

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АНІЗОТРОПНОГО ОПТИКОТЕРМОЕЛЕМЕНТА З БОКОВИМ ТЕРМОСТАТУВАННЯМ

Хабюк А. Я., Даналакій О. Г.

1. Вступ

Широке використання термоелектричних приладів в якості джерел електричної енергії, охолоджувачів та приладів вимірювальної техніки обумовлене їх надійністю, високим ресурсом роботи, здатністю працювати в екстремальних умовах, екологічною чистотою. Термоелектричні прилади використовуються в космічній і оборонній техніці, метрології, електроніці, медицині та ін.

Основою більшості термоелектричних приладів є напівпровідниковий термопарний елемент, який поряд з позитивними якостями має і недоліки, що перешкоджають подальшому прогресу в розвитку термоелектрики. До принципів недоліків термопарного елемента слід віднести неефективну участь його об'єму при термоелектричному перетворенні енергії, проблеми комутації, обмеження в добротності використовуваних матеріалів. Тому подальший розвиток термоелектрики шляхом пошуку напівпровідникових матеріалів з більшою добротністю на сьогодні уже себе практично вичерпав.

Прогрес в термоелектриці можливий за умови впровадження нових термоелементів (ТЕ), які б переважали можливості термопарних елементів. Серед нових перспективних ТЕ є вихрові ТЕ з унікальними властивостями, які ґрунтуються на використанні ефекта вихрових термоелектричних струмів (ВТС). Можна вказати, зокрема, на спіральні вихрові термоелементи, у яких розв'язана проблема комутації та одержання необхідних напруг [1, 2].

Однак елементна база термоелектрики потребує поповнення за рахунок створення нових типів термоелементів на основі відомих термоелектричних явищ та явищ, які ще недостатньо вивчені. До відомих явищ, механізми виникнення яких вивчені, але на основі яких не створено ТЕ, можна віднести, наприклад, об'ємні ефекти Пельтьє та Бريدжмена. Актуальними є дослідження можливостей створення анізотропних оптикотермоелементів (АОТЕ) на цих ефектах на основі існуючих та гіпотетичних матеріалів, а також вивчення глибини їх охолодження. Такі дослідження могли б привести до створення АОТЕ для охолодження або стабілізації температури різного роду мікросенсорів та приладів мікроелектронної техніки і відрізнялись більш простою конструкцією в порівнянні з відомими ТЕ. До недостатньо вивчених явищ з погляду практичного застосування можна віднести умкег-ефект, ефект ВТС, ефект впливу анізотропії теплопровідності на поперечну термоЕРС.

Поглиблене вивчення впливу анізотропії теплопровідності на температурне поле і поперечну термоЕРС електроізолюваного АОТЕ, а також його енергетики привело б до уточнення фізичних процесів, що в ньому протікають, і розширення області його застосування.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – пряме взаємне перетворення теплової та електричної енергії за допомогою анізотропних термоелектричних середовищ.

Предмет дослідження – фізичні процеси в АОТЕ та можливості їх практичного використання.

Теперішній час характеризується зростанням інформаційних потреб і, отже, розвитком засобів інформації. Звідси впливає перспективність використання термоелектрики для розв'язання інформаційних задач. Термоелектричними засобами можливе ефективне вимірювання температур, густин теплових потоків, потужностей випромінювання та ін. Отже, створення та використання нових типів термоелементів має бути спрямоване в першу чергу для створення приладів інформаційної техніки.

Для реєстрації променевих потоків використовуються АОТЕ. На їх основі створені приймачі променевої енергії прохідного типу, які утримують оптично прозорі тепловідводи, до яких за допомогою клейового діелектричного прошарку прикріплюються АОТЕ [3, 4]. Такий тепловідвід, забезпечуючи надійне знімання відпрацьованого в ТЕ тепла, приводить, тим не менше, до значного спотворення амплітудно-фазових характеристик прохідного променевого потоку, обмежуючи тим самим енергетичні і часові характеристики приймачів. Тому задача про створення такої конструкції приймача, яка була б вільна від указаних недоліків, є перспективною. Один з варіантів конструктивного вирішення цієї задачі приведений в даній роботі.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – винайдення нових анізотропних оптикотермоелементів (АОТЕ), дослідження фізичних процесів, що в них протікають, визначення областей їх застосування, а також покращання характеристик стандартних АОТЕ шляхом конструктивних змін.

