

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

**Цель лабораторной работы:** практическое и теоретическое изучение термоэлектрических явлений (прямого и обратного термоэлектрического эффекта).

### **Задание по лабораторной работе.**

1. Получить задание.
2. Рассчитать параметры прямого и обратного термоэлектрического эффекта.
3. Провести исследование эффекта Пельтье и эффекта Зеебека в полупроводниках.
4. Проанализировать результаты лабораторной работы, сформулировать краткие выводы.

### **Теоретическая часть**

Если привести в соприкосновение два разных металла или металл и полупроводник либо два полупроводника разных типов, то между ними возникнет разность потенциалов, которая называется контактной. Контактная разность потенциалов обусловлена тем, что при соприкосновении часть электронов переходит из одного контактирующего элемента в другой, а у полупроводников переходят также и дырки. Физическая граница контакта является потенциальным барьером. Вследствие различия значений энергии, необходимой для преодоления барьера в каждом из контактируемых элементов, диффузный поток электронов (и дырок в случае полупроводников) через границу не будет уравновешенным, и элемент с меньшей работой выхода зарядится положительно.

В результате различия концентрации носителей зарядов слева и справа от границы контактирующих элементов возникнет скачок потенциала в месте контакта. Возникшее в месте контакта поле объемного заряда будет тормозить дальнейший переход зарядов через границу, и поэтому дальнейший переход зарядов прекратится, а в месте контакта установится некоторая разность потенциалов, называемая внутренней контактной разностью потенциалов.

Термоэлектрические явления в полупроводниках обусловлены эффектами Пельтье, Томсона и Зеебека.

**Эффект Пельтье** заключается в том, что во время пропускания через контакт двух разнородных полупроводников (а также проводников) электрического тока в зависимости от его направления в контакте выделяется или поглощается количество теплоты, дополнительное к джоулевой теплоте.

Эффект Пельтье проявляет свои свойства в процессах выделения или поглощения количества теплоты ( $Q_{\text{П}}$ ) областью контакта двух разнородных полупроводников или полупроводника и металла.

Численное значение  $Q_{\text{П}}$  определяется значением электрического тока  $I$ , протекающего через структуру контакта:

$$Q_{\text{П}} = \pm \Pi I t = \pm \Pi q,$$

где  $\Pi$  — коэффициент Пельтье;  $t$  — время протекания тока;  $q$  — количество прошедшего электричества.

Из приведенной формулы следует, что коэффициент Пельтье — это тепловая энергия, переносимая через место контакта, приходящаяся на электрон в единицу времени.

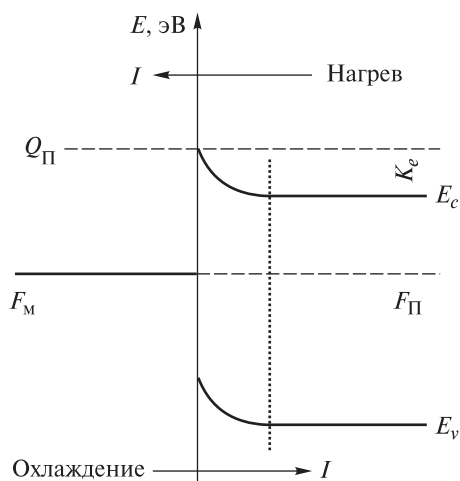
Коэффициентом теплопроводности называется физическая величина, равная количеству теплоты, которое переносится через единичную поверхность за 1 с, если градиент температур равен единице.

В Международной системе единиц (СИ) размерность коэффициента теплопроводности Вт/(м·К).

Возникновение эффекта Пельтье обусловлено различием условий установления равновесного состояния электронов или дырок в контактирующих материалах. При подключении внешнего источника питания к контактирующим материалам возникает ток. При протекании тока через такую структуру внешнее электрическое поле переносит электроны или дырки из одного материала в другой. Свободные заряды, перейдя в другую область контакта, имеют избыток (или недостаток) энергии, которая отдается кристаллической решетке материала. В результате температура контакта растет. Если же заряды обладают меньшей энергией, то кристаллическая решетка отдает им свою энергию и ее

температура падает. Предположим, что имеется контакт металла с полупроводником электронного типа. Пусть работа выхода электрона в металле больше, чем в полупроводнике электронной проводимости ( $A_{\text{М}} > A_{\text{П}}$ ). В этом случае электроны из полупроводника будут переходить в металл, оставляя в области своего ухода некомпенсированные положительные ионы, т. е. в области контакта возникает потенциальный барьер (рис. 2.6).

