

Д. ф.-м. н. Л. И. АНАТЫЧУК, А. В. ПРИБЫЛА

Украина, г. Черновцы,

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины

E-mail: anatych@inst.cv.ua

Дата поступления в редакцию

02.07.2010 г.

Оппонент д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК

(ЧО ИМП НАНУ, г. Черновцы)

АНИЗОТРОПНЫЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭДС И ТОКА

Разработаны компьютерные методы и программы, позволяющие провести оптимизацию конструкции анизотропного термоэлемента, направленную на повышение его энергетических характеристик.

В настоящее время для термоэлектрического преобразования энергии наиболее широко используются термопарные элементы, которым наряду с несомненными достоинствами присущи и недостатки, связанные с тем, что для получения необходимых электрических напряжений их необходимо соединять в последовательные цепи. Это приводит к усложнению конструкций и снижению их надежности. Также имеются технологические и эксплуатационные трудности, связанные с соединением материалов термопар. Все это стимулирует поиск иных термоэлектрических преобразователей энергии.

Одним из преобразователей, который не содержит приведенных выше недостатков, является анизотропный термоэлемент (АТ). Он представляет собой вырезанный соответствующим образом брусок из анизотропного материала и поэтому, в отличие от термопар, здесь не имеется проблем с коммутацией. Развиваемая им термо-эдс зависит от геометрических размеров кристалла, т. е. может возрастать до необходимой величины при простом увеличении отношения размеров его сечения.

Расчетам основных параметров анизотропного термоэлемента посвящено достаточно большое количество публикаций, однако все они проводились с какими-либо приближениями и упрощениями. Так, например, в [1—3 и др.] не учитывалось наличие токовых контактов, а в [4, 5 и др.] рассматриваются только точечные контакты; в [5, 6] рассмотрены сплошные контакты без учета протекания по ним тепла от нагревателя к холодильнику. В [1—4, 6 и др.] не учитываются температурные зависимости кинетических коэффициентов материала; в [5 и др.] только приближенно учитываются температурные зависимости свойств материала.

Такая ситуация легко объяснима, поскольку используемые в известных работах аналитические методы нахождения распределения тепловых потоков и электрического потенциала или вообще не позволя-

ют получить требуемые решения, или не дают необходимой точности. Поэтому, несмотря на достаточно большое число исследований, до настоящего времени не создана достаточно полная модель АТ, где учитывались бы одновременно и температурные зависимости свойств материала, и влияние реальных контактов конкретной конфигурации.

Целью настоящей работы является исследование свойств АТ с применением компьютерных методов вычисления для создания достаточно полных моделей анизотропного термоэлемента в режиме генерации ЭДС и тока.

Физическая модель АТ представлена на рис. 1. На верхней грани анизотропного бруска 2 размещен нагреватель 1, который создает в нем однородный тепловой поток. На нижней стороне бруска размещен термостат 6, который имеет большие, чем нижняя сторона бруска, размеры и находится в тепловом контакте с токовыми проводниками 4, электрически изолированными от термостата изоляцией 5. Между нагревателем 1, термостатом 6 и бруском 2 размещена электрическая изоляция 7. На боковых гранях бруска 2 размещены токовые пластины 3, размеры которых в направлении оси y меньше, чем размеры боковых поверхностей анизотропного бруска. Ток от анизотропного термоэлемента отводится проводниками 4 во внешнюю цепь с сопротивлением R . Боковые грани АТ изолированы как по температуре, так и электрически.

