



Константинович И.А.

Константинович И.А.^{1,2}, Рендигевич О.В.²

¹Институт термоэлектричества НАН
и МОН Украины ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина;

²Черновицкий национальный университет,
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского 2,
Черновцы, 58012, Украина



Рендигевич О.В.

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИРОТРОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ

В работе аналитическими и числовыми методами исследованы основные соотношения для расчета оптимальных характеристик гиротропных термоэлементов в режиме генерации электрической энергии. Рассмотрены термоэлектрические материалы $InSb$, $InAs$ и Bi_2Te_3 для гиротропных термоэлементов. Для материала $InSb$ проведено компьютерное моделирование и получены распределения температур в гиротропных термоэлементах разной формы. Получены зависимости КПД от температуры для гиротропных термоэлементов оптимальной, прямоугольной и кольцевой форм.

Ключевые слова: гиротропный термоэлемент, магнитное поле, термоэлектрический материал, добротность, КПД.

In this paper, analytical and numerical methods were used to study the basic relations for the calculation of optimal characteristics of gyrotropic thermoelements in electric energy generation mode. The $InSb$, $InAs$ and Bi_2Te_3 thermoelectric materials for gyrotropic thermoelements were examined. Computer simulation was performed for $InSb$ material and temperature distributions in various-shaped gyrotropic thermoelements were found. The temperature dependences of efficiency for gyrotropic thermoelements of optimal, rectangular and annular shapes were obtained.

Key words: gyrotropic thermocouple, magnetic field, a thermoelectric material, good quality, efficiency.

Введение

Известно, что термоэлектрические приборы и системы, разработанные на них основе, широко применяются в энергетике, холодильной и измерительной технике [1-3]. Основные достижения термоэлектричества в области приборостроения получены на базе физики термопарных термоэлементов. Однако перспективным направлением развития термоэлектричества остается изобретение новых типов термоэлементов, в частности на основе гиротропных сред и улучшения эффективности существующих. Исследованию свойств гиротропных термоэлементов посвящен ряд работ [1-16].

Гиротропные термоэлементы имеют ряд привлекательных свойств:

- отсутствие внутренних спаев обеспечивает их надежность и технологичность;

- возможность беспаяного соединения колец в пространственную спиральную структуру для наращивания необходимых напряжений;
- возможность повышения эффективности под действием температурного и магнитного полей, особенно при их использовании в измерительной технике.

Поэтому актуальность работы состоит в необходимости повышения эффективности и надежности термоэлектрических преобразователей энергии на основе гиротропных термоэлементов для дальнейшего их использования в приборостроении.

Целью работы является оценка эффективности гиротропных термоэлементов в режиме генерации электрической энергии.

Математическая модель

Уравнение теплопроводности для однородного гиротропной среды имеет следующий вид [1]:

$$\kappa \Delta T + \rho_0 j^2 + 2\alpha_B \left(j_y \frac{\partial T}{\partial x} - j_x \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

где κ – коэффициент теплопроводности гиротропной среды; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление; j – модуль вектора плотности электрического тока; j_x, j_y – проекции вектора \mathbf{j} в декартовой системе координат; $\alpha_B = Q_{\perp} B$ – асимметрическая часть тензора термоЭДС в гиротропной среде имеет вид

$$\alpha_B = \begin{pmatrix} \alpha_0 & \alpha_B & 0 \\ -\alpha_B & \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\perp} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где Q_{\perp} – коэффициент Нернста-Эттингсгаузена.

Учитывая аксиальную симметрию системы, запишем выражение (1) в полярной системе координат

$$\kappa \Delta T + \rho_0 j^2 + 2Q_{\perp} B \left(j_{\varphi} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{j_r}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) = 0, \quad (3)$$

где j_{φ} – азимутальная и радиальная составляющие вектора плотности тока \mathbf{j} , $r_1 \leq r \leq r_2$ – радиус термоэлемента.

Результаты компьютерного моделирования

Для построения компьютерной модели гиротропных термоэлементов прямоугольной, спиральной и оптимальной форм использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics [17]. Расчеты распределений температур в гиротропных термоэлементах осуществлялся методом конечных элементов. С помощью компьютерного моделирования были определены распределения температур в гиротропных термоэлементах разной формы для материала *InSb* в интервале температур 300 – 700 К и магнитном поле с индукцией $B = 1$ Тл. На рис. 1 приведены трехмерные модели сетки метода конечных элементов (а) и распределения температур (б) в гиротропном термоэлементе прямоугольной формы (термоэлемент Нернста-Эттингсгаузена).