Если на электроды такого контакта подать внешнее напряжение («плюс» — на металл, «минус» — на полупроводник), то электроны, переходя в металл, опускаются до уровня Ферми  $F_{\text{П}}$ . В этом процессе они взаимодействуют с фононами, дефектами, друг с другом, отдают избыток энергии решетке в виде коли-



**Рис. 2.6.** Схема возникновения эффекта Пельтье в контакте электронного полупроводника с металлом

чества теплоты, называемого теплотой Пельтье  $\Delta Q_{\text{П}}$ . Численное значение  $\Delta Q_{\text{П}}$  определяют из равенства

$$\Delta Q_{\text{П}} = K_e - F_{\text{П}}.$$

При смене полярности внешнего напряжения (на металл — «минуса», а на полупроводник — «плюса») электроны, находящиеся в металле на энергетических уровнях, располагающихся выше дна зоны проводимости, переходят из металла в полупроводник, получая дополнительную энергию за счет атомов решетки, расположенных вблизи контакта. Происходит поглощение теплоты Пельтье, приводящее к охлаждению контакта. Количество поглощенной теплоты определяют, используя равенство для  $\Delta Q_{\text{П}}$ .

При использовании невырожденных полупроводников средняя кинетическая энергия электронов в полупроводниках  $n$ -типа

$$K_e = (\beta + 2)kT.$$

Тогда, подставляя  $K_e$  в  $\Delta Q_{\text{П}}$ , получим выражение для вычисления коэффициента Пельтье:

$$\Pi = \frac{K_e - F_{\text{П}}}{e} = \frac{[(\beta + 2)kT - F_{\text{П}}]}{e},$$

где  $\beta$  — коэффициент, определяемый типом рассеяния;  $k$  — коэффициент Больцмана;  $T$  — температура полупроводника.

Уровень Ферми

$$F_{\text{П}} = kT \ln \frac{n}{N_C},$$

где  $n$  — концентрация электронов в полупроводнике;

$$N_C = 2 \frac{(2\pi m_n^*)^{3/2}}{h^2},$$

$m_n^*$  — эффективная масса электрона;  $h$  — постоянная Планка.

Подставляя в выражение для  $\Pi$  значение  $F_{\text{П}}$  для электронного полупроводника и учитывая, что

$$\alpha_1 = \frac{k}{e \left( \beta + 2 + \frac{\ln N_C}{n} \right)},$$

получаем:

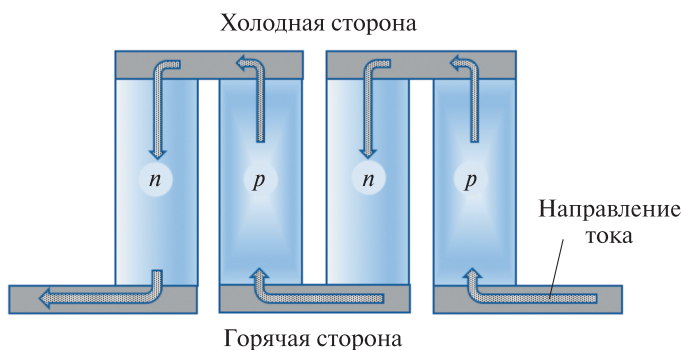
$$\Pi = \alpha_1 T.$$

Это равенство выведено Томсоном из первого и второго начала термодинамики для свободно движущихся частиц, поэтому аналогичные рассуждения справедливы и для контактов дырочного полупроводника с металлом при прохождении через него тока.

Эффект Пельтье возникает и в  $p$ – $n$ -переходах полупроводниковых приборов. Так, если на  $p$ – $n$ -переход подать внешнее напряжение в прямом направлении, то электроны  $n$ -области и дырки  $p$ -области  $p$ – $n$ -перехода, двигаясь навстречу друг другу, взаимодействуют (рекомбинируют). Причем электрон, попав в  $p$ -область  $p$ – $n$ -перехода, занимает в валентной зоне место дырки. Энергия, высвобождаемая в результате рекомбинации, поглощается решеткой, в результате область контакта нагревается. Величина этой энергии существенно выше, чем при контакте двух металлов, поэтому наиболее сильно эффект Пельтье наблюдается в случае использования полупроводников  $p$ - и  $n$ -типов проводимости.

При пропускании через  $p$ – $n$ -переход тока в запиорном направлении электроны  $p$ -области переходят в  $n$ -область, в которой их энергия становится больше, т. е. на образование электронно-дырочной пары затрачивается энергия, заимствованная у решетки, область контакта охлаждается.

Таким образом, при прохождении через  $p$ – $n$ -переход электрического тока различие средней энергии электронов в областях  $n$ - и  $p$ -типов проводимости приводит к выделению или поглощению теплоты Пельтье (рис. 2.7).



