

Константинович И.А.^{1,2}



Константинович И.А.

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН
Украины ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина;
²Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинського, 2,
Черновцы, 58012, Украина

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИРОТРОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ В РЕЖИМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

Проведено компьютерное моделирование температурных полей для гиротропных термоэлементов прямоугольной, спиральной и оптимальной форм. Рассмотрены термоэлектрические материалы BiSb, Ag₂Te и InSb для гиротропных термоэлементов. Получены температурные зависимости для гиротропных термоэлементов разных форм. Показано, что использование Ag₂Te целесообразно в диапазоне температур 150 – 300 К, а BiSb в температурном диапазоне 80 – 120 К.

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

Computer simulation of temperature fields for gyrotropic thermoelements of the rectangular, spiral and optimal shapes was performed. BiSb, Ag₂Te and InSb thermoelectric materials for gyrotropic thermoelements were considered. The temperature dependences for gyrotropic thermoelements of various shapes were obtained. It was shown that in the temperature range of 150 – 300 K it is reasonable to use Ag₂Te, whereas BiSb can be efficiently used in the range of 80 – 120 K.

Key words: gyrotropic thermoelement, magnetic field, thermoelectric material, figure of merit.

Введение

Обобщенная теория термоэлектричества позволила разработать методы открытия новых типов термоэлементов, а их применение в анизотропных средах сделало возможным изобретение, исследование и создание ряда принципиально новых типов термоэлементов с уникальными свойствами, которые существенным образом расширили возможности термоэлектричества.

Перспективным направлением развития прикладного применения термоэлектричества является изобретение новых типов термоэлементов на основе гиротропных сред [1 – 19]. Эти возможности термоэлектричества мало исследовались, и их реализация сделает возможным расширение его элементной базы, повышение конкурентной способности термоэлектрических преобразователей энергии, а также создание на их основе термоэлектрической продукции повышенного качества.

Актуальность работы объясняется необходимостью повышения эффективности и надежности термоэлектрических преобразователей энергии на основе гиротропных сред для использования их в приборостроении.

Цель работы – оценка эффективности гиротропных термоэлементов в режиме охлаждения.

Математическая модель

Уравнение теплопроводности для однородной гиротропной среды имеет вид

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

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

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

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_r, j_{φ} – радиальная и азимутальная составляющие вектора плотности тока; r – радиус термоэлемента.

Если предположить, что горячая сторона (T_1) адиабатически изолирована и не учитывать потери через боковые поверхности, тогда можно воспользоваться известной формулой для расчета максимальной разности температур между сторонами термоэлемента ΔT_{max} [5]

$$(\Delta T)_{max} = \frac{1}{2} T_1^2 \frac{\alpha_B^2}{\rho_0 \kappa}. \quad (4)$$

Результаты компьютерного моделирования

Существует целый ряд источников, описывающих свойства гиротропных материалов для низкотемпературной области [1, 2]. На рис. 1 приведены зависимости добротности материалов *BiSb*, *Ag₂Te* и *InSb* от температуры [1, 3, 4].

