

УДК 621.382.8

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Ивашов Е.Н., Князева М.П.

ФГАОУ ВПО «Московский институт электроники и математики Национального  
исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва,  
e-mail: eivashov@hse.ru, ienmiem@mail.ru, akmika@rambler.ru

Разработаны устройства наноперемещений с зондами, выполненными в виде термоэлектрической пары на основе эффектов Зеебека и Пельтье. Показаны варианты выполнения устройств.

**Ключевые слова:** термоэлектрическая пара, эффект Зеебека, эффект Пельтье, устройство наноперемещений

## APPLICATION OF THERMOELECTRIC COUPLE IN MODERN TECHNOLOGY

Ivashov E.N., Knyazeva M.P.

FGAEU HPE «Moscow institute of electronics and mathematics The National research university  
«High school of economics», Moscow, e-mail: eivashov@hse.ru, ienmiem@mail.ru, akmika@rambler.ru

Nano-displacement device with probes executed in the form of thermoelectric couple based on, Seebeck's effect and Pel'te's effect is developed. Variants of device's implementation is exhibited.

**Keywords:** thermoelectric couple, Seebeck's effect, Pel'te's effect, nano-displacement device

Наиболее характерным примером применения термодинамики необратимых процессов (термокинетики) является анализ с ее помощью процессов взаимного преобразования различных форм движения материи, происходящих в термодинамической (кинематической) паре [1].

Термодинамическая пара представляет собой два родственных тела – проводника (родственные по природе тела характеризуются совпадающими внутренними степенями свободы, но различными по составу материалами), концы которых соединены между собой. Если между спаями (места соединения проводников) создать некоторую разность потенциалов (например, температур

$$\Delta T = T_2 - T_1,$$

электрических потенциалов, давлений и т.д.), то вдоль обоих проводников потечет заряд, сопряженный с данным потенциалом. Одновременно с этим по замкнутой цепи (по кругу) станет циркулировать второй обобщенный заряд (в общем случае их может быть несколько), относящийся к связанной с первым зарядом внутренней степени свободы системы. Направление циркуляции второго заряда на рис. 1 показано стрелками.

Первая термодинамическая пара была открыта Т. Зеебеком в 1821 г. и получила наименование термоэлектрической пары.

Суть термоэлектрического эффекта, открытого Зеебеком (эффект Зеебека) заключается в том, что при замыкании концов двух разнородных металлов с неодинаковой температурой спаев в цепи возникает электродвижущая сила (э.д.с.). Этот эффект называют эффектом контактной разности потенциалов [1].

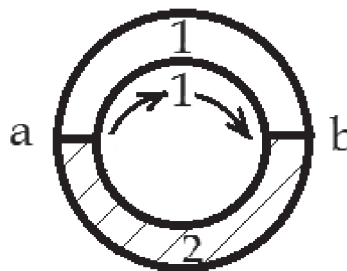


Рис. 1

Явлением Зеебека называют возникновение электродвижущей силы  $\mathcal{E}_T$  в замкнутой электрической цепи, составленной из последовательно соединенных разнородных проводников (или полупроводников), если места их контакта (спая) поддерживают при различных температурах. Величину  $\mathcal{E}_T$  называют термоэлектродвижущей силой (термо-э.д.с.). Так как  $(\Phi - \frac{\mu}{e})$  – непрерывная функция координат, то

$$\varepsilon_T = -\oint_L a(\text{grad}T, dl) = -\oint_L a dT,$$

где интегрирование производится по всему замкнутому контуру  $L$  электрической цепи [2].