**Рис. 2.7.** Схема, поясняющая выделение или поглощение теплоты Пельтье на контакте двух полупроводников с различными типами проводимости

Электрический способ охлаждения при прохождении тока через контакт двух полупроводников получил практическое применение в различных охлаждающих устройствах: микрохолодильниках, термостатах, термоэлектрических гигрометрах и др.

**Эффект Томсона** проявляется через выделение или поглощение количества теплоты в однородном полупроводнике при наличии продольного градиента температуры  $dT/dx$  и протекании электрического тока через образец. Таким образом, количество теплоты Томсона пропорционально прошедшему через полупроводник количеству электричества и градиенту температуры вдоль полупроводника:

$$G_{\tau} = \tau I t \frac{dT}{dx} = \tau e \frac{dT}{dx},$$

где  $\tau$  — коэффициент Томсона, зависящий от материала полупроводника.

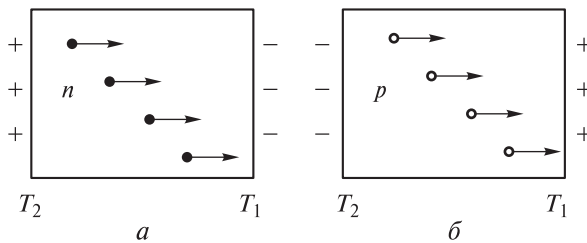
Основой возникновения эффекта Томсона служит значительное увеличение тепловой скорости электронов в области максимальной температуры. Это обуславливает их уход в более холодную область полупроводника, где скорость электронов меньше. Уменьшение скорости сопровождается снижением амплитуды колебаний теплового движения электронов, что позволяет высокоэнергетичным электронам легко проникать в холодную область. Это приводит к тому, что при прохождении электрического тока в образце в направлении возрастания температуры электроны в полупроводнике  $n$ -типа проводимости будут переходить в обратном направлении, т. е. из мест с более высокой температурой в область с более низкой температурой. Избыток энергии электронов в холодной области поглощается решеткой, т. е. происходит ее нагрев теплотой Томсона. При изменении направления тока происходит поглощение теплоты Томсона и кристалл охлаждается.

Поскольку основой эффекта Томсона служат особенности теплового движения электронов, коэффициент Томсона имеет связь с коэффициентом термоЭДС:

$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT},$$

где  $T$  — средняя температура полупроводника;  $d\alpha$  — изменение коэффициента термоЭДС при изменении температуры на  $dT$ .

**Эффект Зеебека** — возникновение ЭДС (термоЭДС) в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников или полупроводников при наличии градиента температур в контактах металл—полупроводник, полупроводников с разным типом проводимости или с разной шириной запрещенной зоны (гетеропереходы). Эффект Зеебека применяют в термопарах для измерения температуры, в энергетических установках космического назначения и т. д. Пусть в стержне невырожденного полупроводника контакты имеют разную температуру, причем  $T_2 > T_1$  (рис. 2.8).



**Рис. 2.8.** Схема передвижения свободных носителей заряда в области градиента температур:

$a$  — донорный полупроводник ( $n$ -типа);  $b$  — акцепторный полупроводник ( $p$ -типа)

В стержне с градиентом температуры действуют два механизма движения свободных электронов:

1) в нагретой области стержня происходит увеличение концентрации и энергии свободных электронов. Поэтому, стремясь ослабить градиент, они под действием теплового движения начинают диффундировать в холодную область полупроводникового стержня;

2) в области низких температур (значительно меньше комнатной) к этому механизму добавляется процесс увлечения свободных электронов фононами, движущимися от горячего конца стержня к холодному, так как их концентрация в этом случае значительна, и пренебрегать влиянием фононов на характер движения электронов уже нельзя.

Диффузионное перемещение электронов приводит к образованию разности потенциалов, называемой термоэлектрической силой (термоЭДС). В условиях термодинамического равновесия термоЭДС формирует поток электронов равный, но противоположно направленный потоку диффузионных электронов. Тогда при одинаковой температуре металла и полупроводника контактные разности потенциалов в области контакта будут равны по величине и направлены в противоположные стороны. Если же выполняется неравенство  $T_2 > T_1$ , то возникает разность контактных разностей потенциалов  $\Delta\varphi_k$ , вносящая свой вклад в термоЭДС полупроводника.

