

## Расчет тонкопленочного термоэлектрического модуля, изготавливаемого методом импульсного лазерного осаждения

© Г.Н. Дубровин, Е.С. Герасимова, А.Е. Шупенев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Приведен расчет тонкопленочного термоэлектрического модуля, изготавливаемого методом импульсного лазерного осаждения. Модуль представляет собой полиимидную подложку размерами  $54 \times 20 \times 0,1$  мм с осажденным на нее термоэлектрическим материалом на основе  $Bi_2Te_3$ . В результате расчета определяется необходимое число термопар для генерации модулем напряжения 3,6 В при перепаде температур 16 К.*

**Ключевые слова:** термоэлектрический модуль, тонкопленочные термоэлементы, импульсное лазерное осаждение.

**Введение.** Термоэлектрические явления в твердых телах находят применение в различных областях техники. Эффект Зеебека (термо-ЭДС) используется для преобразования тепловой энергии в электрическую. Перенос тепла электрическим током (эффект Пельтье) лежит в основе действия твердотельных охлаждающих и термостатирующих устройств [1].

Термоэлектрический модуль (элемент Пельтье) представляет собой совокупность термопар, электрически соединенных, как правило, последовательно. В стандартном элементе Пельтье термопары помещаются между двух плоских керамических пластин на основе оксида или нитрида алюминия (рис. 1) [2].

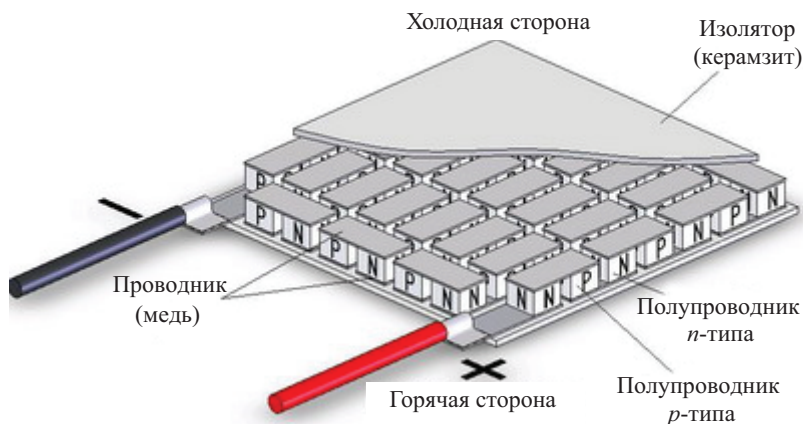


Рис. 1. Объемный термоэлектрический модуль

Многие задачи, которые стоят перед разработчиками термоэлектрических устройств, могут быть успешно решены с применением пленочных термоэлементов (ПТЭ) и пленочных термобатарей (ПТБ) (рис. 2).

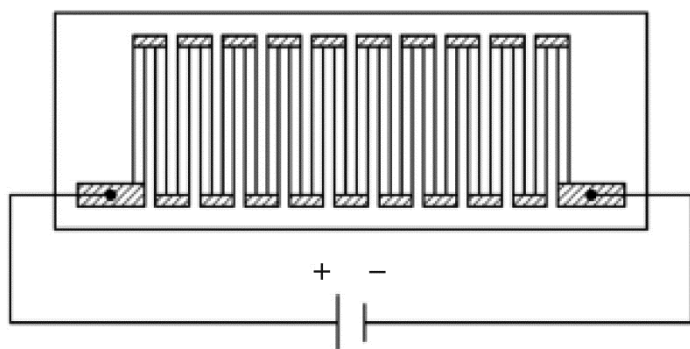


Рис. 2. Пленочный термоэлемент

Одно из главных достоинств ПТБ — возможность принципиально увеличить число элементов при сохранении объема преобразователя, а при необходимости — создавать микроминиатюрные устройства. На основе ПТБ могут быть изготовлены малогабаритные источники питания, слаботочные микрохолодильники и термостаты, высокочувствительные и достаточно малоинерционные датчики температуры и теплового потока и т.п. [1,3]. Вакуумные технологии изготовления улучшают качество ПТБ, позволяют достичь высокой точности осаждения полупроводников на полиимидные подложки. Одной из таких технологий является импульсное лазерное осаждение (ИЛО).