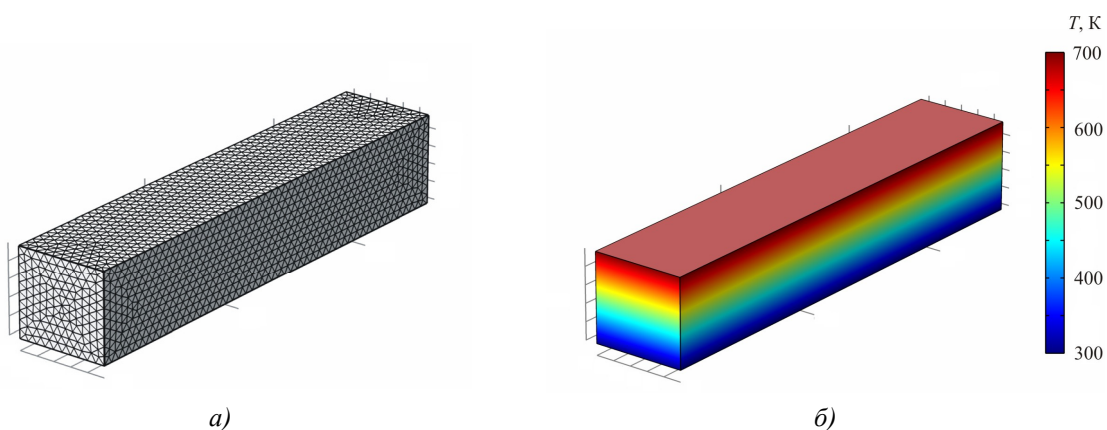


Рис. 1. Трехмерные модели сетки метода конечных элементов (а) и распределения температур (б) в гиротропном термоэлементе прямоугольной формы.

На рис. 2 приведены трехмерные модели сетки метода конечных элементов (а) и распределения температур (б) в спиральном гиротропном термоэлементе.

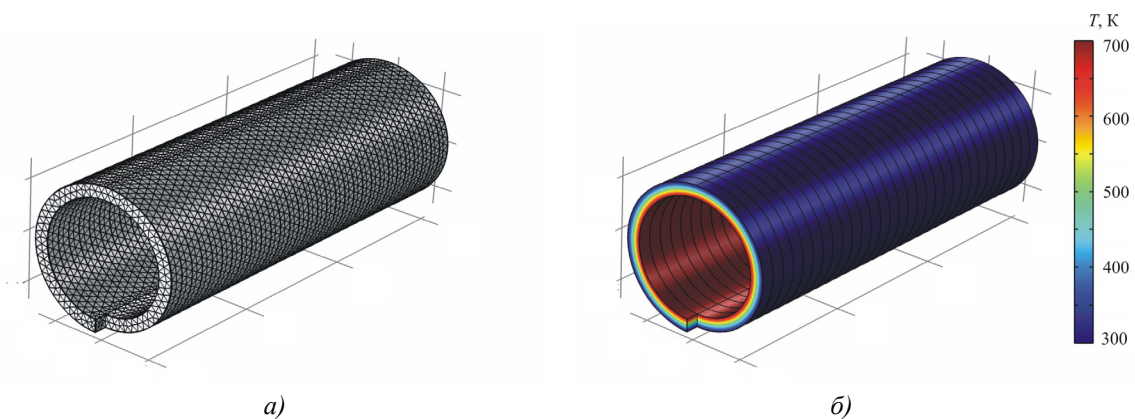


Рис. 2. Трехмерные модели сетки метода конечных элементов (а) и распределения температур (б) в гиротропном спиральном термоэлементе.

На рис. 3 приведены трехмерные модели сетки метода конечных элементов (а) и распределения температур (б) в гиротропном термоэлементе оптимальной формы.