Таким образом, возникновение термоЭДС  $E_T$  обусловлено двумя механизмами: объемной диффузией носителей заряда от горячего конца к холодному и контактной диффузией, возникающей из-за температурной зависимости контактной разности потенциалов:

$$E_T = \left( \frac{\partial\varphi_k}{\partial T} + \frac{\partial\varphi_{об}}{\partial T} \right),$$

$$\Delta T = E_k + E_{об},$$

где  $\varphi_k$  — разность потенциалов за счет контактной диффузии;  $\varphi_{об}$  — разность потенциалов за счет объемной диффузии носителей заряда от горячего конца стержня к холодному;  $E_k$  — термоЭДС за счет контактной диффузии;  $E_{об}$  — термоЭДС за счет объемной диффузии носителей заряда от горячего конца стержня к холодному.

При объемной диффузии наличие градиента температуры вызывает одностороннюю диффузию потока электронов от горячего конца полупроводника к холодному, обусловленную градиентом концентрации свободных носителей [ $n = f(x)$ ] и тепловым движением при постоянном коэффициенте диффузии электронов  $D_n$  (см. рис. 2.8).

Это условие позволяет использовать равенство

$$P_n = D_n \frac{dn}{dx},$$

где  $P_n$  — плотность потока электронов при градиенте концентрации;  $n$  — число электронов;  $x$  — расстояние.

И наоборот, при постоянной концентрации свободных носителей и изменении температуры происходит изменение коэффициента  $D_n = f(T)$ , которое обуславливает возникновение потока электронов:

$$P_D = n \frac{dD_n}{dx},$$

где  $P_D$  — плотность потока электронов, обусловленная изменением коэффициента диффузии.

Коэффициент диффузии электронов  $D_n$  зависит от средней кинетической энергии  $K_e$ , которая определяется механизмом рассеяния носителей заряда и температуры:

$$D_n = CK_e^{\beta+1/2},$$

где  $C$  — коэффициент пропорциональности.

Если коэффициент  $D_n$  и концентрация  $n$  температурозависимы, то в случае динамического равновесия свободных носителей заряда, например, электронов, в изолированном полупроводнике справедливо равенство

$$D_n \frac{dn}{dx} + n \frac{dD_n}{dx} = E\mu_n n,$$

где  $E$  — напряженность поля, создаваемого термоЭДС;  $\mu_n$  — подвижность электронов.

Пусть коэффициент диффузии будет постоянной величиной ( $D_n = \text{const}$ ), а концентрация свободных электронов будет температурозависимой ( $n = f(T)$ ), тогда последнее уравнение можно записать в следующем виде:

$$D_n \frac{dn}{dx} = D_n \frac{\delta n}{\delta T} \frac{\delta T}{\delta x} = E\mu_n n.$$

Подвижность свободных электронов в условиях равновесия можно определить из уравнения Эйнштейна:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e}.$$

Решив совместно последние два выражения, получим выражение для коэффициента термоЭДС:

$$\alpha_n = \frac{Edx}{dT} = \frac{k}{e} T \frac{\delta \ln(n)}{\delta T}.$$

При постоянной концентрации свободных электронов ( $n = \text{const}$ ) и температурозависимом коэффициенте диффузии ( $D_n = f(T) = f(T_e)$ ) уравнение для  $\alpha_n$  упрощается до вида

$$n \frac{dD_n}{dx} = n \frac{\delta D_n \delta K_e}{\delta K_e dx} = E \mu_n n.$$

Подставив в уравнение для  $\alpha_n$  среднюю энергию электронов, представленную в предыдущем уравнении, получим выражение для определения численного значения коэффициента термоЭДС:

$$\alpha_D = \frac{Edx}{dT} = \frac{k}{e} \left( \beta + \frac{1}{2} \right).$$

Коэффициенты  $\alpha_n$  и  $\alpha_D$  позволяют определить конкретные значения объемной термоЭДС ( $E_{об}$ ).

При тепловом нагреве контактной пары зависимостью работы выхода металла от температуры пренебрегают вследствие ее малости, поэтому изменение контактной термоЭДС полностью определяется работой выхода полупроводника, выражаемой через изменение уровня Ферми.

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_k = \frac{A_M - A_P}{e} = \frac{F_M - F_P}{e}.$$

Дифференцируя выражение для  $\varphi_k$  по температуре, можно получить выражение для коэффициента контактной термоЭДС:

$$\alpha_k = \frac{\delta \varphi_k}{\delta T} = -\frac{1}{e} \frac{\delta F_n}{\delta T}.$$

Для невырожденных полупроводников при  $kT \gg \Delta E_d$ , где  $\Delta E_d$  — диапазон энергий примесных атомов донорного типа, уровень Ферми

$$F_P = kT \ln \frac{n}{N_C};$$

$$N_C = 2 \frac{(2\pi m_n^*)^{3/2}}{h^2}.$$

Подставляя  $N_C$  в  $F_P$ , получаем выражение для расчета контактной разности потенциалов:

$$\alpha_k = -\frac{k}{e} \left( -\frac{3}{2} + \frac{F_n}{kT} + T \frac{\delta \ln n}{\delta T} \right).$$