Простейшую замкнутую электрическую цепи (рис. 1), состоящую из двух разнородных проводников (или полупроводников) 1 и 2, называют термоэлементом, или термопарой. Если  $T_a$  и  $T_b$  – температуры спаев  $a$  и  $b$  термоэлемента, то при выбранном на рис. 1 направлении обхода цепи по часовой стрелке термо-э.д.с. термоэлемента равна

$$\varepsilon_T = -\int_{T_a}^{T_b} a_1 dT - \int_{T_b}^{T_a} a_2 dT = \int_{T_a}^{T_b} a_{12} dT,$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – значения  $a$  для двух различных материалов 1 и 2 ветвей термоэлемента, а  $a_{12} = a_2 - a_1$  – удельная дифференциальная термоэлектродвижущая сила для данной пары материалов:

$$a_{12} = \frac{d\varepsilon_T}{dT}.$$

Если интервал температур  $T_b - T_a$  невелик, то в его пределах можно считать, что  $a_{12}$  – постоянная величина и

$$\varepsilon_T = a_{12}(T_b - T_a).$$

При  $T_b > T_a$ ,  $\varepsilon_T > 0$ , если  $a_{12} = a_2 - a_1 > 0$ , и  $\varepsilon_T < 0$ , если  $a_{12} < 0$ . В первом случае термоток  $I$  в цепи термоэлемента идет в направлении, показанном на рис. 1 (по часовой стрелке), а во втором – в противоположном направлении. Таким образом, в горячем спае термоэлемента термоток всегда идет из ветви с меньшим значением  $a$  в ветвь с большим  $a$ .

Если в разрыв одной из ветвей термоэлемента включить последовательно любое число проводников другого состава, все спаи которых термостатированы, т. е. поддерживаются при одной и той же температуре, то термо-э.д.с. в такой цепи будет равна термо-э.д.с. исходного термоэлемента [2].

Явление Зеебека обусловлено следующими тремя причинами:

а) преимущественной диффузией носителей тока в проводнике или полупроводнике от нагретого конца к холодному (объемная составляющая термо-э.д.с.);

б) зависимостью контактной разности потенциалов от температуры, связанной с зависимостью химического потенциала

от температуры (контактная составляющая термо-э.д.с.);

в) увлечением электронов фотонами, которые преимущественно перемещаются от горячего конца проводника к холодному и, взаимодействуя с электронами, вызывают преимущественное перемещение их в том же направлении (фононная составляющая термо-э.д.с.); при низких температурах эта составляющая термо-э.д.с. может играть определяющую роль.

Соответственно удельная термо-э.д.с.  $a$  равна сумме трех составляющих:

$$a = a_0 + a_K + a_\Phi,$$

где

$$a_K = -\frac{1}{e} \frac{d\mu}{dT}.$$

В металлах электронный газ находится в сильно вырожденном состоянии. Концентрация электронов проводимости очень велика и не зависит от температуры, а их распределение по энергиям и скоростям теплового движения незначительно изменяется при нагревании. Поэтому значения удельной термо-э.д.с. металлов очень малы (порядка нескольких мкв/град.). Явление Зеебека в металлах используют в основном для измерения температуры.

В полупроводниках концентрация носителей тока (электронов проводимости и дырок) значительно меньше, чем в металлах. Обычно она столь невелика, что носители тока подчиняются классической статистике Больцмана (невырожденный полупроводник), т.е. средняя энергия их теплового движения равна  $\frac{3}{2}kT$ , где  $k$  – постоянная Больцмана. С повышением температуры полупроводника увеличивается концентрация носителей тока (иногда она может сохраняться неизменной) и, что особенно существенно, возрастает скорость их теплового движения. Поэтому значения удельной термо-э.д.с. для невырожденных полупроводников с одним типом носителей тока во много раз больше (чем для металлов (порядка  $(10^2 \div 10^3)$  мкв/град.). Коэффициенты  $a$  у электронных и дырочных полупроводников противоположны по знаку. Следовательно, наибольшие значения удельной дифференциальной термо-э.д.с.  $a_{12}$  получаются для пар, составленных из электронного и дырочного полупроводников.