Основные научные результаты, полученные при разработке термоэлектрического модуля (ТЭМ), опубликованы во множестве журнальных статей, систематизированы в ряде обзоров, монографий и справочников. Эти публикации охватывают широкий круг вопросов — технологию получения и свойства полупроводниковых сплавов, конструкции термоэлементов и термоэлектрических батарей, методы измерения, схемы и параметры энергетических установок и др. Вместе с тем методы расчета теплоэнергетических характеристик ТЭМ освещены в них недостаточно полно.

Во-первых, отсутствует систематическое изложение с единых методических позиций теории термоэлектрических преобразователей — вывод основных расчетных соотношений, анализ их точности и пределов применимости. Во-вторых, рекомендуемые методики расчета обычно недостаточно учитывают особенности проектирования, изготовления и испытаний конкретных конструкций ТЭМ.

Ниже систематизированы формулы и приведен алгоритм расчета энергетических характеристик ТЭМ в оптимальном режиме работы

(максимум КПД). Расчетные формулы получены решением системы уравнений теплового баланса на спаях термоэлементов и уравнений Кирхгофа для электрических цепей [4].

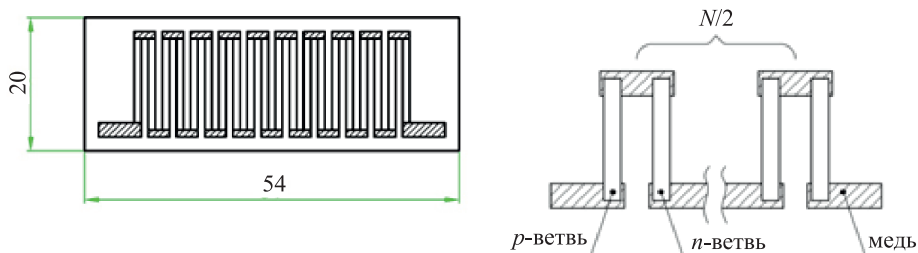


Рис. 3. Расчетная схема пленочного термоэлемента

В соответствии с рекомендациями [4], справочными данными и геометрическими особенностями ПТЭ (рис. 3) примем следующие исходные данные для расчета:

материал полупроводников:

*p*-ветвь —  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Sb}_{1,5}$ ,

*n*-ветвь —  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se}_{0,3}$ ;

температура спая:

горячего  $T_1 = 310 \text{ K}$ ;

холодного:  $T_0 = 294 \text{ K}$ ;

номинальное напряжение  $U = 3,6 \text{ В}$ ;

ток  $I = 0,1 \text{ А}$ ;

среднеинтегральные коэффициенты термоЭДС:

$\alpha_n = 175 \cdot 10^{-6} \text{ В/К}$ ,

$\alpha_p = 163 \cdot 10^{-6} \text{ В/К}$ ;

среднеинтегральные коэффициенты теплопроводности:

$\chi_n = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(см} \cdot \text{К)}$ ,

$\chi_p = 14,3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(см} \cdot \text{К)}$ ;

среднеинтегральные коэффициенты электропроводности:

$\sigma_n = 855 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$ ,

$\sigma_p = 1200 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$ .

