

УДК 621.362

© Т. А. Исмаилов, Х. М. Гаджиев, С. М. Гаджиева

## ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА С ОТВОДОМ ТЕПЛА В ВИДЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

В термоэлектрических устройствах (ТЭУ) с отводом тепла в виде излучения вместо теплоты Пельтье энергия на горячих спаях преобразуется в фотоны. Это позволяет изменить длину ветвей и изготовить ТЭУ в виде тонкопленочной структуры. В результате уровень всех тепловыделений вместе с паразитными явлениями в спаих и проводниках оказывается меньше холодильного эффекта.

*Кл. сл.:* излучение, охлаждение, длина ветвей, тонкопленочная структура

### ТРАДИЦИОННАЯ СХЕМА ПЕЛЬТЬЕ-ОХЛАЖДЕНИЯ

Термоэлектрическое охлаждение основано на использовании эффекта Пельтье, который состоит в том, что при прохождении электрического тока через цепь, составленную из разнородных проводников, в местах контактов (спаев) выделяется или поглощается некоторое количество тепла [1]. Разнородность должна заключаться в различии величин энергии носителей тока в этих проводниках. Чем больше разность этих величин, тем сильнее проявляется эффект Пельтье и тем больше выделяется или поглощается тепла в местах контактов. Коэффициент, отражающий указанное качество различных проводников, называется коэффициентом Пельтье. Для определенной пары материалов выделение или поглощение тепла в единицу времени линейно зависит от силы тока, проходящего через места контактов:

$$Q = \Pi \cdot I, \quad (1)$$

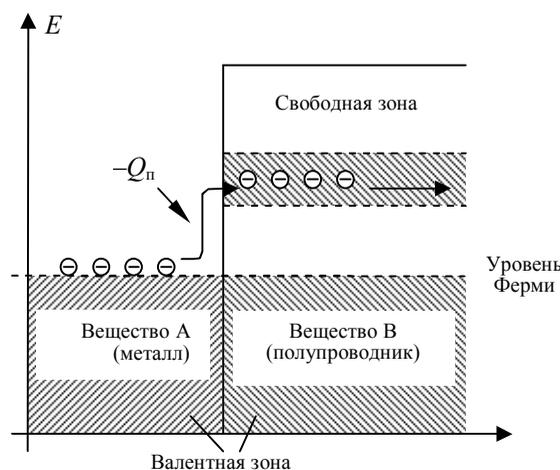
где  $Q$  — теплота Пельтье;  $\Pi$  — коэффициент Пельтье;  $I$  — сила тока.

На рис. 1 схематично проиллюстрирован физический смысл явления. На оси ординат отложена энергия электронов двух различных веществ: полупроводника и металла. Энергия электронов проводимости в электронном полупроводнике выше, чем в металле. Если под воздействием электрического поля электроны начнут двигаться из полупроводника в металл, то они будут переходить в состояние с более низкой энергией, отдавая избыточную энергию атомам кристаллической решетки. Эта энергия и является теплотой Пельтье.

При обратном направлении движения электронов, переходя на более высокий энергетический

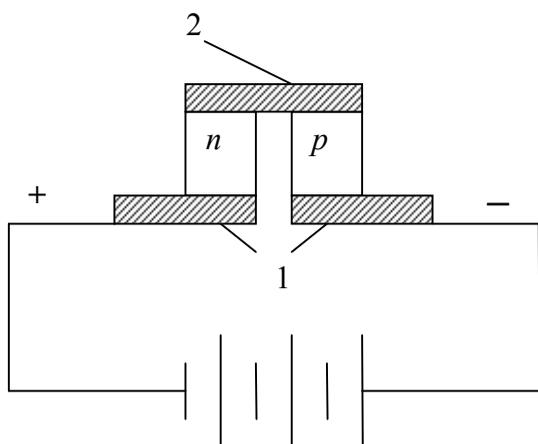
уровень, "отнимают" часть энергии от кристаллической решетки — тепло Пельтье поглощается.

В обоих случаях выделение или поглощение тепла происходит непосредственно вблизи контакта двух веществ, т. к. тепловое равновесие наступает в результате всего нескольких десятков соударений электрон—атом. На контакте дырочного полупроводника и металла имеет место обратное соотношение — электроны теряют энергию при переходе из металла в полупроводник, и при этом направлении тока выделяется теплота Пельтье; при обратном направлении тока теплота Пельтье поглощается.