В режиме  $n \gg p$  и  $kT \gg \Delta E_d$  суммарный коэффициент термоЭДС электронного полупроводника

$$\alpha_1 = \alpha_n + \alpha_D + \alpha_k = \frac{k}{e \left( 2 + \beta + \frac{\ln N_C}{n} \right)}.$$



Проведя аналогичные рассуждения для полупроводника дырочной проводимости при условии  $p \gg n$  и  $kT \gg \Delta E_d$  и с учетом только диффузионного механизма, получим выражение для коэффициента термоЭДС:

$$\alpha_2 = \alpha_p + \alpha_D + \alpha_k \frac{k}{e \left( 2 + \beta + \frac{\ln N_V}{p} \right)}.$$

Анализ выражений для  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  показывает, что в примесных полупроводниках коэффициенты слабо зависят от температуры, т. к. они пропорциональны  $\ln(T)^{3/2}$  и обратно пропорциональны логарифму концентрации носителей. В области полной ионизации атомов примеси, наблюдаемой при высоких температурах, выражения для  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  можно записать в следующем виде:

$$\alpha_1 = \frac{k}{e \left( 2 + \beta + \frac{\ln N_C}{N_d} \right)};$$

$$\alpha_2 = \frac{k}{e \left( 2 + \beta + \frac{\ln N_V}{N_a} \right)}.$$

Из последних равенств следует, что значение  $\alpha$  в примесных полупроводниках растет с увеличением температуры при условии неполной ионизации атомов примеси и уменьшается с увеличением концентрации примеси донорного ( $N_d$ ) или акцепторного ( $N_a$ ) типов.

Для нахождения численного значения коэффициента  $\alpha$  в режиме перехода от истощения примеси к собственной проводимости необходимо учитывать носители обоих знаков, тогда выражения, полученные для примесного полупроводника, можно обобщить на случай собственной проводимости, используя выражение

$$\alpha = \frac{\alpha_2 \mu_p p - \alpha_1 \mu_n n}{\mu_p p + \mu_n n}.$$

В собственных полупроводниках электрический ток переносится электронами и дырками, поэтому, как следует из выражения для  $\alpha$ , их термоЭДС значительно ниже, чем в случае примесных полупроводников. Это означает, что в процессе истощения примеси и при переходе к собственной проводимости численное значение коэффициента  $\alpha$  уменьшается. Уровень Ферми в собственных полупроводниках располагается в области середины запрещенной зоны. С изменением температуры изменяется в равном количестве концентрация электронов и дырок. Уровень Ферми практически не изменяет своего положения в запрещенной зоне при выполнении равенства  $m_n^* \approx m_p^*$ , поэтому контактную термоЭДС можно принять равной нулю в объеме полупроводника.

В полупроводниках  $p$ -типа проводимости при температурах, меньших температуры истощения примесных атомов ( $T_1$ ), выполняется неравенство  $p \gg n$ , поэтому возникновение термоЭДС обусловлено концентрацией дырок, что следует также из выражения для  $\alpha$ . При повышении температуры от  $T_1$  до  $T_2$  термоЭДС медленно увеличивается, так как возрастает концентрация собственных носителей заряда в полупроводнике. Увеличение температуры до  $T_3$  приводит к переходу от примесной проводимости к собственной и, согласно выражению для  $\alpha$ , термоЭДС изменяет знак. При дальнейшем увеличении температуры она уже не изменяется до температуры  $T_4$ , так как преобладает электронная составляющая проводимости полупроводника. С дальнейшим ростом температуры от  $T_4$  до  $T_5$  термоЭДС вновь уменьшается.

В большинстве практических случаев для определения термоЭДС можно использовать следующие свойства.

1. В небольшом диапазоне температур значение термоЭДС можно считать пропорциональным разности температур  $\Delta T$ :

$$E_T = \alpha \Delta T.$$

2. Если термоэлектрическая цепь составлена из последовательно соединенных электронного и дырочного полупроводников, то термоЭДС отдельных элементов

$$E_{12} = (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta T = \alpha_{12} \Delta T,$$

где  $\alpha_{12}$  — коэффициент дифференциальной термоЭДС, характеризующий пару полупроводников.

Таким образом, коэффициент  $\alpha_{12}$  зависит в первую очередь от материала ветвей термопары и от интервала температур, в котором используется термопара.