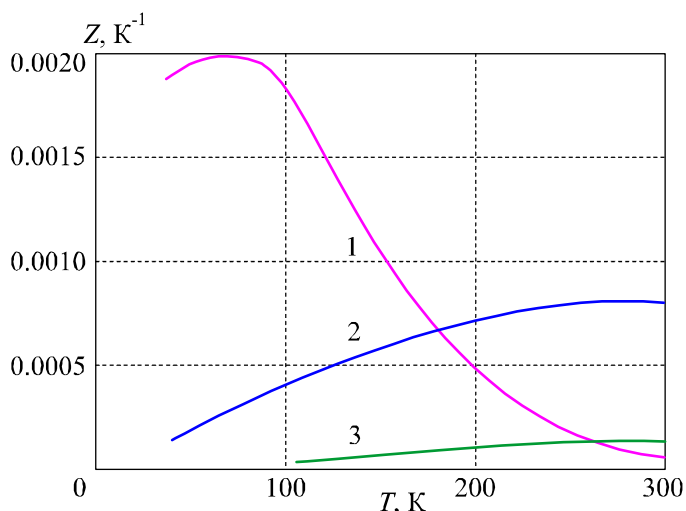
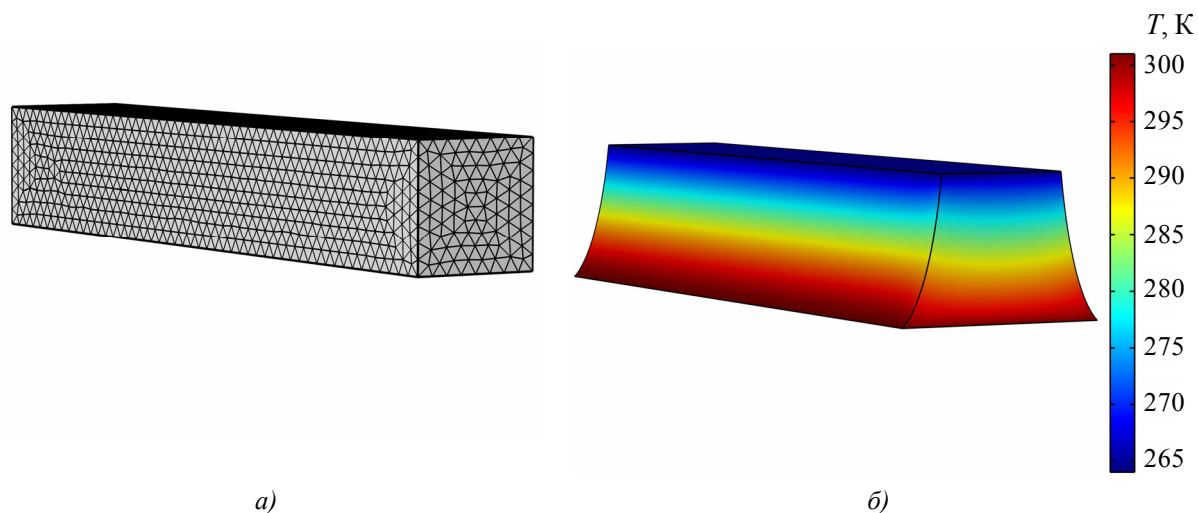


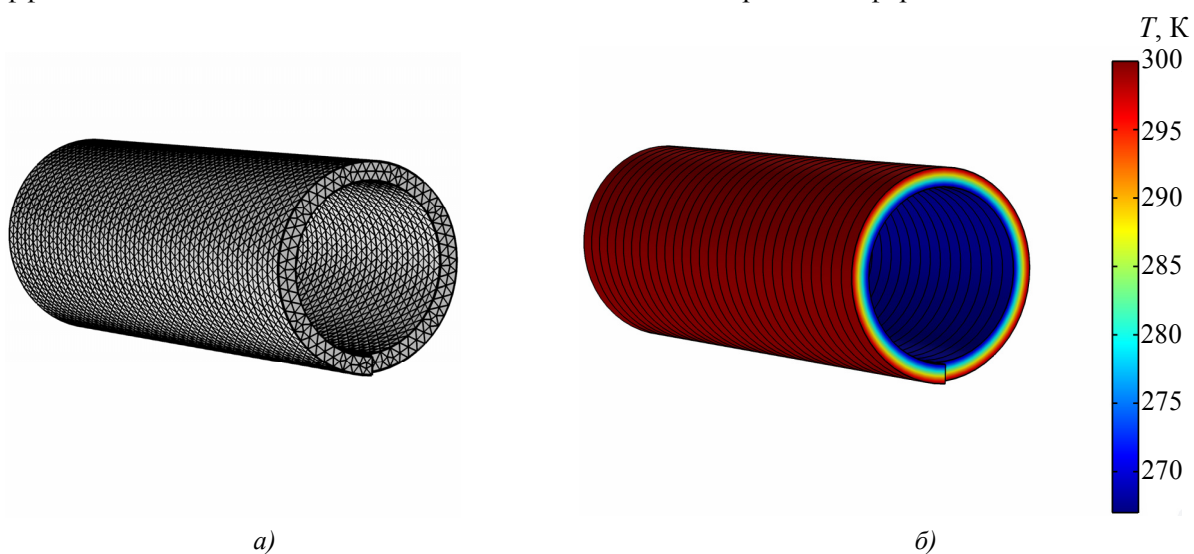
Рис. 1. Зависимость добротности Z от температуры T (1 – *BiSb*, 2 – *Ag₂Te*, 3 – *InSb*) [1, 3, 4].

Для построения компьютерной модели гиротропных термоэлементов прямоугольной, спиральной и оптимальной форм использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics [20]. 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 Ag_2Te 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 Эттингсгаузена).



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

На рис. 3 приведены трехмерные модели сетки метода конечных элементов (а) и распределения температур (б) в спиральном гиротропном термоэлементе. Эти термоэлементы эффективно использовать для охлаждения объектов цилиндрической формы.