**Рис. 1.** Схема расположения энергетических уровней на контакте полупроводника с металлом.

$-Q_p$  — теплота Пельтье,  $E$  — энергия электрического поля



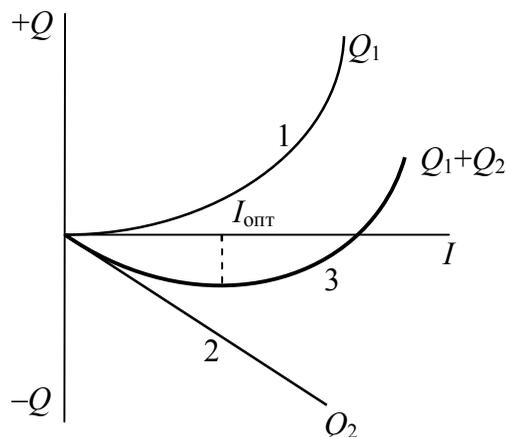
**Рис. 2.** Элементарный ТЭ.  
1 — горячие спаи термоэлемента,  
2 — холодные спаи термоэлемента

Эффект Пельтье достигает максимального значения при использовании не металлов, а полупроводников. Для пары, составленной из электронного и дырочного веществ, у которых разница в энергетических уровнях особенно велика, процесс обмена энергии электронов—атом, сопровождающийся выделением или поглощением тепла, суммируется для разных носителей тока (электронов и дырок).

В основе любого термоэлектрического охлаждающего устройства лежит элементарный термоэлемент (ТЭ), представляющий собой соединенные последовательно две полупроводниковые ветви (рис. 2), одна из которых обладает электронной (*n*), а другая дырочной (*p*) проводимостью.

При прохождении сквозь ТЭ постоянного электрического тока в направлении, указанном на рисунке, между коммутационными пластинами 1 и 2, осуществляющими спаи ТЭ, возникает разность температур, обусловленная выделением (на спае 1) и поглощением (на спае 2) теплоты Пельтье.

Если при этом за счет теплоотвода температуру спаев 1 поддерживать на постоянном уровне, температура спаев 2 понизится до некоторого определенного значения. При заданном токе величина понижения температуры будет зависеть от тепловой нагрузки на нем. Эта нагрузка складывается из теплопритока от окружающей среды, тепла от спаев 1, обусловленного теплопроводностью образующих ТЭ ветвей, и теплоты Джоуля, выделяю-



**Рис. 3.** Зависимость количества теплоты Джоуля ( $Q_1$ ) и Пельтье ( $Q_2$ ), поступающей на холодный спай от тока ( $I$ ).  
1 — кривая теплоты Джоуля  $Q_1$ ; 2 — кривая теплоты Пельтье  $Q_2$ ; 3 — результирующая кривая  $Q = Q_1 + Q_2$ ;  $I_{\text{опт}}$  — оптимальный ток питания

щейся в ветвях ТЭ при прохождении сквозь них тока.

Существенное влияние на работу ТЭ оказывает теплота Джоуля. Действительно, если поглощение теплоты Пельтье пропорционально первой степени силы тока, т. е.

$$-Q_{\text{П}} = \Pi \cdot I \cdot t, \quad (2)$$

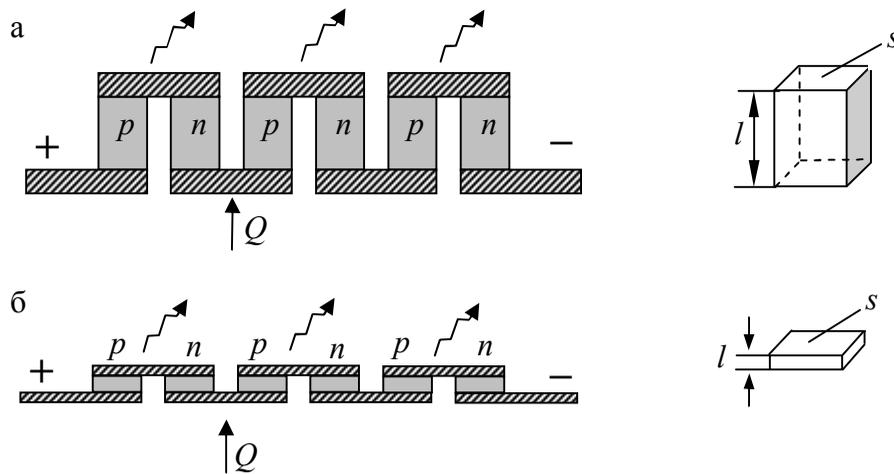
то выделение тепла в ТЭ благодаря эффекту Джоуля пропорционально квадрату силы тока:

$$+Q_{\text{Дж}} = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (3)$$

Расчет показывает, что в первом приближении около половины теплоты Джоуля приходит на холодный спай ТЭ, что соответственно уменьшает эффект охлаждения. На рис. 3 приведена зависимость тепла, приходящего на холодный спай ТЭ за счет эффекта Джоуля (1) и отнимаемого от спаев за счет эффекта Пельтье (2), от величины питающего ТЭ тока *I*.