Структура кристаллической решетки металлов обладает системой полной ионизации матричных атомов, концентрация которых не изменяется при изменении температуры. Из этого следует, что и контактная разность потенциалов также практически не зависит от температуры. Поэтому термоЭДС металлов практически не превышает нескольких микровольт на градус.

В полупроводниках наблюдается значительная зависимость от температуры:

- 1) кинетической энергии и концентрации свободных носителей заряда;
- 2) контактного потенциала и связанного с ним уровня Ферми.

Это приводит к увеличению термоЭДС до 1 мкВ/градус и в случае контакта металл–полупроводник возникновению термоЭДС исключительно в объеме кристаллической структуры полупроводника. Это, в свою очередь, позволяет по направлению термоЭДС определять тип проводимости кристалла. Таким образом, при отрицательно заряженном холодном конце термопары свободными носителями заряда являются электроны (полупроводник  $n$ -типа проводимости), а если заряд положительный, то дырки (полупроводник  $p$ -типа проводимости).

При слабых токах все три термоэлектрических явления считаются обратимыми и при стационарном тепловом режиме изменяют знак с изменением

разности температур и направления тока. В этом случае, используя закон сохранения энергии и разность температур между контактами  $dT$ , можно определить связь между коэффициентами  $\alpha$ ,  $\Pi$  и  $\tau$  в замкнутой цепи из двух материалов, анализируя выражение

$$\alpha_{12}dTdI = \frac{\delta\Pi_{12}}{\delta T}dTdI + (\tau_1 - \tau_2)dTdI.$$

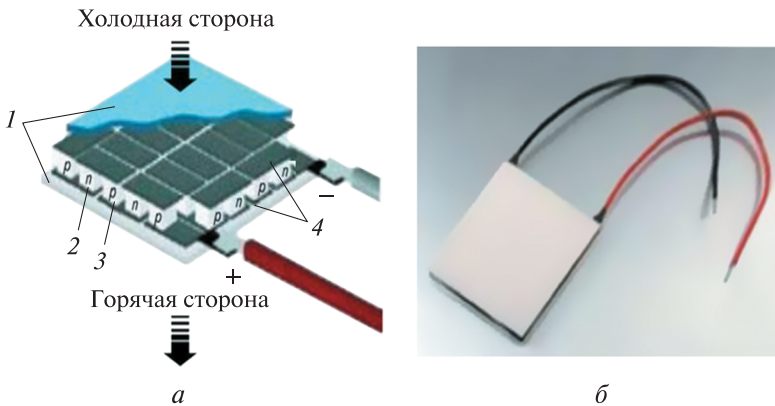
Это равенство позволяет определить соотношение между коэффициентами  $\alpha_{12}$ ,  $\Pi_{12}$  и  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  при контакте двух полупроводников:

$$\alpha_{12} = \frac{\delta\Pi_{12}}{\delta T} + (\tau_1 - \tau_2).$$

Таким образом, это равенство аналитически объединяет в общую группу термоэлектрические эффекты.

Термоэлементы на основе полупроводников намного более эффективные, чем на основе металлов. На рис. 2.9 представлено конструктивное исполнение и внешний вид термоэлемента, который используется в данной лабораторной работе.

Термоэлектрический модуль (ТЭМ), или элемент Пельтье, представленный на рис. 2.9, — это конструктивно завершенное устройство, состоящее из большого числа (например, 127) термопар, соединенных между собой коммутационными пластинами, расположенных в прямоугольной форме и помещенных между двумя тонкими керамическими пластинами.



**Рис. 2.9.** Конструктивное исполнение (а) и внешний вид (б) термоэлектрического модуля ([https://kit-e.ru/wp-content/uploads/120\\_7-5.jpg](https://kit-e.ru/wp-content/uploads/120_7-5.jpg)): 1 — изолятор (керамика); 2 — полупроводник  $n$ -типа; 3 — полупроводник  $p$ -типа; 4 — проводник (медь)

Число термопар может быть изменено в широких пределах: от единиц до сотен, что позволяет конструировать ТЭМ с холодильной мощностью от десятых долей до сотен ватт с рабочим напряжением от десятых долей до десятков вольт.

### Экспериментальная часть

Принципиальная схема экспериментальной установки для изучения характеристик термоэлемента представлена на рис. 2.10.