Для досягнення поставленої *мети* необхідно вирішити наступні *задачі*:

1. Вивчити вплив натікання тепла всередину АОТЕ через бокові грані на розподіл температури в їх середній частині в залежності від співвідношення геометричних розмірів.

2. Знайти можливості створення нових АОТЕ, які можна використовувати для охолодження або стабілізації робочої температури різного роду мікроприладів.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Результати досліджень ґрунтуються на термодинаміці термоелектричних і термомагнітних явищ, основні положення і закономірності якої викладені в праці [5].

Перші результати експериментальних досліджень *umkehr*-ефекту в АОТЕ наведені в [6, 7]. Показано, що при певних орієнтаціях індукції магнітного поля і градієнта температури відносно кристалографічних осей монокристала Ві інверсія індукції магнітного поля приводить до зміни величини і знаку поздовжньої термоЕРС. Фізична природа цього явища вияснялась вперше в [8, 9], в

яких досліджувалась залежність поздовжньої термоЕРС від напрямку індукції поперечного магнітного поля при напрямку градієнта температури.

Розглянуто АОТЕ з погляду одновимірної температурної моделі, яка застосовувалась в [10–12]. Одновимірна температурна модель використовувалась також в роботі [13]. Суть цієї моделі полягає в тому, що зразок АОТЕ, який знаходиться в поперечному магнітному полі, або володіє поперечною термоЕРС, проявляє або ефект Еттингсгаузена або поперечний ефект Пельтьє, настільки довгий, що ефектами на торцевих гранях можна знехтувати. Тобто натікання тепла всередину АОТЕ через торці не впливає на процеси, що відбуваються в його середній частині. У цьому випадку вважається, що в середній частині зразка температура одновимірна, а електричне поле вздовж напрямку струму постійне. Створення нових АОТЕ було розглянуто в [14]. Недоліком цих робіт є те, що при розрахунках робочих характеристик не враховувалась залежність термоЕРС від інверсії індукції магнітного поля. Така залежність була до деякої міри врахована автором при дослідженні роботи АОТЕ в режимі генерації електричної енергії і частково в режимі охолодження в [15]. Однак ряд важливих питань залишились невирішеними.

5. Методи дослідження

Розглянемо АОТЕ, що виготовлений з оптично прозорого в заданому спектрі частот та матеріалу у вигляді круглого циліндра 1 радіусом a і висотою b з термостатованою при температурі T_0 боковою поверхнею (рис. 1).

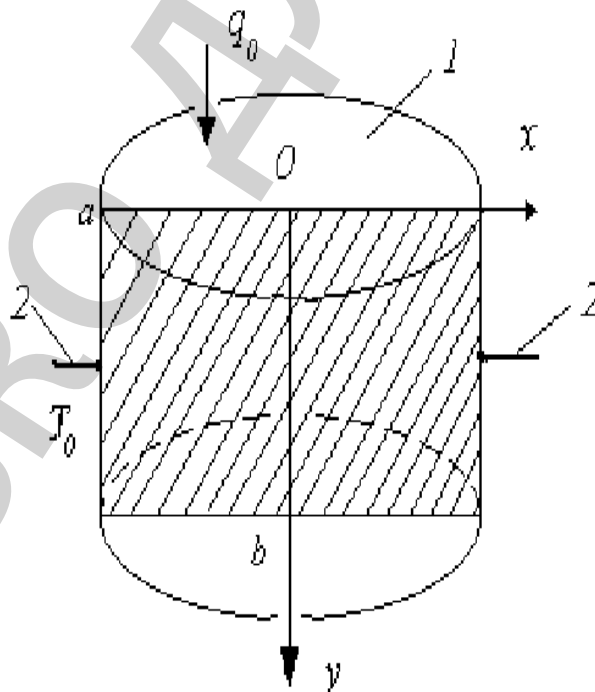


Рис. 1. Схема анізотропного оптикотермоелемента, що застосована для розрахунку розподілу температури