Поскольку оба эффекта имеют место в одной электрической цепи, складывая их алгебраически, получаем результирующую кривую 3, которая характеризует тепловой баланс ТЭ при различных значениях питающего тока.

Кривая 3 имеет минимум, соответствующий оптимальному току  $I_{\text{опт}}$ , при котором имеет место максимальное понижение температуры на холод-



**Рис. 4.** Тонкопленочный излучающий ТЭУ.

$p$  — полупроводник с дырочной проводимостью;  $n$  — полупроводник с электронной проводимостью;  $Q$  — теплота, приходящая на холодный спай термоэлемента;  $l$  — длина ветви термоэлемента;  $S$  — площадь ветви термоэлемента.

а, б — изменение размеров ветвей термоэлемента

ном спае ТЭ. Благодаря пологому минимуму кривой 3 максимальное охлаждение, создаваемое ТЭ, не очень резко зависит от изменения питающего тока.

Однако заметное превышение силы тока над оптимальным его значением приводит к уменьшению эффекта охлаждения за счет возрастания теплоты Джоуля. Дальнейшее увеличение силы тока может вызвать превалирование теплоты Джоуля над теплотой Пельтье, и охлаждение спаия в этом случае перейдет в нагрев. Для нахождения величины оптимального тока напишем выражение для суммы теплоты Джоуля и Пельтье, поступающих и поглощающихся на холодном спае ТЭ в единицу времени:

$$Q = -\Pi_{1,2}I + \frac{1}{2}I^2R, \quad (4)$$

где  $\Pi_{1,2}$  — коэффициент Пельтье ТЭ, состоящего из полупроводников 1 и 2;  $R$  — сопротивление ТЭ, определенное длиной  $l$ , удельным сопротивлением  $\rho_1$  и  $\rho_2$  и сечением  $S_1$  и  $S_2$  ветвей ТЭ, причём

$$R = l \left( \frac{\rho_1}{S_1} + \frac{\rho_2}{S_2} \right). \quad (5)$$

Дифференцируя (4) и, приравняв производную нулю, находим, что  $Q$  достигает максимума при оптимальном токе

$$I_{\text{опт}} = \frac{\Pi_{1,2}}{R}, \quad (6)$$

откуда

$$Q_{\text{max}} = \frac{\Pi_{1,2}^2}{2R}. \quad (7)$$

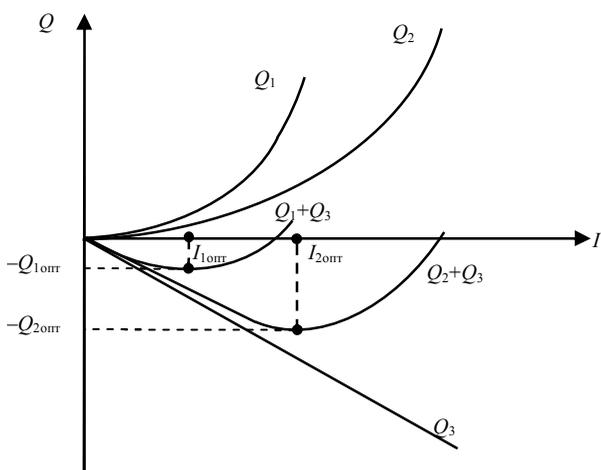
Из формулы (7) следует, что количество тепла, поглощенное на холодном спае ТЭ, или, как принято называть, его холодопроизводительность обратно пропорциональна сопротивлению ветвей ТЭ.

Анализ приведенных формул позволяет сделать вывод: внутренний механизм эффекта охлаждения в ТЭ описан не полностью — не учитывается конкретный механизм взаимодействия электронов при движении по полупроводниковым ветвям и металлическим спаиям.

#### ОБ ОТВОДЕ ТЕПЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ

Существуют термоэлектрические устройства (ТЭУ) с отводом тепла в виде излучения [2]. Горячие спаия представляют собой полупроводниковые светодиодные излучатели, предназначенные для преобразования энергии рекомбинации электронов и дырок в энергию излучения, отводящего избыточную энергию электронов в атомах после рекомбинации в окружающую среду, причём сами светодиодные излучатели не нагреваются.

