



Константинович І.А.

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

¹Інститут термоелектрики НАН
і МОН України вул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна;

²Чернівецький національний університет, ім. Юрія
Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58012, Україна



Рендигевич О.В.

ПРО ЕФЕКТИВНІСТЬ ГІРОТРОПНИХ ТЕРМОЕЛЕМЕНТІВ У РЕЖИМІ ГЕНЕРАЦІЇ

В роботі аналітичними та числовими методами досліджено основні співвідношення для розрахунку оптимальних характеристик гіротропних термоелементів в режимі генерації електричної енергії. Розглянуто термоелектричні матеріали $InSb$, $InAs$ та Bi_2Te_3 для гіротропних термоелементів. Для матеріалу $InSb$ проведено комп'ютерне моделювання й отримано розподіли температур в гіротропних термоелементах різної форми. Отримано залежності ККД від температури для гіротропних термоелементів оптимальної, прямокутної та кільцевої форм.

Ключові слова: гіротропний термоелемент, магнітне поле, термоелектричний матеріал, добротність, ККД.

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.

Вступ

Відомо, що термоелектричні прилади та системи, розроблені на їх основі, широко застосовуються в енергетиці, холодильній і вимірювальній техніці [1 – 3]. Основні досягнення термоелектрики в галузі приладобудування здобуто саме на базі фізики термопарних термоелементів. Однак перспективним напрямком розвитку термоелектрики залишається винайдення нових типів термоелементів, зокрема на основі гіротропних середовищ та покращення ефективності існуючих. Дослідженню властивостей гіротропних термоелементів присвячено ряд робіт [1 – 16].

Гіротропні термоелементи мають ряд привабливих властивостей:

- відсутність внутрішніх спаїв, що забезпечує їх надійність і технологічність;
- можливість безпайного з'єднання кілець у просторову спіральну структуру для нарощування необхідних напруг;
- можливість підвищення ефективності під дією температурного і магнітного полів, особливо при їх використанні у вимірювальній техніці.

Тому актуальність роботи полягає у необхідності підвищення ефективності та надійності термоелектричних перетворювачів енергії на основі гіротропних термоелементів для подальшого їх використання у приладобудуванні.

Метою роботи є оцінка ефективності гіротропних термоелементів у режимі генерації електричної енергії.

Математична модель

Рівняння теплопровідності для однорідного гіротропного середовища має наступний вигляд [1]:

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

де κ – коефіцієнт теплопровідності гіротропного середовища; ρ_0 – питомий електричний опір; j – модуль вектора густини електричного струму; j_x, j_y – проєкції вектора \mathbf{j} в декартовій системі координат; $\alpha_B = Q_{\perp} B$ – асиметрична частина тензора термоЕРС, що в гіротропному середовищі має вигляд

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

де Q_{\perp} – коефіцієнт Нернста-Еттінгсгаузена.

Враховуючи аксіальну симетрію системи, запишемо вираз (1) у полярній системі координат

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

де j_{φ} – азимутальна та радіальна складові вектора густини струму \mathbf{j} , $r_1 \leq r \leq r_2$ – радіус термоелемента.

Результати комп'ютерного моделювання

Для побудови комп'ютерної моделі гіротропних термоелементів прямокутної, спіральної та оптимальної форм використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [17]. Розрахунок розподілів температур в гіротропних термоелементах здійснювався методом скінченних елементів. За допомогою комп'ютерного моделювання було визначено розподіли температур в гіротропних термоелементах різної форми для матеріалу *InSb* в інтервалі температур 300 – 700 К та магнітному полі з індукцією $B = 1$ Тл. На рис. 1 наведено тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (a) та розподілу температур (b) в гіротропному термоелементі прямокутної форми (термоелемент Нернста-Еттінгсгаузена).

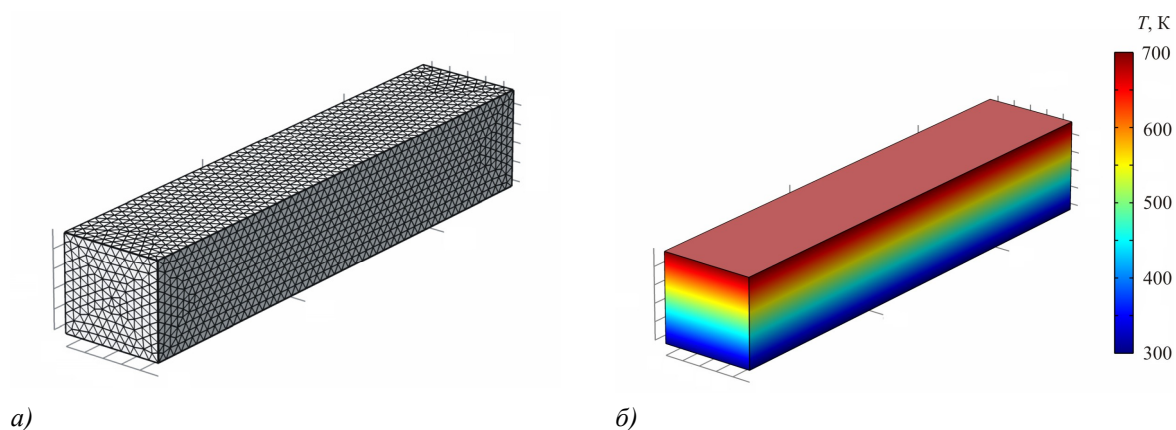


Рис. 1. Тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в гіротропному термоелементі прямокутної форми.