Кристалграфічні осі з максимальною і мінімальною термоЕРС розташовані в площині (x, y) . На рис. 1 штриховкою показано напрямку кристалграфі-

чної осі, електричні зонди для вимірювання термоЕРС – цифрами 2. Орієнтація кристалографічних осей при цьому вибирається за умови одержання максимальної поперечної термоЕРС [16].

Нехтуючи відбиванням падаючого монохроматичного променевого потоку q_0 на границях АОТЕ ($y=0$ та $y=b$), подамо узагальнене рівняння теплопровідності з урахуванням закону Бугера у вигляді:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{q_0 \gamma}{\chi} e^{-\gamma y} = 0, \quad (1)$$

де χ, γ – коефіцієнти – теплопровідності і поглинання відповідно, які вважаються постійними.

Рівняння (1) справедливе для будь-якого перетину (x, y) , оскільки χ – ізотропна. У такій постановці ізотермічні лінії для кожної з площин $y = const$ – концентричні кола. Третій член в (1) – внутрішнє джерело тепла. Це рівняння необхідно розглядати сумісно з граничними умовами:

$$T(-a, y) = T(a, y) = T_0, \quad (2)$$

$$\frac{dT(x, 0)}{dy} = \frac{dT(x, b)}{dy} = 0. \quad (3)$$

Умови (3) випливають з вимог неперервності теплового потоку на границях ($y=0$ и $y=b$).

Запишемо розв'язок рівняння (1) у вигляді розкладу в ряд Фур'є за косинусами:

$$T(x, y) = T_0 + f_0(x) + \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) \cos \delta_n y, \quad (4)$$

де $\delta_n = n\pi/b$, f_0 – нульовий член розкладу.

Підставивши (2) в (1), одержимо:

$$f_0''(x) + f_n''(x) - \delta_n^2 f_n(x) + C_0 + C_n = 0, \quad (5)$$

де C_0, C_n – коефіцієнти розкладу в ряд Фур'є за косинусами функції:

$$(q_0 \gamma / \chi) \exp(-\gamma y),$$

які мають вигляд:

$$C_0 = \frac{2q_0}{\gamma b} (1 - e^{-\gamma b}),$$

$$f_0''(x) - \delta_n^2 f_n(x) + C_n = 0.$$

З цих рівнянь одержимо:

$$f_n(x) = \frac{C_n}{\delta_n^2} + A_n e^{\delta_n x} + B_n e^{-\delta_n x}, \quad (6)$$

$$f_0(x) = -\frac{1}{2} C_0 x^2 + Gx + F. \quad (7)$$

де A_n, B_n, G, F – постійні інтегрування.

Використовуючи граничні умови (4) і вирази (2), (6), (7), запишемо:

$$\frac{C_n}{\delta_n^2} + A_n e^{\delta_n a} + B_n e^{-\delta_n a} = 0,$$

$$\frac{C_n}{\delta_n^2} + A_n e^{-\delta_n a} + B_n e^{\delta_n a} = 0,$$

$$-\frac{1}{2} C_0 a^2 - Ga + F = 0,$$

$$-\frac{1}{2} C_0 a^2 + Ga + F = 0.$$

З перших двох рівнянь знайдемо:

$$A_n = B_n = -\frac{C_n}{\delta_n^2} \frac{1}{2ch\delta_n c},$$

а два других дадуть:

$$G = 0, \quad F = C_0 a^2 / 2.$$

Отже розподіл температури буде мати вигляд:

$$T(x, y) = T_0 + \frac{1}{2} C_0 (a^2 - x^2) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{\delta_n^2} \frac{ch\delta_n a - ch\delta_n x}{ch\delta_n a} \cos \delta_n y.$$