Рассмотрим систему наноперемещений зонда, представленную на рис. 1:

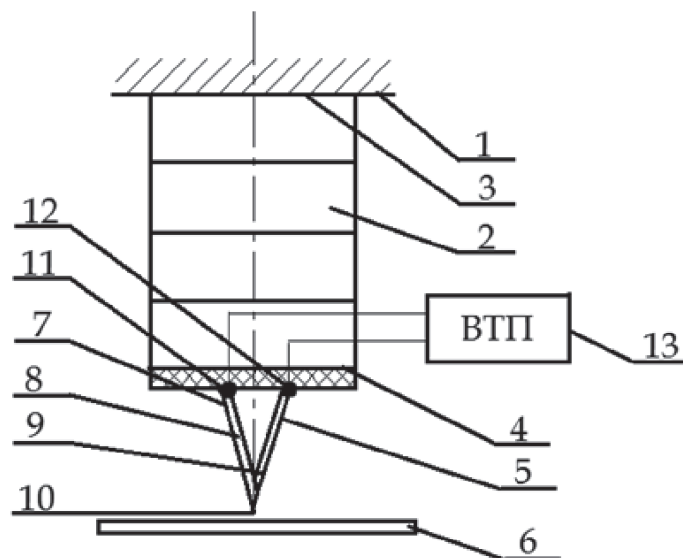


Рис. 2. Система наноперемещений зонда

Система наноперемещений зонда (рис. 1) содержит неподвижное основание 1, на котором жестко закреплен пьезопривод 2 одним торцом 3, а на другом торце 4 жестко закреплен зонд 5 с возможностью взаимодействия с подложкой 6. Зонд 5 выполнен в виде термоэлектрической пары 7 двух разнородных металлов 8, 9, с различными термоэлектродвижущими силами, спаянных в области острия 10 зонда 5, а другие концы 11, 12 связаны с вольт-температурным преобразователем 13.

Система наноперемещений зонда с термоэлектрической парой на эффекте Зеебека работает следующим образом.

При замыкании концов зонда 5, спаянных в области острия 10, двух разнородных металлов 8, 9 с неодинаковой температурой спаев в цепи возникает электродвижущая сила, значения которой регистрирует вольт-температурный преобразователь 13. По значению термо-э.д.с. на вольт-температурном преобразователе 13 определяем температуру в системе зонд-подложка.

Полупроводниковые термоэлементы используют для прямого преобразования внутренней энергии в электрическую. К.П.Д. современных полупроводниковых термоэлектрических генераторов достигают 15%.

В 1834 г. Ж. Пельтье открыл в термоэлектрической паре эффект, названный его именем (эффект Пельтье): при прохождении электрического тока через спаи в них выделяется или поглощается теплота. Этот эффект называют эффектом контактной работы [1].

Явлением Пельтье называют выделение или поглощение (в зависимости от на-

правления тока) теплоты, избыточной над джоулевой и называемой теплотой Пельтье, осуществляющееся в спае разнородных проводников или полупроводников при прохождении через спай постоянного электрического тока [2].

На поверхности контакта двух проводников 1 и 2 непрерывны электрохимический потенциал ( $\mu - e\Phi$ ), температура  $T$  и нормальные составляющие плотности потока энергии  $u$  и плотности тока  $j$ . Поэтому из выражения для  $u$  следует, что при прохождении постоянного тока  $I$  из первого проводника во второй на поверхности контакта за промежуток времени  $t$  выделяется (или поглощается) теплота Пельтье

$$Q_{II} = \Pi_{12} I t = \Pi_{12} q,$$

где  $\Pi_{12} = \Pi_1 - \Pi_2 = -a_{12} T$  и  $q = I t$ .

В отличие от джоулевой теплоты, пропорциональной квадрату силы тока и всегда выделяющейся в проводнике, теплота Пельтье пропорциональна первой степени силы тока, а ее знак зависит от направления тока в спае. Если ток в спае идет из проводника с большим значением коэффициента Пельтье в проводник с меньшим значением коэффициента Пельтье ( $\Pi_1 > \Pi_2$  и  $\Pi_{12} > 0$ ), то  $Q_{II} > 0$ , т. е. теплота Пельтье выделяется в спае. При противоположном направлении тока через спаи  $Q_{II} < 0$ , т. е. теплота Пельтье поглощается в спае [2].