На рис. 2 наведено тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в спіральному гіротропному термоелементі.

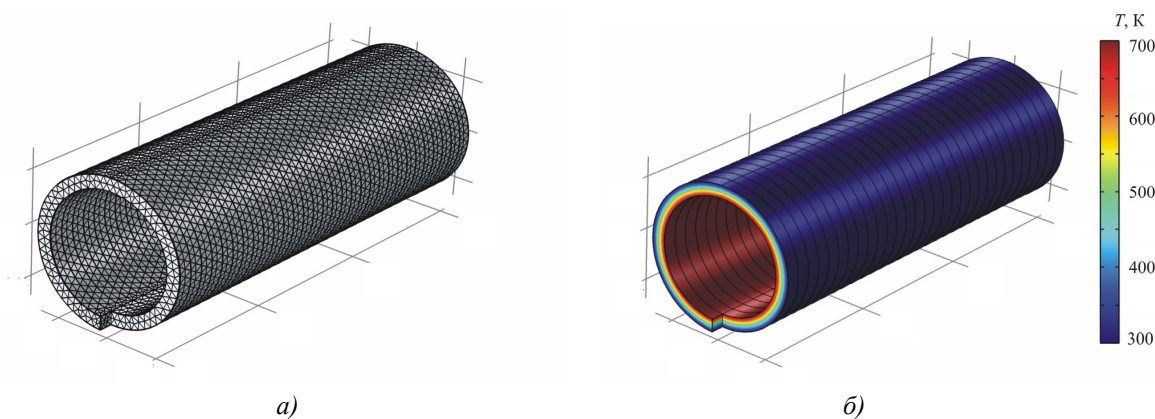


Рис. 2. Тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в гіротропному спіральному термоелементі.

На рис. 3 наведено тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в гіротропному термоелементі оптимальної форми.

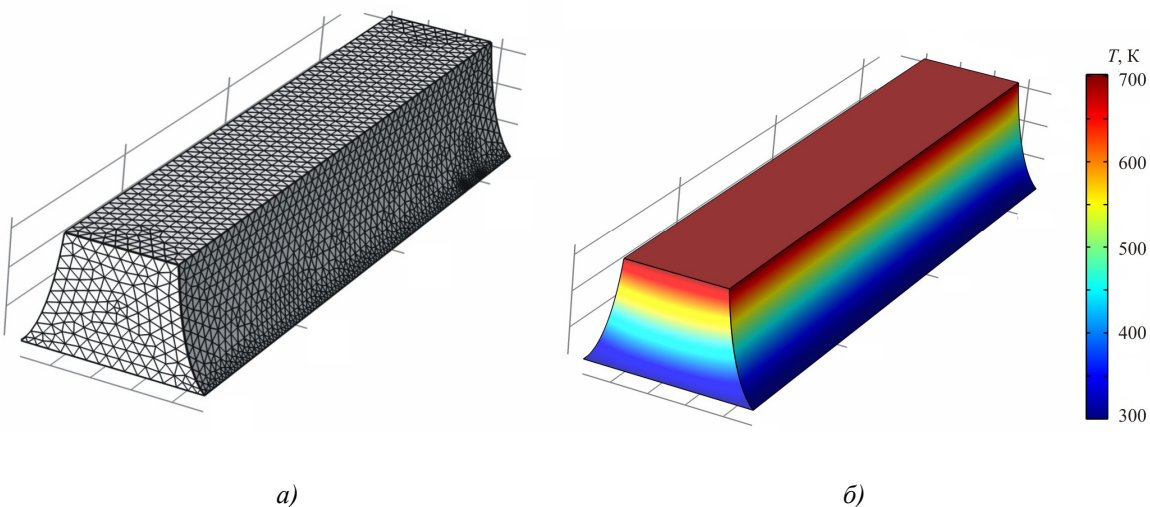


Рис. 3. Тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в гіротропному термоелементі оптимальної форми.

Розрахунок ККД

Відомо, що ККД гіротропного термоелемента оптимальної форми [2] визначається наступним чином:

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

де $M_H = \sqrt{1 - Z_H \bar{T}}$, Z_H – термомагнітна добротність, T_2 – температура гарячої сторони, η_k – ККД циклу Карно, \bar{T} – середня температура.

ККД гіротропного термоелемента прямокутної форми має наступний вигляд [1]:

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

де T_1 – температура холодної сторони.

