

УДК 537.32

**Н.А. Годованець¹, І.А.
Константинович І.А.** канд. фіз.-мат. наук, доцент^{1,2},
А.В. Константинович док. фіз.-мат. наук, доцент²,
С.Д. Шугані¹

¹Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна,

²Інститут термоелектрики НАН і МОН України,

вул. Науки 1, Чернівці, 58029, Україна

e-mail: dj_kneo@ukr.net; aconst@ukr.net;

i.konstantynovych@chnu.edu.ua

ГІРОТРОПНІ ТЕРМОЕЛЕМЕНТИ В ОДНОРІДНОМУ ТА НЕОДНОРІДНОМУ МАГНІТНИХ ПОЛЯХ

За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіли температур у робочому тілі гіротропних термоелементів в однорідному та неоднорідному магнітних полях. Визначено температурні залежності ККД гіротропних термоелементів в однорідному та неоднорідному магнітних полях. Встановлено, що ККД генераторних гіротропних термоелементів більше в неоднорідному магнітному полі ніж в однорідному полі. Бібл. 19, рис. 3.

Ключові слова: коефіцієнт Нернста-Еттінгсгаузена, гіротропний термоелемент, неоднорідне магнітне поле, термоелектричний матеріал, термомагнітна добротність, ККД.

Вступ

Нині одним з перспективних напрямків розвитку термоелектрики є створення нових типів термоелементів в тому числі гіротропних та більш детальне дослідження вже відомих термоелементів. Останніми роками опубліковано низку робіт про гіротропні термоелементи в постійних магнітних полях [1-18], також розглянуті деякі параметри цих термоелементів в неоднорідних магнітних полях [7]. Розглянуті гіротропні термоелементи ефективність яких зростає за рахунок збудження вихрових термоелектричних струмів в гіротропному термоелектричному середовищі, дають можливість отримувати підвищені термоелектричні напруги та відрізняються від відомих багатофункціональністю, вони є перспективними для використання як в спеціальних термогенераторах, так і в приладах вимірювальної техніки. Але ці можливості мало використані, тому їх розробка дозволить збільшити елементну базу термоелектрики, покращити конкурентну спроможність термоелектричних перетворювачів та гіротропних термоелементів в тому числі, створити більш досконалу термоелектричну продукцію на їх основі, та підвищити її якість і надійність.

Тому актуальність роботи полягає у необхідності подальшого дослідження гіротропних термоелементів в однорідних та неоднорідних магнітних полях, для підвищення їх ефективності та надійності та створення термоелектричних перетворювачів енергії з покращеними характеристиками.

Метою роботи є оцінка ефективності гіротропних термоелементів в однорідному та неоднорідному магнітних полях у режимі генерації електричної енергії.

Математична модель

Для дослідження параметрів гіротропних термоелементів необхідно розв'язати наступне рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами:

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

де T – температура; κ – коефіцієнт теплопровідності гіротропного середовища; ρ_0 – питомий електричний опір; x, y – координати; j, j_x, j_y – модуль та проекції вектора густини електричного струму; $\alpha_{\perp} = Q_{\perp} B$ – асиметрична частина тензора термоЕРС; Q_{\perp} – поперечний коефіцієнт Нернста-Еттінгсгаузена; B – індукція магнітного поля.

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

де α_0, α_{\perp} – діагональні компоненти тензора термоЕРС.

Для отримання вихрових струмів доцільніше розглядати спіральні термоелементи. Враховуючи аксіальну симетрію (1) маємо

$$\Delta T + \frac{j_{\varphi}^2}{\kappa \sigma} + \frac{1}{\kappa} j_{\varphi} 2\alpha_a(r) \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

де σ – питома електропровідність, φ – кут, r – радіус, j_{φ} – кутова компонента густини струму, яка визначається виразом

$$j_{\varphi} = \sigma Q_{\perp}(r) B(r) \frac{dT}{dr}. \quad (4)$$

А термоЕРС задається виразом

$$E = 2\pi r Q_{\perp}(r) B(r) \frac{dT}{dr}. \quad (5)$$

Термомагнітна добротність гіротропного матеріалу

$$Z_Q(r) = \frac{Q_{\perp}^2(r) B^2(r)}{\kappa \rho}. \quad (6)$$

Неоднорідність можна отримати змінюючи магнітне поле B в однорідному гіротропному середовищі, або створивши анізотропію коефіцієнта Нернста-Еттінгсгаузена Q_{\perp} в кільці при

постійному магнітному полі B . Розглянемо випадок, коли в кільці змінюється магнітне поле B вздовж радіуса кільця, при постійному коефіцієнті Нернста-Етtingсгаузена Q_{\perp} .