Рассчитаем следующие параметры:

термоэлектрическую эффективность

$$z = \left[ \frac{\alpha_n + \alpha_p}{\left( \frac{\chi_n}{\sigma_n} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{\chi_p}{\sigma_p} \right)^{\frac{1}{2}}} \right]^2 \cdot 300 = 0,682;$$

среднюю температуру

$$T_{\text{cp}} = \frac{T_1 + T_0}{2} = 302 \text{ К};$$

перепад температуры

$$\Delta T = T_1 - T_0 = 16 \text{ К};$$

КПД

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{\sqrt{1 + zT_{\text{cp}}} - 1}{\sqrt{1 + zT_{\text{cp}}} - \frac{T_0}{T_1}} = 0,051;$$

выходную электрическую мощность

$$W = UI = 0,36 \text{ Вт.}$$

Тогда количество термоэлементов (пар ветвей)

$$N = \frac{U}{2\alpha\Delta T} \frac{\sqrt{1 + zT_{\text{cp}}} + 1}{\sqrt{1 + zT_{\text{cp}}}} = 711,943.$$

На основании проведенного расчета установлено, что для генерации напряжения 3,6 В при перепаде температур 16 К необходимо 712 термопар. В одном тонкопленочном термоэлементе 19 термопар, следовательно, термоэлектрическая батарея должна состоять из 38 тонкопленочных термоэлементов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гольцман Б.М., Дашевский З.М., Кайданов В.И., Коломеец Н.В. *Пленочные термоэлементы: физика и применение*. Москва, Наука, 1985, 233 с.
- [2] *Устройство термоэлектрического модуля (Элемента Пельтье)*. URL: <http://kryothermtec.com/ru/technology> (дата обращения 30.08.2015).
- [3] Rettig F., Moos R. Direct thermoelectric gas sensors: Design aspects and first gas sensors. *Sensors and Actuators B*. 2007, vol. 143, no. 1, pp. 413–419.
- [4] Марченко О.В. *Методы расчета термоэлектрических генераторов*. Новосибирск, Наука, 1995, 199 с.

Статья поступила в редакцию 12.10.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Дубровин Г.Н., Герасимова Е.С., Шупенев А.Е. Расчет тонкопленочного термоэлектрического модуля, изготовляемого методом импульсного лазерного осаждения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/temp/1441.html>

**Дубровин Глеб Николаевич** — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
e-mail: [dubrovingleb@yandex.ru](mailto:dubrovingleb@yandex.ru)

**Герасимова Екатерина Сергеевна** — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [kate\\_7@bk.ru](mailto:kate_7@bk.ru)

**Шупенев Александр Евгеньевич** — инженер, аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана.

---

## Calculation of the thin-film thermoelectric module manufactured by pulsed laser deposition

© G.N. Dubrovin, E.S. Gerasimova, A.E. Shupenev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article presents calculation method of a thin-film thermoelectric module to be manufactured by pulsed laser deposition. The module is a polyimide substrate (54×20×0,1 mm), on which thermoelectric Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based material is deposited. By the results of calculation we determined the required number of thermocouples for the module to generate a voltage of 3.6 V at a temperature difference of 16 K.*

**Keywords:** thermoelectric module, thin-film thermoelements, pulsed laser deposition.

### REFERENCES

- [1] Goltsman B.M., Dashevsky Z.M., Kaidanov V.I., Kolomoets N.V. *Plenochnyye termoelementy: fizika i primeneniye* [Film thermoelements: Physics and Applications]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 233 p.
- [2] *Ustroystvo termoelektricheskogo modulya (Element Peltier)* [Thermoelectric cooler (TEC) construction (Peltier cooler)]. Available at: <http://kryothermtec.com/ru/technology> (accessed 30 August 2015).
- [3] Rettig F., Moos R. Direct thermoelectric gas sensors: Design aspects and first gas sensors. *Sensors and Actuators B*. 2007, vol. 143, no. 1, pp. 413–419.
- [4] Marchenko O.V. *Metody rascheta termoelektricheskikh generatorov* [Methods for calculating the thermoelectric generators]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, 199 p.

**Dubrovin G.N.**, a student of Bauman Moscow State Technical University.  
e-mail: [dubrovingleb@yandex.ru](mailto:dubrovingleb@yandex.ru)

**Gerasimova E.S.**, a student of Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [kate\\_7@bk.ru](mailto:kate_7@bk.ru)

**Shupenev A.E.**, an engineer, postgraduate student of Bauman Moscow State Technical University.