Різниця потенціалів між точками $(a, b/2)$ та $(-a, b/2)$ (зонди 2 на рис. 1) складе величину:

$$\Delta\varphi = 2\alpha_{12} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{\delta_n^2} \left(\delta_n a - \frac{sh\delta_n a}{ch\delta_n a} \right) \sin \frac{\delta_n b}{2}.$$

Підставивши замість C_n і δ_n їх значення, для різниці потенціалів $\Delta\varphi$ отримаємо:

$$\Delta\varphi = \frac{4\alpha_{12}q_0\gamma^2 b^2}{\pi^2 \chi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n e^{-\gamma b}}{n^2 (\pi^2 + b^2 \gamma^2)} \frac{\pi a \operatorname{ch} \frac{\pi a}{b} - b \operatorname{sh} \frac{\pi a}{b}}{\operatorname{ch} \frac{\pi a}{b}} \sin \frac{\pi n}{2}.$$

Різниця потенціалів $\Delta\varphi$ являє собою термоЕРС, яка обумовлена наявністю падаючого променевого теплового потоку q_0 , анізотропією коефіцієнта термоЕРС α_{12} , теплопровідністю χ і поглинанням γ . Різниця потенціалів залежить також від геометричних розмірів АОТЕ a та b .

У випадку застосування розглянутого АОТЕ в якості датчика приймача прохідного потоку за умов $a > b$, $\gamma b \ll 1$ для різниці потенціалів $\Delta\varphi$ з великою точністю можна записати:

$$\Delta\varphi = \frac{8}{\pi} \frac{\alpha_{12}}{\chi} q_0 a (\gamma b)^2.$$

Вольт-ватну чутливість подамо виразом:

$$S = 8 \cdot 10^{-2} \alpha_{12} \gamma^2 b^2 (\chi a)^{-1}.$$

Потужність еквівалентного шуму P даного приймача має вигляд:

$$P = 2.5 \cdot 10^{-2} \chi a (\alpha_{12} \gamma)^{-1} (k_0 T \sigma b),$$

а постійна часу:

$$-\tau = 4a^2 (\pi a_0)^{-1}.$$

Максимальна густина контрольованої енергії q_{\max} :

$$q_{\max} = 2\Delta T \chi (\gamma a^2)^{-1}.$$

В наведених виразах: k_0 – постійна Стефана-Больцмана; a_0 , σ , ΔT – температуропровідність, електропровідність і допустима температура перегріву матеріалу АОТЕ відповідно.

6. Результати дослідження

В табл. 1 наведено параметри реальних оптично-прозорих кристалів, що володіють анізотропією коефіцієнта термоЕРС при температурі 300 К [17].

Таблиця 1

Матеріали виготовлення анізотропних термоелементів

Матеріал	Область оптичного пропускання λ , мкм	Коефіцієнт оптичного поглинання γ , см ⁻¹	Коефіцієнт поперечної термоЕРС, $\Delta\alpha$, мкВ·К ⁻¹	Коефіцієнт теплопровідності, χ , Вт·см ⁻¹ ·К ⁻¹	Коефіцієнт електропровідності, σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹
CdSb	2,6–40,0	0,1–0,3	100–300	$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,3
ZnSb	2,4–27,0	0,4–0,8	100–200	$1,1 \cdot 10^{-2}$	1,5
CdAs ₂	1,25–16,0	0,5–1,0	250–450	$3 \cdot 10^{-2}$	0,03
ZnAs ₂	1,36–21,0	0,8–1,2	180–360	$6 \cdot 10^{-2}$	0,01
CdS	0,5–18,0	0,2–0,8	120–220	$2 \cdot 10^{-1}$	0,6

Використання матеріалів з табл. 1 дало змогу створити конструкції різних анізотропних термоелектричних елементів:

– стабільних в часі приймачів прохідного типу з вольт-ватною чутливістю $S=10^{-6}-10^{-3}$ В/Вт⁻¹;

– робочою площадкою 0,1–5,0 см² при максимальному значенні густини потоку енергії $q_{\max}=10^{-3}-10^1$ Вт/см² в широкому спектральному діапазоні, з можливістю їх використання в якості фільтра.