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

На рис. 4 приведены трехмерные модели сетки метода конечных элементов (а) и распределения температур (б) в гиротропном термоэлементе оптимальной формы.

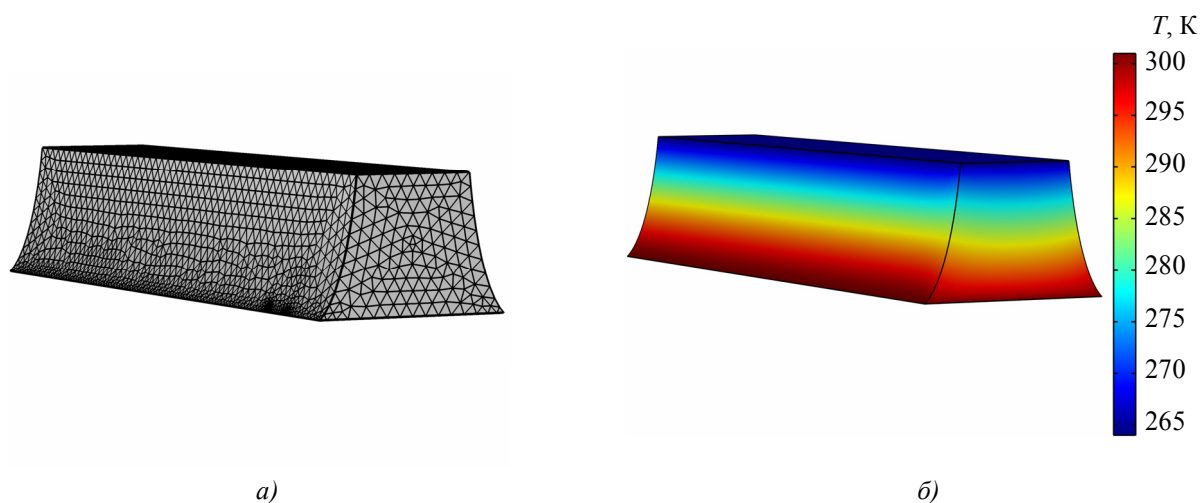


Рис. 4. Трехмерные модели сетки метода конечных элементов (а) и распределения температур (б) в гиротропном термоэлементе оптимальной формы.

Используя данные, приведенные на рис. 1, получены зависимости максимальной разности температур от температуры на горячей стороне термоэлемента для *BiSb*, *Ag₂Te* и *InSb* прямоугольной, спиральной и оптимальной форм (рис. 5).

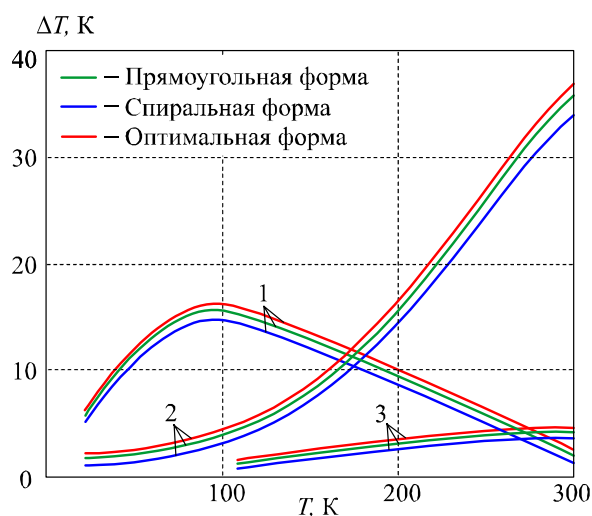


Рис. 5. Зависимость ΔT_{max} от T_1 (1 – *BiSb*, 2 – *Ag₂Te*, 3 – *InSb*).

Видно, что использование материала *Ag₂Te* в диапазоне температур 200–300 К дает наибольшие значения ΔT_{max} , при $T_2 = 300$ К значение $\Delta T_{max} \approx 36$ К. А значит, использование *Ag₂Te* целесообразнее в этом диапазоне температур, а в температурном диапазоне 80–120 К лучше применять *BiSb* ($\Delta T_{max} \approx 17$ К). Эти материалы могут быть использованы при изготовлении гиротропных термоэлементов для медицинских приборов, работающих в криогенной области.

Выводы

1. Аналитическими и числовыми методами исследованы основные соотношения для расчетов оптимальных характеристик гиротропных термоэлементов в режиме охлаждения. Для

случая материала Ag_2Te проведено компьютерное моделирование и получены распределения температуры в гиротропных термоэлементах разных форм.