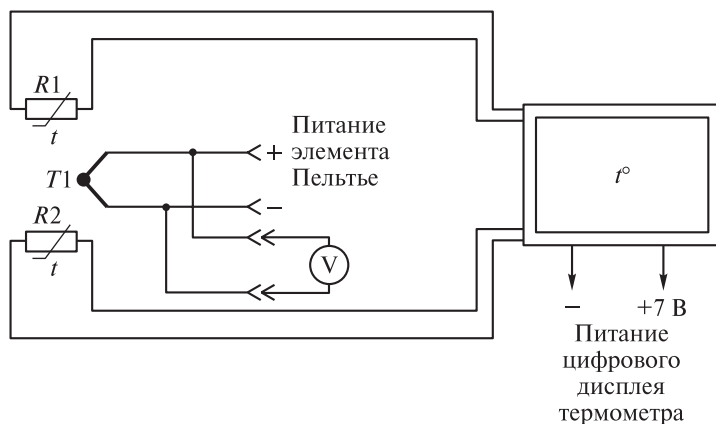


Рис. 2.10. Принципиальная схема экспериментальной установки

На термоэлемент  $T1$ , представляющий собой модуль Пельтье, подается напряжение от источника питания. В результате прохождения тока через термоэлемент одна сторона модуля нагревается, а противоположная сторона охлаждается. Температура сторон модуля измеряется с помощью терморезисторов  $R1$  и  $R2$ , которые подсоединены к цифровому дисплею.

Для измерения термоЭДС на отдельные контакты подключается милливольтметр, при этом источник питания должен быть отсоединен от макета.

Объектом исследования является термоэлемент Пельтье типа TEC1-12706 или его аналог, установленный на корпусе макета. На обеих сторонах термоэлемента установлены термодатчики, подсоединенные к двухканальному цифровому термометру, снабженному цифровым дисплеем.

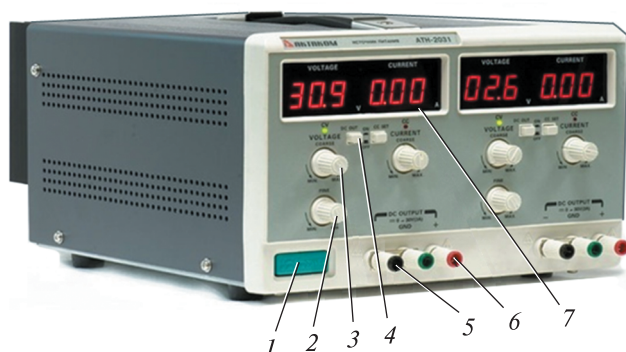
Используемые приборы и оборудование:

- источник постоянного тока типа АТН-2031 или его аналог — 1 шт.;
- лабораторный макет — 1 шт.;
- цифровой вольтметр или мультиметр — 1 шт.;
- соединительные провода;
- источник теплоты (фен или лампа накаливания).

Для выполнения лабораторной работы собирают стенд, состоящий из источника постоянного тока (рис. 2.11), цифрового вольтметра или мультиметра, лабораторного макета и соединительных проводов.

### ВНИМАНИЕ!

**Правый канал источника питания служит для питания цифрового дисплея макета 7 В, левый — для питания элемента Пельтье.**



**Рис. 2.11.** Двухканальный источник питания, работающий в режимах однополярного и двухполярного питания:

1 — кнопка включения (выключения) питания; 2 — ручка точной регулировки выходного параметра; 3 — ручка грубой регулировки выходного параметра; 4 — кнопка переключения режима стабилизации напряжения; 5 — гнездо для подключения отрицательного напряжения; 6 — гнездо для подключения положительного напряжения; 7 — цифровой индикатор

Для выполнения лабораторной работы требуется собрать электрическую схему в соответствии с принципиальной схемой, приведенной на рис. 2.10, для чего выполнить следующие операции:

1) подключить питание дисплея на стороне макета, обозначенного словом «Дисплей», для этого плюсовое гнездо правого канала источника питания соединить проводом с соответствующим плюсовым гнездом макета. Минусовое гнездо правого канала источника питания соединить с соответствующим минусовым выводом макета;

2) подключить питание термоэлемента на стороне макета, обозначенного словом «Пельтье», для этого плюсовое гнездо левого канала источника питания соединить проводом с соответствующим плюсовым гнездом макета. Минусовое гнездо левого канала источника питания соединить с соответствующим минусовым выводом макета;

3) подключить цифровой вольтметр или мультиметр к соответствующим гнездам макета на стороне макета, обозначенного «mV»;

4) на источнике питания все ручки регулятора напряжения и тока повернуть против хода часовой стрелки до упора (на ноль). Отжать на источнике питания кнопки подключения напряжения на обоих каналах;

5) после завершения сборки схемы преподаватель проверит правильность подключения.

*Категорически запрещается включать источник питания без разрешения преподавателя.*

Порядок выполнения лабораторной работы при изучении эффекта Пельтье.