Розв'язавши (3) з врахуванням (4) та (5) та врахувавши граничні умови, отримаємо вираз для ККД спірального гіротропного термоелемента в неоднорідному магнітному полі

$$\eta = \frac{1}{6} \frac{(1 \pm \sqrt{1 + 6Z_Q(T_1 - T_2)})^2}{6Z_Q(T_1 - T_2) - (1 \pm \sqrt{1 + 6Z_Q(T_1 - T_2)})^2 - 2Z_Q T_1 (1 \pm \sqrt{1 + 6Z_Q(T_1 - T_2)})} \quad (7)$$

де
$$Z_Q = \frac{Q_{\perp}^2 B^2(r)}{\kappa r}. \quad (8)$$

Використовуючи (6), (7) можна розрахувати ККД гіротропного спірального термоелемента в неоднорідному магнітному полі

Результати комп'ютерного моделювання

Для побудови комп'ютерної моделі гіротропного термоелемента спіральної форми використано пакет прикладних програм Comsol Multiphysics [19]. Розрахунок розподілів температур в гіротропному термоелементі здійснювався методом скінченних елементів. За допомогою комп'ютерного моделювання було визначено розподіли температур для матеріалу $InSb$ в інтервалі температур 300 – 700 К та магнітному полі з індукцією $B = 1$ Тл.

На рис. 1 наведено температурні залежності добротності для термоелектричних матеріалів $InSb$, $InAs$ та Bi_2Te_3 . Видно, що кращим матеріалом для виготовлення генераторних гіротропних термоелементів є $InSb$, що узгоджується з експериментальними результатами, приведеними в роботі [1].

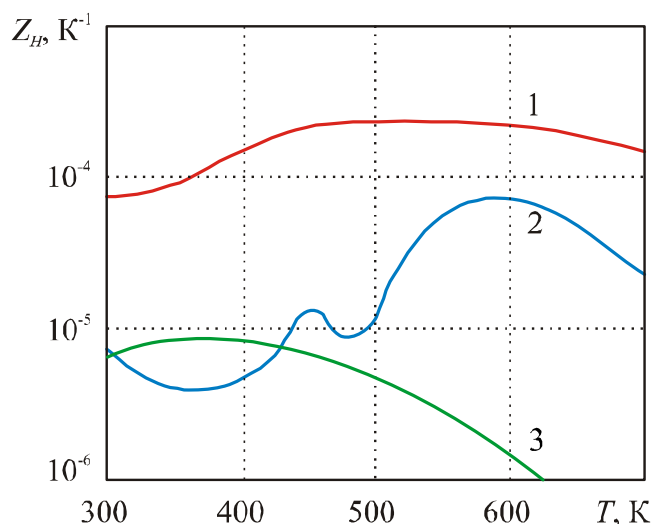


Рис. 1. Температурні залежності добротності термоелектричних матеріалів для гіротропних термоелементів (1 – $InSb$, 2 – $InAs$, 3 – Bi_2Te_3).

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

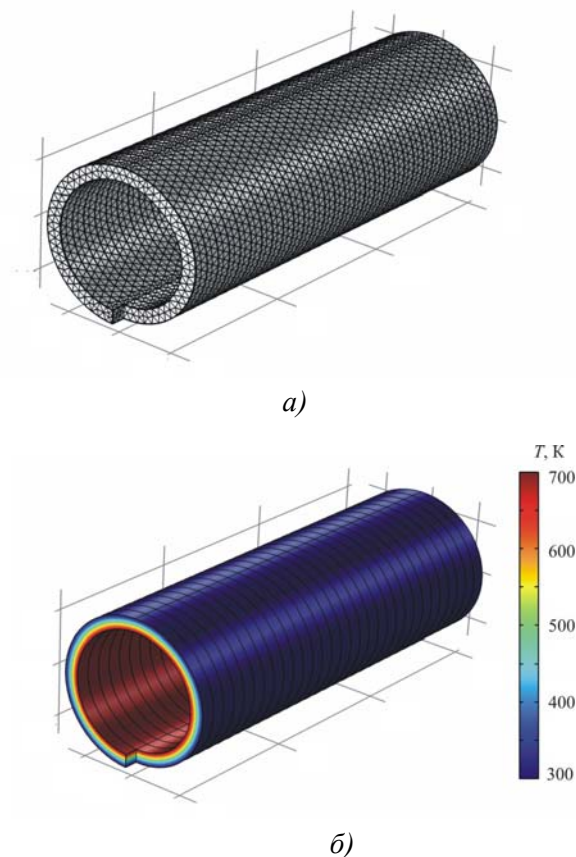


Рис. 2. Тривимірні моделі сітки методу скінченних елементів (а) та розподілу температур (б) в гіротропному спіральному термоелементі.

За даними розрахунків побудовані залежності ККД від температури гарячої сторони термоелемента T_2 при постійній холодній стороні $T_1 = 300$ К для $InSb$ (рис. 3).