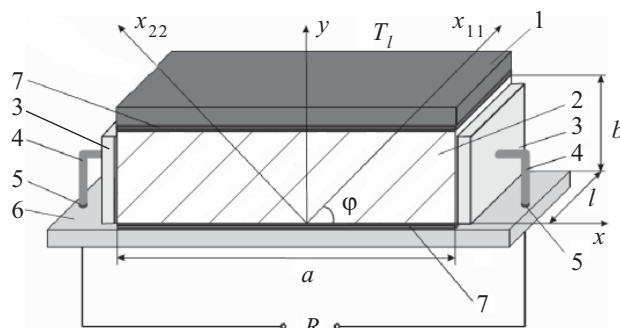


Рис. 1. Анизотропный термоэлемент:

1 — нагреватель; 2 — анизотропный брусок; 3 — токовые пластины; 4 — токовые проводники; 5 — электрическая изоляция проводников; 6 — термостат; 7 — электрическая изоляция термостата и нагревателя; x_{11} , x_{22} — кристаллографические оси; R — внешняя нагрузка

Распределения потенциала и тока в термоэлементе описываются выражениями [7]

$$-\nabla \left[\left(\hat{k}(T) + \hat{\alpha}(T)^2 \hat{\sigma}(T) T + \hat{\alpha}(T) U \hat{\sigma}(T) \right) \nabla T \right] - \nabla \left[\left(\hat{\alpha}(T) \hat{\sigma}(T) T + U \hat{\sigma}(T) \right) \nabla U \right] = 0; \quad (1)$$

$$-\nabla (\hat{\sigma}(T) \hat{\alpha}(T) \nabla T) - \nabla (\hat{\sigma}(T) \nabla U) = 0, \quad (2)$$

полученными из законов сохранения энергии и электрического заряда, соответственно (∇ — векторный дифференциальный оператор; $\hat{\alpha}$, $\hat{\sigma}$, \hat{k} — коэффициенты термо-эдс, электропроводности и теплопроводности). Приведенные уравнения являются дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных для искомых функций электрического потенциала U и температуры T , которые необходимо решать с соответствующими граничными условиями.

Для построения компьютерной модели был использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysic, что дает возможность смоделировать задачу в виде краевой задачи

$$\nabla(-C \nabla M) = 0 \quad (3)$$

для матрицы

$$M = \begin{bmatrix} T \\ U \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Коэффициенты модели C получаются сравнением уравнений (1) и (2) с уравнением (3).

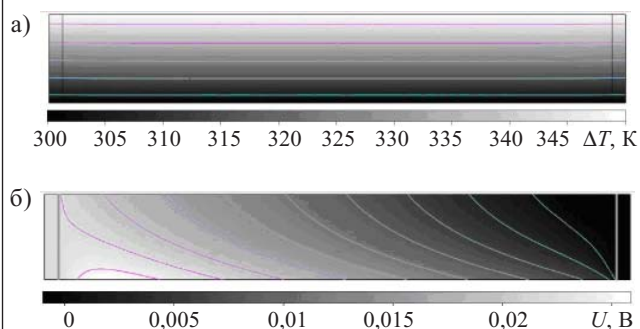


Рис. 2. Распределение температуры (а) и электрического потенциала (б) в АТ (линии соответствуют изотермическим (а) и эквипотенциальным (б) поверхностям)



Рис. 3. Линии плотности электрического тока (а) и вихревых термоэлектрических токов (б)

Моделирование физических полей в АТ позволяет определить распределения температуры, электрического потенциала и тока для термоэлементов произвольных размеров. На рис. 2, 3 приведены примеры таких распределений для термоэлемента размерами $a=20$ мм, $b=3$ мм при перепаде температуры в нем $\Delta T=50$ К. Материал термоэлемента — монокристалл CdSb, сплошные токовые контакты — медные.

На рис. 3, а в области, соответствующей размещению электрических контактов, наблюдается возмущение линий плотности электрического тока, что вызвано наличием вихревых термоэлектрических токов. При помощи специальной технологии [7] было проведено «разделение токов» и получены линии распределения плотности последнего (см. рис. 3, б).

На основании полученных распределений потенциала и тока была проведена оптимизация АТ. С этой целью определялись зависимости основных энергетических характеристик АТ от перепада температуры в термоэлементе, его размеров и размещения токовых контактов.