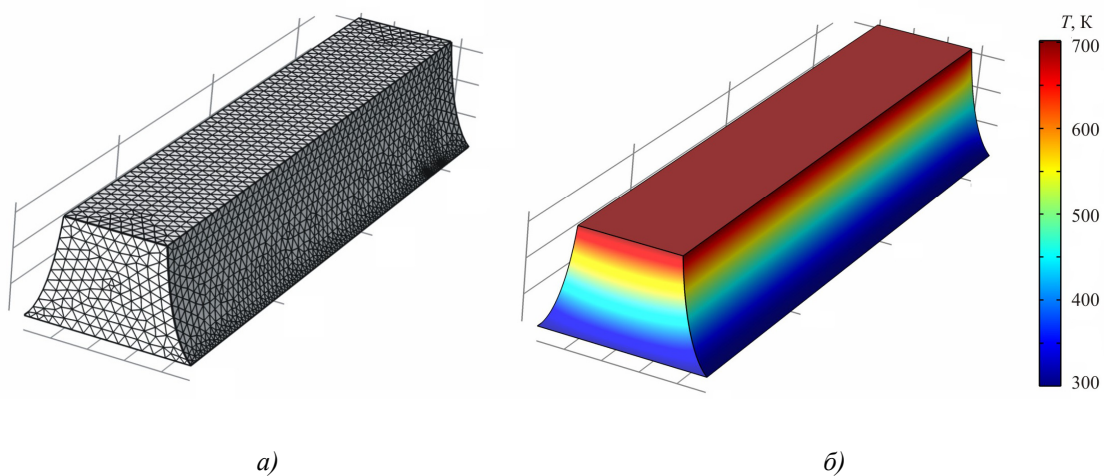


Рис. 3. Трехмерные модели сетки метода конечных элементов (а) и распределения температур (б) в гиротропном термоэлементе оптимальной формы.

Расчет КПД

Известно, что КПД гиротропного термоэлемента оптимальной формы определяется формулой [2]:

$$\eta_1 = \eta_k \frac{1}{1 + \frac{2M_H(1+M_H)}{T_2 Z_H}}, \quad (4)$$

КПД гиротропного термоэлемента прямоугольной формы [1] –

$$\eta_2 = \frac{\eta_k}{\frac{4}{Z_H T_2} - \frac{2T_1}{T_2} - \frac{1}{2}\eta_k}. \quad (5)$$

Здесь $M_H = \sqrt{1 - Z_H \bar{T}}$, Z_H – термомагнитная добротность, T_1 и T_2 – температура холодной и горячей стороны соответственно, η_k – КПД цикла Карно, \bar{T} – средняя температура.

Для кольцевого гиротропного термоэлемента КПД [3]:

$$\eta_3 = Z_H \frac{\Delta T}{4}. \quad (6)$$

На рис. 4 приведены температурные зависимости добротности для термоэлектрических материалов $InSb$, $InAs$ и Bi_2Te_3 . Видно, что лучшим материалом для изготовления генераторных гиротропных термоэлементов является $InSb$, что согласовывается с экспериментальными результатами, приведенными в работе [1].

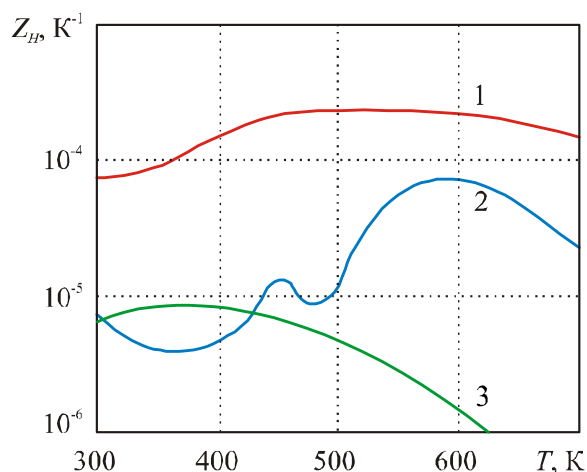


Рис. 4. Температурные зависимости добротности термоэлектрических материалов для гиротропных термоэлементов (1 – $InSb$, 2 – $InAs$, 3 – Bi_2Te_3).

Для расчетов был выбран материал $InSb$ в интервале температур 300 – 700 К. Гиротропные термоэлементы разной формы подвергались действию магнитного поля с индукцией 1 Тл. По данным расчетов построены зависимости КПД от температуры горячей стороны термоэлемента T_2 при постоянной холодной стороне $T_1 = 300$ К для $InSb$ (рис. 5).

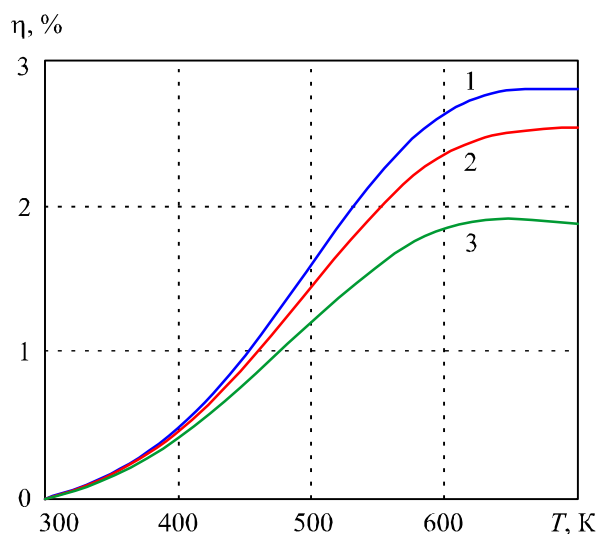


Рис. 5. Зависимость КПД от температуры для гиротропных термоэлементов разной формы (1 – оптимальной формы, 2 – прямоугольной формы, 3 – кольцевой формы).