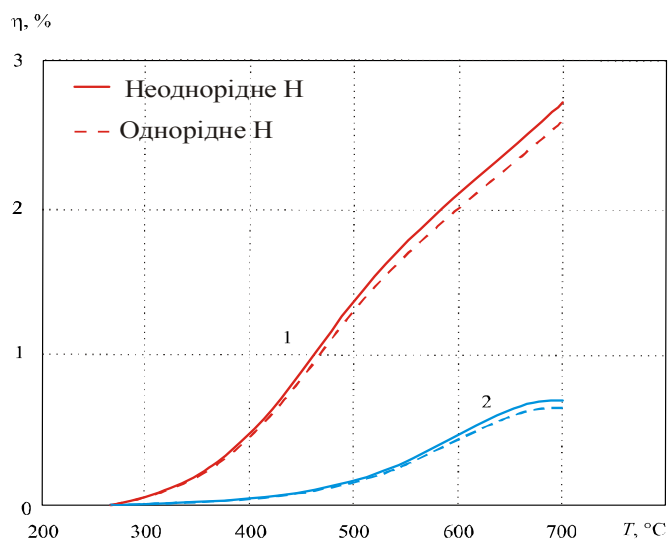


Рис. 3. Залежність ККД від температури для гіротропного термоелемента циліндричної форми (1 – $InSb$, 2 – $InAs$).

З рисунка видно, що використання неоднорідних магнітних полів в термоелементах спіральної форми більш ефективно. А спіральні термоелементи, робота яких заснована на збудженні вихрових термоелектричних струмів в однорідному гіротропному термоелектричному середовищі, дають можливість збільшувати термоелектричні напруги. Відрізняються від відомих термоелементів багатофункціональністю, вони є перспективними для використання як в спеціальних термогенераторах, так і в приладах вимірювальної техніки. Дослідження гіротропних термоелементів прямокутної та оптимальної форм так само показали збільшення ефективності у разі використання неоднорідного магнітного поля.

Висновки

1. Виконано порівняння параметрів термоелектричних матеріалів (*InSb*, *InAs* та *Bi₂Te₃*) для гіротропних термоелементів. Встановлено, що кращим матеріалом для виготовлення генераторних гіротропних термоелементів є *InSb*, середнє значення добротності якого в інтервалі температур 400 – 700 К в полі з магнітною індукцією 1 Тл становить приблизно $4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.
2. За допомогою комп'ютерного моделювання визначено розподіли температур у робочому тілі гіротропного термоелемента спіральної форми для термоелектричного матеріалу *InSb* та *InAs*.
3. Визначено температурні залежності ККД. Встановлено, що максимальне значення ККД гіротропного термоелемента спіральної форми для матеріалу *InSb* в інтервалі температур 300 – 700 К і магнітній індукції 1 Тл становить 2.75 %.

Література:

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., Алиев 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-Еттінгсгаузена, 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 багатодолінних 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 Internatinal 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. Константинович І.А., Рендигевич О.В. Про ефективність гіротропних термоелементів в режимі генерації // Термоелектрика. – №1. – 2016. – С. 69-74.
18. Захарчук Т.В., Константинович І.А., Константинович А.В., Форбатюк А.В. Про ефективність спіральних гіротропних термоелементів у режимі охолодження// Термоелектрика №1. 2019. – С. 63-68.
19. COMSOL Multiphysics User's Guide // COMSOLAB. – 2010. – 804 p.

Надійшла до редакції

Н.А. Годованец¹,
І.А. Константинович канд. физ.-мат. наук, доцент^{1,2},
А.В. Константинович док. физ.-мат. наук, доцент²,
С.Д. Шугани¹

¹Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,
ул. Коцюбинского 2, ²Черновцы, 58012, Украина,

²Институт термоэлектричества НАН и Мон Украины,
ул. Науки 1, Черновцы, 58029, Украина
e-mail: dj_kneo@ukr.net; aconst@ukr.net;
i.konstantynovych@chnu.edu.ua

ГИРОТРОПНОГО ТЕРМОЭЛЕМЕНТ В ОДНОРИДНОМУТА НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

С помощью компьютерного моделирования определены распределения температур в рабочем теле гиروتропных термоэлементов в однородном и неоднородном магнитном поле.

Определены температурные зависимости КПД гиротропных термоэлементов в однородном и неоднородном магнитном поле. Установлено, что КПД генераторных гиротропных термоэлементов больше в неоднородном магнитном поле чем в однородном поле. Библ. 19, рис. 3.

Ключевые слова: коэффициент Нернста-Эттингсгаузена, гиротропный термоэлемент, неоднородное магнитное поле, термоэлектрический материал, термомагнитная добротность, КПД.