Как следует из рис. 4 и 5, в заданном интервале температур величины ЭДС и КПД АТ возрастают с увеличением перепада температуры в термоэлементе. Полученные зависимости приближенно можно получить аналитическим способом, как это показано в [8]. Расчеты КПД АТ были проведены с учетом и без учета контактного электрического сопротивления на границе анизотропной пластины и металлических то-

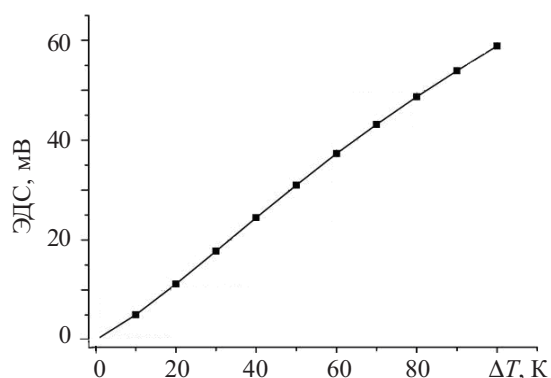


Рис. 4. Зависимость ЭДС АТ от перепада температуры

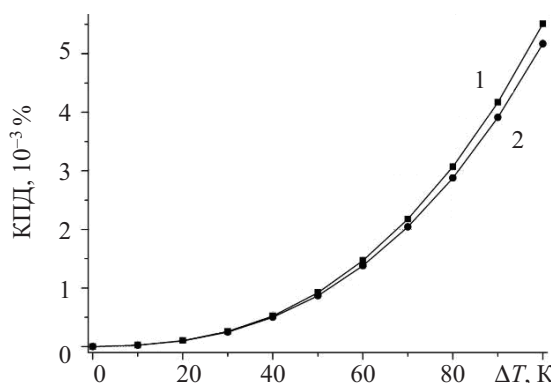


Рис. 5. Зависимость величины КПД АТ от перепада температуры без учета (1) и с учетом (2) контактного сопротивления

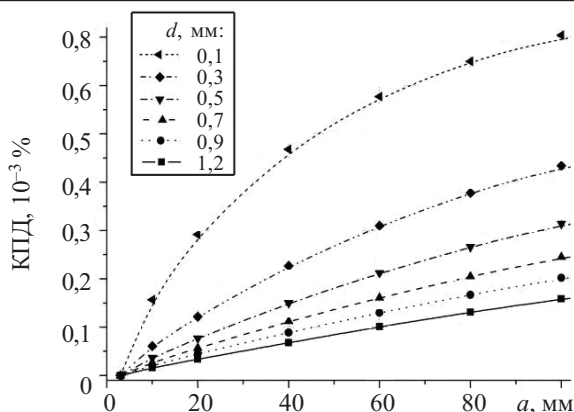


Рис. 6. Зависимость КПД АТ от длины a термоэлемента при разных значениях толщины d токовых контактов

ковых контактов (см. рис. 5). Установлено, что наличие контактного сопротивления ($\rho_k = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) приводит к уменьшению КПД АТ на 3%. То есть очевидно, что оптимизация АТ должна включать в себя поиск оптимальных размеров и места размещения токовых контактов.

Из представленных на **рис. 6** зависимостей видно, что при одинаковых значениях длины анизотропного термоэлемента уменьшение толщины токовых контактов приводит к уменьшению КПД, связанному с увеличением тепловых потерь.

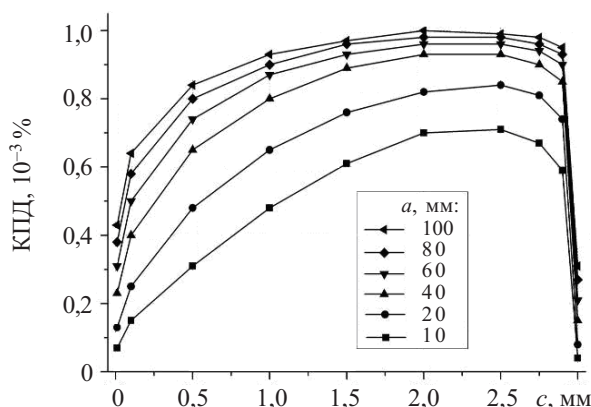


Рис. 7. Зависимость КПД АТ от ширины c токовых контактов при разных значениях длины a анизотропного термоэлемента шириной 3 мм

Анализ приведенных на **рис. 7** зависимостей показал, что оптимальная ширина токовых контактов не зависит от длины термоэлемента и составляет 2,2 мм. Установлено, что такое соотношение оптимальной ширины контакта и ширины АТ (приблизительно 2/3) сохраняется и при других размерах термоэлемента в исследуемом интервале температуры.