Из рис. 5 видно, что при перепаде температур между горячей и холодной стороной 400 К и магнитном поле с индукцией 1 Тл для гиротропного термоэлемента оптимальной формы максимальное значение КПД составляет приблизительно 2.8 %, что меньше чем у термопарных элементов на основе Bi_2Te_3 и $PbTe$. Однако гиротропные термоэлементы характеризуются повышенной надежностью и возможностью наращивания высоких напряжений благодаря беспаянному соединению в пространственную спиральную структуру, что делает такие термоэлементы перспективными для использования в измерительной и военной технике. Такие термоэлементы также могут быть использованы для изготовления высокочувствительных сенсоров температуры и теплового потока.

Выводы

1. Выполнено сравнение параметров термоэлектрических материалов ($InSb$, $InAs$ и Bi_2Te_3) для гиротропных термоэлементов. Определено, что лучшим материалом для изготовления генераторных гиротропных термоэлементов является $InSb$, среднее значение добротности которого в интервале температур 400 – 600 К составляет $4 \cdot 10^4 \text{ K}^{-1}$.
2. С помощью компьютерного моделирования определены распределения в рабочем теле гиротропных термоэлементов прямоугольной, спиральной и оптимальной форм для термоэлектрического материала $InSb$.
3. Определены температурные зависимости КПД для гиротропных термоэлементов разной формы. Определено, что максимальное значение КПД гиротропного термоэлемента оптимальной формы для материала $InSb$ в интервале температур 300 – 700 К и магнитной индукции 1 Тл составляет 2.8 %.

Литература

1. Анатычук. Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства Киев, Наукова думка. – 1979. 766 с.
2. Самойлович А.Г. Термоэлектрические и термомагнитные методы превращения энергии. – Черновцы: Рута, 2006. – 226 с.

3. Анатычук Л.И. „Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии”. Киев, Черновцы: „Наукова думка”, 2003. – 386 с.
4. Самойлович А.Г, Коренблит Л.Л. Современное состояние теории термоэлектрических и термомагнитных явлений в полупроводниках // УФН. – 1953. – Т. 49, № 2. – С. 243-272.
5. Nakamura H., Ikeda K., Yamaguchi S. Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field // XVI-th international conference on thermoelectrics, – Dresden, Germany. – 1997. – P. 142-146.
6. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Федорук Я.Г., Шинкарук С.М. Вихрові термоелектричні струми в гіротропному середовищі з радіальним розподілом температури // Термоелектрика. – 2004. – № 1. – С. 19-24.
7. Лусте О.Я., Федорук Я.Г. Гіротропний термоелемент в неоднорідному магнітному полі // Термоелектрика. – 2006. – №1. – С. 16-22.
8. Лусте О.Я., Федорук Я.Г. Оптимізація матеріалів для гіротропних термоелементів // Термоелектрика. – 2008. – №4. – С. 21-26.
9. Агаєв З. Ф., Арасли Д. Г., Алиєв С. А. Термомагнітний перетворювач ІЧ-випромінювання. – Проблеми енергетики. – 2003. – № 3. – С. 12-21.
10. Немов С.А., Прошин В.І., Таранасов Г.Л., Парфен'єв Р.В., Шамшур Д.В., Черняев А.В. Поперечний ефект Нернста-Етгінгсгаузена, резонансне розсіяння та надпровідність у *SnTe*: In. – Фізика твердого тіла. – 2009. – Т. 51. – № 1. – С. 461-464.
11. Harman T.G., Honig J.M. Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications. – New York, Mc. Graw – Hill, 1967. – 377 p.
12. Nakamura H., Ikeda K. and Yamaguchi S. Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field // Research report. NIFS series, Nagoya, Japan (1998). – 23 p.
13. Hiroaki Nakamura, Kazuaki Ikeda, Satarou Yamaguchi. Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field // Proceedings of XVI International conference on Thermoelectrics. – Dresden (Germany). August 26-29, 1997. – P. 142-146.
14. Баранський П.І., Гайдар Г.П. Анізотропія термоелектричних властивостей багатодолинних напівпровідників кубічної симетрії під впливом зовнішніх спрямованих дій. – Термоелектрика, 2014, №1, ст. 13.
15. Goldsmid H.J., Volckmann E.H. Galvanomagnetic and thermoelectric measurements on polycrystalline // Proceedings of 16 International conference on Thermoelectrics. Dresden (Germany), August 26-29, 1997. – P. 142-146.
16. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N., Low-temperature Thermoelectric Cooling under Optimal Legs Inhomogeneity in the Optimal Nonuniform Magnetic Field, in Proceedings of the 16 International Conference on Thermoelectrics, Dresden, August 26-29, 1997. – P. 397-400.
17. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Поступила в редакцію 10.02.2016.