Явление Пельтье обусловлено тем, что в разнородных проводниках или полупроводниках, находящихся в контакте, значения  $\overline{\omega}_1$  и  $\overline{\omega}_2$  средней энергии подвижных

зарядов, участвующих в образовании тока, не равны друг другу. Пусть, например,  $\omega_1 > \omega_2$  и ток имеет такое направление, что носители тока переходят через поверхность контакта из первого проводника во второй. Во втором проводнике носители тока, перешедшие из первого проводника, имеют энергию, превышающую ту, которая соответствует термодинамическому равновесию между носителями тока и узлами кристаллической решетки. Поэтому, сталкиваясь с узлами кристаллической решетки второго проводника, носители тока передают им избыток своей энергии, вызывая нагревание проводника. Этот процесс про-

исходит в очень тонком слое второго проводника, прилегающем к поверхности контакта, т. е. проявляется в нагревании спая. Если при тех же условиях ток в спая имеет противоположное направление, то носители тока переходят из второго проводника в первый, имея энергию, меньшую равновесной в первом проводнике. Сталкиваясь с узлами кристаллической решетки первого проводника, носители тока получают энергию, недостающую им до равновесной. Следовательно, в этом случае спай должен охлаждаться.

Рассмотрим устройство наноперемещений с зондом, представленное на рис. 2.

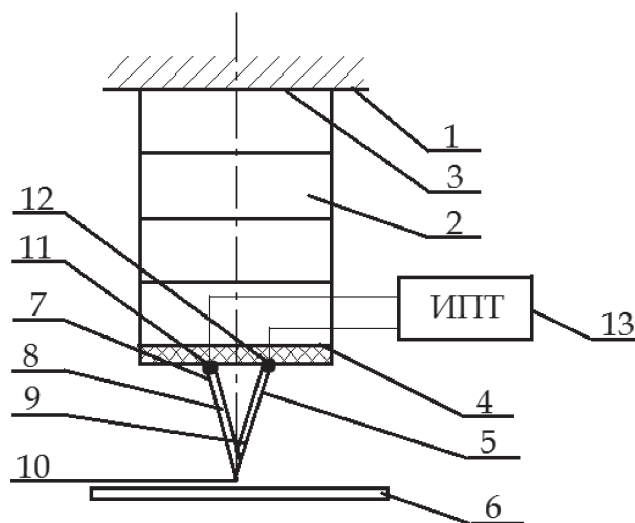


Рис. 3. Устройство наноперемещений с зондом

Устройство наноперемещений с зондом (рис.2) содержит неподвижное основание 1, на котором жестко закреплен пьезопривод 2 одним торцом 3, а на другом торце 4 жестко закреплен зонд 5 с возможностью взаимодействия с подложкой 6. Зонд 5 выполнен в виде термоэлектрической пары 7 двух разнородных металлов 8, 9, с различными коэффициентами Пельтье, спаянных в области острия 10 зонда 5, а другие концы 11, 12 связаны с источником постоянного электрического тока 13.

Устройство наноперемещений с зондом работает следующим образом.

От источника постоянного электрического тока 13 подается ток (на фиг.1 условно не обозначен) на зонд 5, выполненный в виде термоэлектрической пары 7 двух разнородных металлов 8, 9 с различными коэффициентами Пельтье, спаянных в виде острия 10. Для увеличения температуры в зоне зонд-подложка (5-6) ток подается в одном направлении, а для ее уменьшения – в противоположном.

Явление Пельтье обратное явлению Зеебека. При прохождении термотока в цепи термоэлемента в горячем спая теплота Пельтье поглощается, а в холодном – выделяется. Поэтому, в полном согласии со вторым началом термодинамики, для поддержания постоянного термотока необходимо к горячему спая термоэлемента непрерывно подводить извне теплоту, а от холодного спая – непрерывно отводить теплоту. Явление Пельтье в полупроводниках используют для создания достаточно экономичных и производственных холодильных установок.

**Список литературы**

1. Вейник А.И. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. – М.: Металлургия, 1965. – 375 с.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1974. – 942 с.
3. Патент РФ на полезную модель № 124860, заявка 2012103244/07, 31.01.2012. – Опубликовано 10.02.2013. – Бюл. № 4.
4. Патент РФ на полезную модель № 125773, заявка 2012102481, 25.01.2012. – Опубликовано 10.03.2013. – Бюл. №7.