На основі АОТЕ була розроблена конструкція приймача лазерного випромінювання (рис. 2). За допомогою цього приймача можна визначати розподіл енергії променевого потоку за поперечним перерізом пучка в широкому спектральному та енергетичному діапазонах, який захищений патентом України [18].

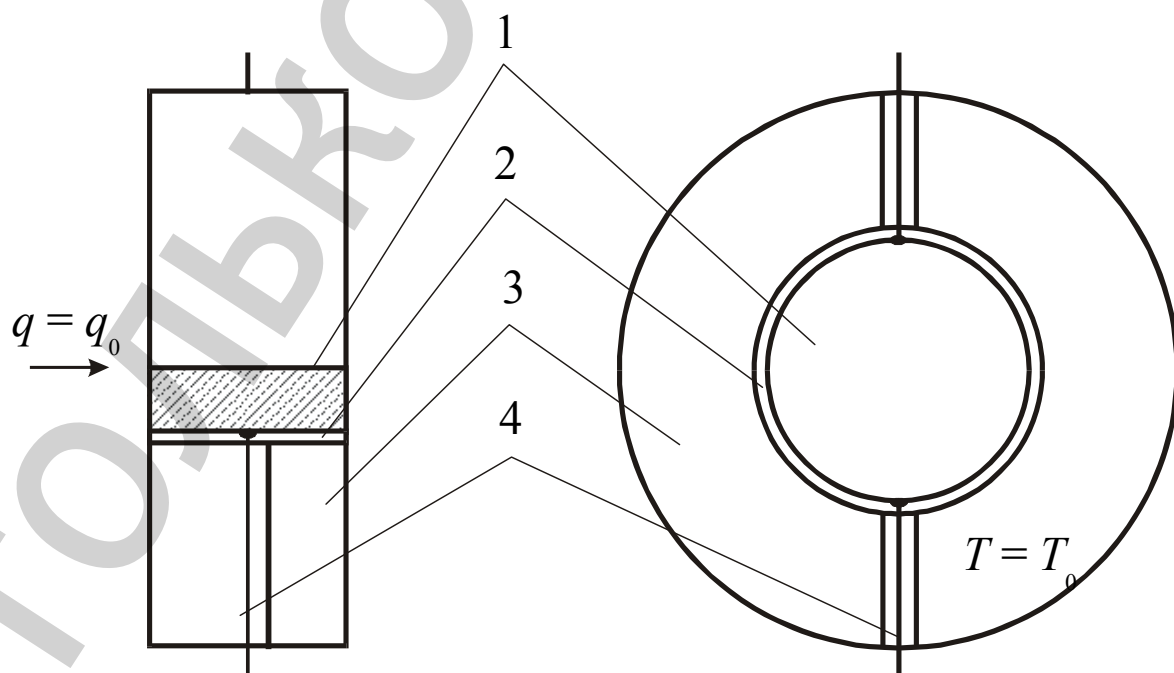


Рис. 2. Конструкція приймача теплового випромінювання на основі анізотропного оптикотермоелементу: 1 – анізотропний оптикотермоелемент; 2 – теплопровідне електроізоляційне кільце; 3 – термостат; 4 – електричні з'єднання

Анізотропний оптикотермоелемент широко використовуються в вимірвальній техніці. Для реєстрації та вимірювання енергетичних потоків ефективно використовуються нові анізотропні оптикотермоелементи. Вони незамінні при дослідженні, наприклад, потужного лазерного випромінювання. В області азотних температур та нижче перспективним є використання гальванотермомагнітних охолоджуючих пристроїв для охолодження та стабілізації температури різного роду мікросенсорів та приладів мікроелектронної техніки

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Сильною стороною дослідження є вивчення природи фізичних процесів в термоелектричних середовищах, які є основою винайдення оригінальних важливих з практичного погляду елементів та вивчення явищ, що в них протікають.