N.A. Godovanets¹,
I.A. Konstantynovych *cand. phys.– math. sciences, dochent^{1,2},*
A.V. Konstantynovych *doc. phys.– math. sciences, dochent²,*
S.D. Shugani¹

¹Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi Str.,
Chernivtsi, Ukraine, 58012

²Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;
e-mail: dj_kneo@ukr.net aconst@ukr.net
i.konstantynovych@chmu.edu.ua

GYROTROPIC THERMOELEMENT IN UNIFORM AND NON-UNIFORM MAGNETIC FIELDS

Using computer simulation, the temperature distributions in the working medium of gyrotropic thermoelements in uniform and non-uniform magnetic fields have been determined. Temperature dependences of the efficiency of gyrotropic thermoelements in uniform and non-uniform magnetic fields are determined. It has been established that the efficiency of generator gyrotropic thermoelements is higher in a non-uniform magnetic field than that in a uniform field.

Key words: Nernst-Ettingshausen coefficient, gyrotropic thermoelement, non-uniform magnetic field, thermoelectric material, thermomagnetic figure of merit, efficiency.

REFERENCES

1. Anatyshuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
2. Samoilovich A.G. (2006). *Termoelektricheskiye i termomagnitnyie metody preobrazovaniia energii [Thermoelectric and thermomagnetic methods of energy conversion]*. Chernivtsi: Ruta [in Russian].
3. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. T.2. Termoelektricheskiye preobrazovatelnyie energii [Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric energy converters]*. Kyiv, Chernivtsi: Naukova Dumka [in Russian].
4. Samoilovich A.G., Korenblit L.L. (1953). The current state of the theory of thermoelectric and thermomagnetic phenomena in semiconductors. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 49(2), 243 - 272.
5. Nakamura H., Ikeda K., Yamaguchi S. (1997). Transport coefficients of *InSb* in a strong magnetic field. *Proc. of XVI International Conference on Thermoelectrics*. (Dresden, Germany, 1997, 142 – 146).
6. Anatyshuk L.I., Luste O.J., Fedoruk Ya.G., Shinkaruk S.M. (2004). Eddy thermoelectric currents in a

- gyrotropic medium with radial temperature distribution. *J. Thermoelectricity*, 1, 19 - 24.
7. Luste O.Ya., Fedoruk Ya.G. Gyrotropic thermocouple in an non-uniform magnetic field // *Thermoelectricity*. - 2006. - №1. - P. 16 - 22.
 8. Luste O.J., Fedoruk Ya.G. (2008). Optimization of materials for gyrotropic thermoelements. *J. Thermoelectricity*, 4, 21 - 26.
 9. Agayev Z.F., Arasly D.G., Aliyev S.A. (2003). Thermomagnetic converter of IR radiation. *Energy Problems*, 3, 12 - 21.
 10. Nemov S.A., Proshin V.I., Tarantasov G.L., Parfenyev R.V., Shamshur D.V., Chernyaev A.V. (2009). Nernst-Ettingshausen transverse effect, resonant scattering and superconductivity in SnTe: In. *Solid State Physics*, 51(1), 461 - 464.
 11. Harman T.G., Honig J.M. (1967). *Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications*. New York, Mc. Graw - Hill.
 12. Nakamura H., Ikeda K. and Yamaguchi S. (1998). Transport coefficients of InSb in a strong magnetic field. Research report. *NIFS series (Nagoya, Japan)*.
 13. Hiroaki Nakamura, Kazuaki Ikeda, Satarou Yamaguchi. Transport coefficients of InSb in a strong magnetic field. (1997). *Proc. of XVI International conference on Thermoelectrics*. (Dresden, Germany, August 26-29, 1997).
 14. Baransky P.I., Gaidar G.P. (2014). Anisotropy of thermoelectric properties of multi-valley semiconductors of cubic symmetry under the influence of external directional effects. *J. Thermoelectricity*, 1, 13.
 15. Goldsmid H.J., Volckmann E.H. (1997). Galvanomagnetic and thermoelectric measurements on polycrystalline. *Proc. of 16 International Conference on Thermoelectrics* (Dresden, Germany, August 26 - 29, 1997).
 16. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N. (1997). Low-temperature thermoelectric cooling under optimal legs inhomogeneity in the optimal nonuniform magnetic field. In: *Proc. of the 16 International Conference on Thermoelectrics* (Dresden, August 26-29, 1997).
 17. Konstantinovich I.A., Rendigevich O.V. (2016). On the efficiency of gyrotropic thermoelements in generation mode. *J. Thermoelectricity*, 1, 69-74.
 18. Zakharchuk T.V, Konstantinovich I.A., Konstantinovich A.V, Forbatyuk A.V. (2019). On the efficiency of spiral gyrotropic thermoelements in cooling mode. *J. Thermoelectricity*, 1, 63-68.
 19. *COMSOL Multiphysics User's Guide* (2010).

Submitted