На холодном спае будет происходить поглощение тепловой энергии в соответствии с эффектом Пельтье, причём в обычном ТЭУ разница в энергетических уровнях позволяет только изменить температуру кристаллической решетки в сторону увеличения или уменьшения, а в ТЭУ с отводом тепла в виде излучения перепад в энергетических уровнях значительно больше и приводит не к нагреву кристалла, а к излучению, причём, чем больше перепад, тем выше частота излучения: инфракрасное, красное, оранжевое, желтое, голубое, синее, фиолетовое и ультрафиолетовое.



**Рис. 5.** Зависимость количества теплоты Джоуля ( $Q_1$  и  $Q_2$ ) и Пельтье ( $Q_3$ ), поступающей на холодный спай, от тока ( $I$ ).

$Q_1$  — кривая теплоты Джоуля обычного ТЭУ;  $Q_2$  — кривая теплоты Джоуля излучающего ТЭУ;  $Q_3$  — кривая теплоты Пельтье;  $Q_1+Q_3$  — сумма теплоты Джоуля и теплоты Пельтье обычного ТЭУ;  $Q_2+Q_3$  — сумма теплоты Джоуля и теплоты Пельтье излучающего ТЭУ;  $-Q_{1opt}$  — оптимальное количество теплоты для обычного ТЭУ при оптимальном токе питания  $I_{1opt}$ ;  $-Q_{2opt}$  — оптимальное количество теплоты для излучающего ТЭУ при оптимальном токе питания  $I_{2opt}$ .

Такой способ имеет преимущества перед обычными ТЭУ с горячими и холодными спаями в том, что можно получить более низкую температуру на холодном спае, т. к. практически отсутствует паразитный кондуктивный перенос тепла со стороны горячего спая, который нагревается гораздо меньше за счет того, что почти вся энергия уходит в виде излучения, а не преобразуется в тепло на горячем спае.

Дополнительным преимуществом является быстроедействие процесса отвода тепла в виде излучения. Энергия излучения прямо пропорционально зависит от частоты излучения. Поэтому для повышения эффективности отвода тепла целесообразно использовать такие материалы  $p$ -типа и  $n$ -типа полупроводниковых ветвей, которые применяются в светодиодах ультрафиолетового излучения.

Дальнейшее совершенствование ТЭУ возможно за счет изменения длины ветвей (рис. 4).

В этом случае можно уменьшить сопротивление ветвей и повлиять в соответствии с формулой (1) на джоулевы тепловыделения. В обычном ТЭ

(рис. 2) уменьшение длины ветвей ограничивается кондуктивным переносом между горячими и холодными спаями, что не позволяет располагать их слишком близко к друг другу. В излучающем ТЭУ отсутствует горячий спай и, следовательно, практически отсутствует кондуктивный теплоперенос, т. к. вместо тепла энергия выделяется в виде излучения. Изготовление ТЭУ в виде тонкопленочной структуры позволяет реализовать несколько преимуществ:

1) резко уменьшается длина ветвей и сопротивление ветвей, что уменьшает джоулевы тепловыделения по формуле (1) и отодвигает оптимум ТЭУ в сторону больших токов питания (рис. 5);

2) при толщине пленки, меньше длины свободного пробега электронов, большая часть электронов пройдет через ветви не сталкиваясь с атомами кристаллической решетки и не выделяя тепла;

3) тонкая пленка становится прозрачной и позволяет проходить излучению во все стороны беспрепятственно.

На практике величина сопротивления ветвей настолько мала, что практически не будет джоулевых тепловыделений. Это радикально влияет на функционирование ТЭУ, т. к. раньше интегральные тепловыделения в нем превышали процессы охлаждения, а теперь картина становится прямо противоположной: практически отсутствуют джоулевы тепловыделения, вместо теплоты Пельтье энергия преобразуется в излучение и в результате уровень всех тепловыделений вместе с паразитными явлениями в спаях и проводниках оказывается меньше холодильного эффекта. Это позволяет повысить эксплуатационные характеристики охлаждающего ТЭУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005. 534 с.
2. Патент РФ №2405230, 27.11.2010. Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения.

*Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала*

Контакты: *Гаджиева Солтанат Магомедовна*  
kafedra.toe@mail.ru

Материал поступил в редакцию 16.01.2013.

## THIN-FILM THERMOELECTRIC DEVICES WITH HEAT AS RADIATION COOLING MICROSYSTEMS

**T. A. Ismailov, H. M. Hajiyev, S. M. Hajiyeva**

*Dagestan State Technical University, Makhachkala*

In TEU with heat in the form of radiation, rather than the Peltier heat, the energy of the hot junctions converted into photons. This allows you to change the length of the branches and make TEU as a thin film structure. As a result, the level of heat release along with parasitic effects in junctions and conductors is less than the cooling effect.

*Keywords:* radiation, cooling, length of the branches, thin-film structure