Weaknesses. Слабкою стороною дослідження є неврахування залежності термоЕРС від інверсії індукції магнітного поля (umkehr-ефект), що значною мірою обмежує вказані можливості.

Opportunities. У подальшому необхідно дослідити вплив інверсії індукції магнітного поля (umkehr-ефект) на характеристики поздовжніх АОТЕ і проаналізувати можливості створення на основі одержаних результатів АОТЕ, принцип дії яких ґрунтується на umkehr-ефекті. Також необхідно запропонувати та дослідити фізичні моделі поздовжніх АОТЕ на основі ефекту Томсона, об'ємного ефекту Пельтьє та ефекту Бриджмена з погляду максимального зниження температури.

Впровадження результатів дослідження у виробництво дасть змогу визначити економічну ефективність від поточних витрат, пов'язаних з їх використанням у виробництві. Прибуток від впровадження розробленого приймача теплового випромінювання на підприємстві складе 100 у. е. [18].

Threats. При розрахунку розподілу температури і ККД прийнято, що розподіл температури двовимірний, густина електричного струму, який виробляється АОТЕ, постійна, кінетичні параметри матеріалу АОТЕ теж постійні. ККД залежить від величин теплового потоку, зовнішнього електричного опору. В числовому відношенні для сучасних термоелектричних однорідних анізотропних матеріалів він може досягати величини $\sim 0,8\%$. Такий АОТЕ може використовуватись в якості датчика теплового випромінювання.

Оцінювання всіх фінансових витрат від впровадження приймача теплового випромінювання на основі анізотропного оптикотермоелементу на підприємстві, складе $0,007\%$ від вартості приладу [18].

8. Висновки

1. Показано, що анізотропні термоелектричні елементи з робочою площею $0,1-5,0 \text{ см}^2$ при максимальному значенні густини потоку енергії $q_{\text{max}}=10^{-3}-10^1 \text{ Вт/см}^2$ в широкому спектральному діапазоні дають оптимальне охолодження обладнання.

2. Розроблено та випробувано конструкцію приймача потоку променевої енергії на основі анізотропного оптикотермоелементу, при проходженні якого амплітудно-фазові характеристики потоку не змінюються. Приймач може використовуватись в якості фільтра або напівпрозорого дзеркала оптичного резонатора. Такий ефект завдяки тому, що при товщині в 1 см обраний АОТЕ з параметрами $\alpha=10^{-4} \text{ В/К}$, $\chi=10^{-2} \text{ Вт/(см}\cdot\text{К)}$, $\rho=10^{-3} \text{ Ом}$, струмові $I=10 \text{ А}$ і температурі термостата 300 К см дає мінімальне значення температури 239 К .