Также проведена оптимизация места размещения токовых контактов (расстояния h от края термоэлемента) на боковых гранях анизотропного бруска (**рис. 8**). Установлено, что при размещении токовых контактов в нижней части термоэлемента (возле холодного термостата) тепловые потери через контакты уменьшаются, что приводит к увеличению КПД.

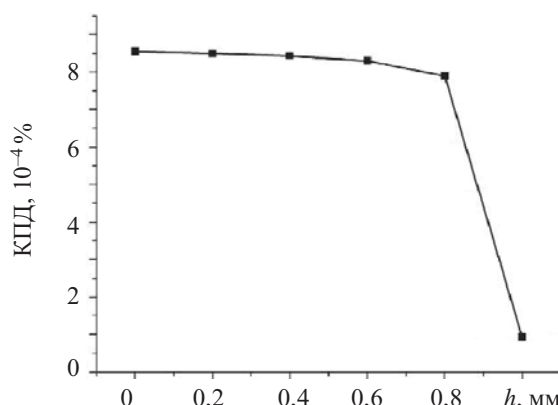


Рис. 8. Зависимость величины КПД АТ от размещения токовых контактов фиксированного размера

На основании расчетов был выбран вариант наиболее эффективной конструкции АТ с контактами оптимальных размеров, расположенными в нижней части термоэлемента. Это позволило повысить КПД анизотропного термоэлемента на 15%.

Таким образом, разработанные компьютерные методы и программы позволяют провести оптимизацию конструкции анизотропного термоэлемента, направленную на повышение его энергетических характеристик.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Снарский А. А., Трофимов С. С. // Физика и техника полупроводников.— 1983.— Т. 17, № 5.— С. 951—953. [Snarskii A. A., Trofimov S. S. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1983. Vol. 17, N 5. P. 951]
2. Самойлович А. Г., Слипенченко В. Н. // Физика и техника полупроводников.— 1981.— Т. 15, № 50.— С. 965—967. [Samoilovich A. G., Slipchenko V. N. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1981. Vol. 15, N 50. P. 965]
3. Бытенский Л. И., Гудкин Т. С., Иорданишвили Е. К., Фискинд Е. Э. // Физика и техника полупроводников.— 1978.— Т. 12, № 3.— С. 538—542. [Bytenskii L. I., Gudkin T. S., Iordanishvili E. K., Fiskind E. E. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1978. Vol. 12, N 3. P. 538]
4. Охрем О. А. ЕРС вихрового анизотропного термоэлемента // Термоэлектрика.— 2002.— № 1.— С. 18—23. [Okhrem O. A. // Termoelektrika. 2002. N 1. P. 18]
5. Снарский А. А., Пальти А. М., Ащеулов А. А. Анизотропные термоэлементы. Обзор // Физика и техника полупроводников.— 1997.— Т. 31, № 11.— С. 1281—1298. [Snarskii A. A., Pal'ti A. M., Ashcheulov A. A. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1997. Vol. 31, N 11. P. 1281]
6. Королук С. Л., Пилат И. М., Самойлович А. Г. и др. // Физика и техника полупроводников.— 1973.— Т. 7, № 4.— С. 725—734. [Korolyuk S. L., Pilat I. M., Samoilovich A. G. i dr. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1973. Vol. 7, N 4. P. 725]
7. Прибила А. В. Особливості термоелектричних явищ у спіральному прямокутному анізотропному термоелементі поперечного типу // Термоэлектрика.— 2006.— №1.— С. 19—23. [Pribila A. V. // Termoelektrika. 2006. N 1. P. 19]
8. Самойлович А. Г. Термоэлектрические и термомагнитные методы превращения энергии.— Черновцы: Рута, 2006. [Samoilovich A. G. Chernovtsy. Ruta. 2006]