1. Включить источник питания. Перед включением убедиться, что обе ручки регулятора напряжения повернуты против часовой стрелки до упора и отжаты кнопки подачи напряжения на обоих каналах.

2. Установить на источнике питания напряжение 7 В на правом канале и ограничение тока 0,1 А и нажать кнопку подачи напряжения, при этом должны появиться цифры на цифровом дисплее макета. Верхний ряд дисплея макета показывает температуру горячей стороны элемента Пельтье (красный цвет). Нижний ряд показывает температуру холодной стороны элемента Пельтье (синий цвет).

3. Записать значения температур на дисплее макета при токе через элемент Пельтье, равном «0».

4. Установить на источнике питания на левом канале ограничение тока 1,2 А и нажать на кнопку подачи напряжения на левом канале источника питания.

5. Плавно поворачивая ручку установки напряжения, установить напряжение, при котором значение тока на дисплее источника питания составит 0,1 А ( $\pm 0,01$  А).

6. Наблюдать за изменением показаний цифрового термометра примерно 2...3 мин до стабилизации температуры. Когда температура стабилизируется, записать значение тока, температуры горячей и холодной сторон элемента Пельтье.

7. Повторить п. 5–6 для тока 0,2 А; 0,3 А; 0,4 А; 0,5 А; 0,6 А; 0,7 А ( $\pm 0,01$  А).

8. После завершения измерений повернуть ручку установки напряжения на левом канале источнике питания против хода часовой стрелки до упора и отсоединить провода левого канала источника питания от макета.

Порядок выполнения лабораторной работы при изучении эффекта Зеебека.

1. Установить температуру на обеих сторонах элемента Пельтье практически одинаковой (допустимы расхождения в две-три десятых доли градуса).

2. Подсоединить вольтметр или мультиметр к контактам лабораторного макета, обозначенным «ЭДС». Диапазон измерения установить  $=V$ .

3. Записать значения температуры горячей и холодной сторон элемента и значение ЭДС.

4. Включить фен, установить температуру 100 град. Допускается вместо фена использовать лампу накаливания.

5. Установить фен на расстоянии примерно 60 см от лабораторного макета и направить поток горячего воздуха на одну сторону элемента Пельтье.

6. Подождать примерно 2...3 мин до стабилизации температуры на горячей стороне, снять показания температуры и ЭДС и записать их значения.

7. Провести серию экспериментов при расстояниях, равных 50, 40, 30 и 20 см, при этом записать соответствующие значения температуры и ЭДС.

**Завершение работы**

После завершения эксперимента выключить питание всех приборов, соблюдая следующий порядок:

- 1) убедиться, что обе ручки регулировки напряжения и тока на блоке питания повернуты в крайнее левое положение (против хода часовой стрелки до упора);
- 2) выключить блок питания и все измерительные приборы;
- 3) выключить фен;
- 4) разобрать схему.

**Обработка результатов измерений**

После проведения измерений выполнить необходимые работы.

1. По результатам измерений рассчитать коэффициент дифференциальной термоЭДС, характеризующий пару полупроводников для каждой разности температур.
2. Построить график изменения разности температуры сторон термоэлемента в зависимости от тока, проходящего через термоэлемент.
3. Построить график изменения термоЭДС в зависимости от разности температуры сторон термоэлемента по данным эксперимента.
4. Рассчитать теоретическую зависимость изменения термоЭДС от разности температур сторон термоэлемента, построить график зависимости рядом с экспериментальной кривой. Объяснить, чем обусловлено несовпадение кривых.
5. В выводах объяснить, чем обусловлено расхождение значения коэффициента термоЭДС для каждого напряжения.

**Содержание отчета**

Отчет должен быть оформлен в виде журнала лабораторных работ (прил. 1).  
Содержание отчета:

- 1) цель и задачи работы;
- 2) ответы на контрольные вопросы;
- 3) принципиальная электрическая схема макета;
- 4) расчетные значения;
- 5) графики;
- 6) выводы.

**Контрольные вопросы и задания**

1. В чем суть явлений термоэлектричества?
2. Что называется контактной разностью потенциалов (КРП)?
3. Что такое коэффициент теплопроводности и в каких единицах он измеряется?
4. Что такое эффект Пельтье?
5. Почему происходит нагревание (охлаждение) спаев термопары при пропускании через них тока?
6. Что такое коэффициент Пельтье?

7. Где используется эффект Пельтье?
8. Почему в полупроводниках эффект Пельтье имеет большее значение, чем в металлах?
9. В чем заключается эффект Зеебека?
10. При каком условии появляется термоЭДС в цепи, состоящей из разнородных материалов?
11. Где можно использовать эффект Зеебека?