Література

1. Korn, G. A. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review (Dover Civil and Mechanical Engineering)* [Text] / G. A. Korn, T. M. Korn. – Dover Publications, 2000. – 1152 p.
2. Lansberg, G. S. *Optika* [Text] / G. S. Lansberg. – Moscow: Nauka, 1996. – 927 p.
3. Ascheulov, A. A. Radiatsionnyi anizotropnyi optikotermoelement s bokovym termostatirovaniem [Text] / A. A. Ascheulov, V. G. Ohrem // TKEA. – 2014. – № 1. – P. 45–47.
4. Ascheulov, A. A. EDS anizotropnogo termoelementa v rezhime opticheskogo propuskaniia [Text] / A. A. Ascheulov, V. M. Kondratenko, Yu. B. Piliavskii, I. M. Rarenko // FTP. – 2014. – Vol. 18, № 7. – P. 1330–1331.
5. Samoilovich, A. G. Sovremennoe sostoianie termoelektricheskikh i termomagnitnykh iavlenii v poluprovodnikah [Text]. Part 1. Termodinamicheskaiia teoriia / A. G. Samoilovich, L. L. Korenblit // UFN. – 1984. – Vol. 49, № 3. – P. 243–272.
6. Wolfe, R. Experimental Verification of the Kelvin Relation of Thermoelectricity in a Magnetic Field [Text] / R. Wolfe, G. E. Smith // *Physical Review*. – 1963. – Vol. 129, № 3. – P. 1086–1087. doi:[10.1103/physrev.129.1086](https://doi.org/10.1103/physrev.129.1086)
7. Wolfe, R. Negative thermoelectric figure of merit in a magnetic field [Text] / R. Wolfe, G. E. Smith, S. E. Haszko // *Applied Physics Letters*. – 1963. – Vol. 2, № 8. – P. 157–159. doi:[10.1063/1.1753823](https://doi.org/10.1063/1.1753823)
8. Smith, G. E. Analysis of the transport phenomena in bismuth [Text] / G. E. Smith, R. Wolfe // *J. Phys. Soc. Japan Suppl.* – 2016. – Vol. 21. – P. 651–656.
9. Goldsmith, H. J. *Thermoelectric refrigeration* [Text] / H. J. Goldsmith. – London, 2014. – 246 p
10. Harman, T. C. *Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications* [Text] / T. C. Harman, J. M. Honig. – New-York: Mc Graw-Hill book Company, 2010. – 377 p.
11. Kooi, C. F. Thermoelectric-Thermomagnetic Energy Converter Staging [Text] / C. F. Kooi, R. B. Horst, K. F. Cuff // *Journal of Applied Physics*. – 1968. – Vol. 39, № 9. – P. 4257–4263. doi:[10.1063/1.1656957](https://doi.org/10.1063/1.1656957)

12. Delves, R. T. The prospects for Ettingshausen and Peltier cooling at low temperatures [Text] / R. T. Delves // British Journal of Applied Physics. – 1962. – Vol. 13, № 9. – P. 440–445. doi:[10.1088/0508-3443/13/9/302](https://doi.org/10.1088/0508-3443/13/9/302)
13. Harman, T. C. Erratum: Operating characteristics of transverse (nernst) anisotropic galvano-thermomagnetic generators [Text] / T. C. Harman, J. M. Honig // Applied Physics Letters. – 1963. – Vol. 2, № 2. – P. 44–48. doi:[10.1063/1.1753765](https://doi.org/10.1063/1.1753765)
14. Ohrem, V. G. Issledovaniia vliianiia inversii magnitnogo polia na termoEDS [Text]: PhD thesis: 01.04.10 / V. G. Ohrem. – Chernovtsy, 2002. – 98 p.
15. Ascheulov, A. A. Anizotropnyi termoelement vnutrennego opticheskogo otrazheniia [Text] / A. A. Ascheulov, I. V. Gutsul, I. M. Rarenko // UFZh. – 2003. – Vol. 38, № 6. – P. 923–927.
16. Ascheulov, A. A. Anizotropnyi radiatsionnyi termoelement dlia izmenenii prohodnoi moshchnosti [Text] / A. A. Ascheulov // Optiko-mehaniческаia promyshlennost'. – 2015. – № 12. – P. 48–49.
17. Anisotropic thermoelectric thermal radiation detector [Electronic resource]: Patent of Ukraine № 63394 A, MKB 7 H101L32/02 / Ascheulov A. A., Ohrem V. G. – Publ. 15.01.2004. – Available at: \www/URL: <http://uapatents.com/2-63394-anizotropnijj-termoelektrichnijj-prijjmach-viprominyuvannya.html>
18. Patent of Ukraine / Danalakiy O.; Institute of Thermoelectricity. – Appl. № 200304264; Filed 11.042003; Publ. 15.04.2014, Bull. № 1. – 6 p.