экологичность.

Основными ограничивающими факторами, сдерживающими массовое применение эффекта Пельтье в системах охлаждения, являются необходимость наличия источника тока для их работы, низкий КПД; большая потребляемая мощность для достижения заметной разности температур и, как следствие, существенное тепловыделение, а также невысокая термоэлектрическая добротость полупроводниковых материалов на основе теллурида висмута.

В то же время необходимо отметить, что прямое преобразование энергии с помощью термоэлектричества имеет колоссальные возможности и его преимущества использованы еще не полностью. Об этом свидетельствует тот факт, что приборы, работающие на эффекте Пельтье и Зеебека, нашли широкое распространение. С каждым годом продолжают работы по конструктивному и технологическому их совершенствованию, созданию новых приборов и выявлению новых областей их применения.

Контрольные вопросы:

1. Какие явления называются термоэлектрическими?
2. В чем заключается явление Зеебека?
3. В чем заключается явление Пельтье?
4. В чем заключается явление Томсона?
5. Каков физический смысл коэффициентов Зеебека, Пельтье и Томсона? Какова их взаимосвязь?
6. Почему в полупроводниках эффект Пельтье имеет значительно большую величину, чем в проводниках?
7. Что такое термоэлектрическая эффективность элемента, чем определяется ее величина?
8. Из каких элементов состоит лабораторная установка? Объясните принцип её работы.
9. Какие причины обуславливают возникновение термо-ЭДС в проводниках?
10. Объясните контакт двух проводников согласно зонным энергетическим диаграммам.
11. Что такое термопара? Где она находит применение?
12. Привести примеры устройств, основанных на явлении Пельтье.

Список литературы

1. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – М.: Высш. шк., 1987. – 478 с.
2. Зисман, Г. А. Курс общей физики в 3 т. / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – М.: Наука, 1974. – Том 2. Электричество и магнетизм. – 366 с.
3. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М.: Физматлит, 2003. – 624 с.
4. Иоффе, А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы / А. Ф. Иоффе, Л. С. Стильбанс, Е. К. Иорданишвили, Т. С. Ставицкая. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956. – 108 с.
5. Булат, Л. П. Термоэлектрические охлаждающие устройства: метод. указания для студентов спец. 070200 “Техника и физика низких температур” / Л. П. Булат, Е. В. Бузин. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2001. – 41 с.

Учебное издание

Составители:

*Николай Николаевич Ворсин
Ирина Семёновна Янусик
Марина Михайловна Барковская*

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ Ф5

«Изучение термоэлектрических явлений»

по дисциплине

«Физические основы электронной техники»

для студентов специальности

1-36 04 02 «Промышленная электроника»

очной и заочной форм обучения

Ответственный за выпуск: Янусик И.С.

Редактор: Боровикова Е.А.

Корректор: Никитчик Е.В.

Компьютерная вёрстка: Боровикова Е.А.

Подписано к печати 1.10.2018 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага писчая.
Усл. п. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,25. Заказ № 1161. Тираж 25 экз. Отпечатано
на ризографе Учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.