Для кільцевого гіротропного термоелемента ККД [3]:

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

На рис. 4 наведено температурні залежності добротності для термоелектричних матеріалів *InSb*, *InAs* та *Bi₂Te₃*. Видно, що кращим матеріалом для виготовлення генераторних гіротропних термоелементів є *InSb*, що узгоджується з експериментальними результатами, приведеними в роботі [1].

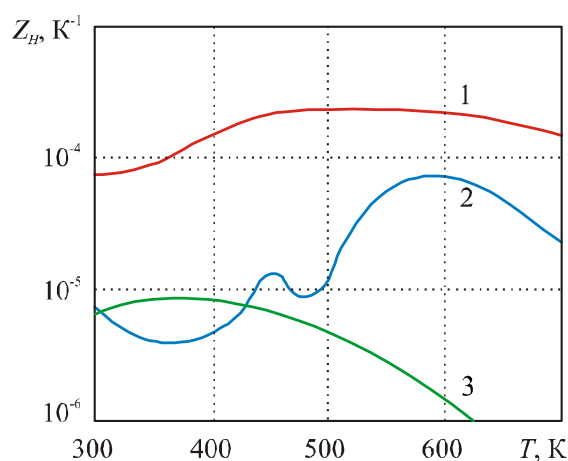


Рис. 4. Температурні залежності добротності термоелектричних матеріалів для гіротропних термоелементів (1 – *InSb*, 2 – *InAs*, 3 – *Bi₂Te₃*).

Для розрахунків було вибрано матеріал *InSb* в інтервалі температур 300 – 700 К. Гіротропні термоелементи різної форми піддавались дії магнітного поля з індукцією 1 Тл. За даними розрахунків побудовані залежності ККД від температури гарячої сторони термоелемента T_2 при постійній холодній стороні $T_1 = 300$ К для *InSb* (рис. 5).

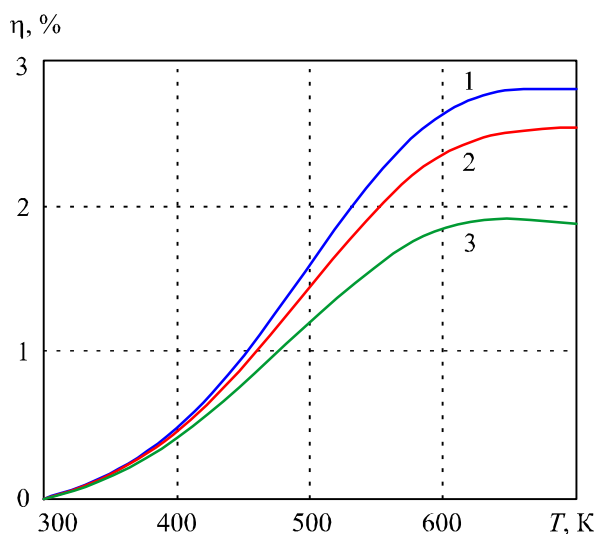


Рис. 5. Залежність ККД від температури для гіротропних термоелементів різної форми (1 – оптимальної форми, 2 – прямокутної форми, 3 – кільцевої форми).

З рис. 5 видно, що при перепаді температур між гарячою та холодною стороною 400 К та магнітному полі з індукцією 1 Тл для гіротропного термоелемента оптимальної форми максимальне значення ККД складає приблизно 2.8 %, що менше ніж у терморпних елементів на основі Bi_2Te_3 та $PbTe$. Однак гіротропні термоелементи характеризуються підвищеною надійністю і можливістю нарощування високих напруг завдяки безпайному з'єднанні у просторову спіральну структуру, що робить такі термоелементи перспективними для використання у вимірювальній та військовій техніці. Такі термоелементи також можуть бути використані для виготовлення високочутливих сенсорів температури і теплового потоку.

Висновки

1. Виконано порівняння параметрів термоелектричних матеріалів ($InSb$, $InAs$ та Bi_2Te_3) для гіротропних термоелементів. Встановлено, що кращим матеріалом для виготовлення генераторних гіротропних термоелементів є $InSb$, середнє значення добротності якого в інтервалі температур 400 – 600 К становить $4 \cdot 10^4 \text{ K}^{-1}$.
2. За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіли температур у робочому тілі гіротропних термоелементів прямокутної, спіральної та оптимальної форм для термоелектричного матеріалу $InSb$.
3. Визначено температурні залежності ККД для гіротропних термоелементів різної форми. Встановлено, що максимальне значення ККД гіротропного термоелемента оптимальної форми для матеріалу $InSb$ в інтервалі температур 300 – 700 К і магнітній індукції 1 Тл становить 2.8 %.

Література

1. Анатичук. 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. Анатичук. 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., Алиев С. А. Термомагнітний перетворювач ІЧ-випромінювання. – Проблеми енергетики. – 2003. – № 3. – С. 12 – 21.
10. Немов С.А., Прошин В.І., Тарантасов Г.Л., Парфен'єв Р.В., Шамшур Д.В., Черняев А.В. Поперечний ефект Нернста-Еттінгсгаузена, резонансне розсіяння та надпровідність у *SnTe*: Ін. – 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.

Надійшла до редакції 08.01.16