2. Получены зависимости ΔT_{max} от температуры для гиротропных термоэлементов разных форм. Показано, что использование Ag_2Te целесообразно в диапазоне температур 150 – 300 К, для него $\Delta T_{max} \approx 36$ К, а в температурном диапазоне 80 – 120 К лучше применять $BiSb$ ($\Delta T_{max} \approx 17$ К).

Литература

1. Анатычук. Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. – К: Наукова думка. – 1979. – 768 с.
2. Осипов Э.В., Варич Н.И., Микитей П.П. Исследование эффекта Эттингсгаузена в монокристаллах $Bi_{1-x}Sb_x$. // ФТП. – 1971, 5. – №11. – С. 2202 – 2204.
3. Алиев С.А., Алиев М.И., Агаев З.Ф., Арасли Д.Г. Материал для холодильника Эттингсгаузена. Авт. свид. №828269, 1981.
4. Алиев С.А., Зульфигаров Э.И. / Термомагнитные и термоэлектрические явления в науке и технике. – Баку; «ЭЛМ», 2009. – 325 с.
5. Самойлович А.Г. Термоэлектрические и термомагнитные методы превращения энергии. / Черновцы: Рута, 2006. – 226 с.
6. Анатычук. Л.И. Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. / Киев, Черновцы: Наукова думка, 2003. – 386 с.
7. Самойлович А.Г., Коренбит Л.Л. Современное состояние теории термоэлектрических и термомагнитных явлений в полупроводниках // УФН. – 1953. – Т. 49, № 2. – С. 243 – 272.
8. H. Nakamura, K. Ikeda, S. Yamaguchi, Transport Coefficients of InSb in a Strong Magnetic Field, Proc. of XVI-th International Conference on Thermoelectrics (Dresden, Germany, 1997). – P. 142 – 146.
9. Анатычук Л.И., Лусте О.Я., Федорук Я.Г., Шинкарук С.М. Вихревые термоэлектрические токи в гиротропной среде с радиальным распределением температуры // Термоэлектричество. – 2004. – № 1. – С. 20 – 25.
10. Лусте О.Я., Федорук Я.Г. Гиротропный термоэлемент в неоднородном магнитном поле // Термоэлектричество. – 2006. – №1. – С. 16 – 22.
11. Лусте О.Я., Федорук Я.Г. Оптимизация материалов для гиротропных термоэлементов // Термоэлектричество. – 2008. – №4. – С. 21 – 26.
12. Агаев З. Ф., Арасли Д.Г., Алиев С.А. Термомагнитный преобразователь ИК-излучения. // Проблемы энергетики. – 2003. – № 3. – С. 12 – 21.
13. Немов С.А., Прошин В.И., Таранасов Г.Л., Парфенев Р.В., Шамшур Д.В., Черняев А.В. Поперечный эффект Нернста-Эттингсгаузена, резонансное рассеяние и сверхпроводимость в $SnTe$: In. // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – № 1. – С. 461 – 464.
14. T.G. Harman, J.M. Honig, Thermoelectric and Thermomagnetic Effects and Applications (New York, Mc. Graw – Hill, 1967), 377 p.
15. H. Nakamura, K. Ikeda, S. Yamaguchi, Transport Coefficients of InSb in a Strong Magnetic Field, Research Report. NIFS series, Nagoya, Japan (1998), 23 p.
16. Hiroaki Nakamura, Kazuaki Ikeda, and Satarou Yamaguchi, Transport Coefficients of InSb in a Strong Magnetic Field, Proc of XVI-th International Conference on Thermoelectrics (Dresden.

- Germany, August 26 – 29, 1997). – P. 142 – 146.
17. Баранский П.И., Гайдар Г.П. Анизотропия термоэлектрических свойств многодолинных полупроводников кубической симметрии под влиянием внешних направленных действий. // Термоэлектричество. – 2014. – №1. – С. 14 – 27.
 18. H.J. Goldsmid, E.H. Volckmann, Galvanomagnetic and Thermoelectric Measurements on Polycrystalline $Bi_{88}Sb_{12}$, Proc. of XVI-th International Conference on Thermoelectrics (Dresden, Germany, August 26 – 29, 1997). P. 142 – 146.
 19. L.I. Anatyshuk, L.N. Vikhor, Low-Temperature Thermoelectric Cooling under Optimal Legs Inhomogeneity in the Optimal Nonuniform Magnetic Field, Proc. of XVI-th International Conference on Thermoelectrics (Dresden, Germany, August 26 – 29, 1997). – P. 397 – 400.
 20. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Поступила в редакцию 31.05.2016.