

## ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА І ВОЛЬТ-ВАТНА ЧУТЛИВІСТЬ АНІЗОТРОПНОГО ОПТИКОТЕРМОЕЛЕМЕНТА ПРИ ОПРОМІНЮВАННІ БОКОВОЇ ГРАНІ

Розв'язано двовимірне неоднорідне рівняння теплопровідності оптикотермоелемента при опромінюванні його бокової грані. Одержано вирази поперечної термоелектрорушійної сили і вольт-ватної чутливості з урахуванням анізотропії коефіцієнтів термоерс і теплопровідності.

The two-dimensional heterogeneous equation of thermal conductivity of optical thermoelement in the case of its side edge irradiation has been solved. The expressions of transverse thermopower and volt-watt sensitivity taking into account the anisotropy of coefficients of thermoelectromotion force and heat conductivity have been obtained.

Існують пристрої [1-17], які дозволяють контролювати променеву енергію різних лазерних випромінювачів як в імпульсному, так і в неперервному режимах випромінювання. Вони складаються з анізотропного термоелемента у вигляді прямокутної чотиригранної призми з оптично прозорого, термоелектрично анізотропного матеріалу й оптично прозорого термостата. На нижній грані призми і верхній грані термостата розміщені оптично просвітлюючі шари. Наявність клеєвої прокладки між призмою і термостатом обмежує часову стабільність роботи приймача внаслідок вигорання клею і погіршення його оптичного пропускання. Тому виникає потреба дослідження можливості збільшення часу роботи термоелемента.

Вказане завдання розв'язується тим, що розглядається анізотропний оптикотермоелемент (АОТ) 1 (рис.1) на бокових гранях якого розміщені оптично просвітлюючі шари 2, а до торцевих граней прикріплені електровиводи 3. Нижня грань термоелемента через діелектричний шар 4 знаходиться в тепловому контакті з термостатом 5. Анізотропний оптикотермоелемент 1 виготовлений з оптично прозорого в заданому спектрі частот анізотропного матеріалу у вигляді прямокутної чотиригранної призми довжиною  $a$ , висотою  $b$  і шириною  $c$ , коефіцієнти термоерс  $\bar{\alpha}$  і теплопровідності  $\bar{\chi}$  такі:

$$\bar{\alpha} = \begin{vmatrix} \alpha_{\parallel} \sin^2 \varphi + \alpha_{\perp} \cos^2 \varphi & (\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}) \sin \varphi \cos \varphi & 0 \\ (\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}) \sin \varphi \cos \varphi & \alpha_{\parallel} \cos^2 \varphi + \alpha_{\perp} \sin^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\perp} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

$$\bar{\chi} = \begin{vmatrix} \chi_{\parallel} \sin^2 \varphi + \chi_{\perp} \cos^2 \varphi & (\chi_{\parallel} - \chi_{\perp}) \sin \varphi \cos \varphi & 0 \\ (\chi_{\parallel} - \chi_{\perp}) \sin \varphi \cos \varphi & \chi_{\parallel} \cos^2 \varphi + \chi_{\perp} \sin^2 \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{\perp} \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Термостат 5 виготовлений із матеріалу з великою теплоємністю і теплопровідністю.

Променева енергія густиною  $q_0$ , падаючи на одну з бокових граней пластини 1, проходить через її об'єм і виходить через другу бокову грань. Частина цієї енергії  $\Delta q$  поглинається об'ємом термоелемента, створюючи при цьому пропорційний градієнт температури, направлений вздовж

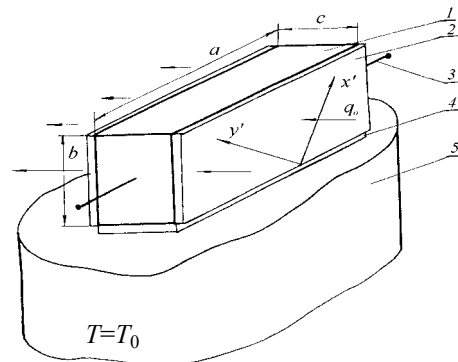


Рис.1. Схематична конструкція АОТ: анізотропний термоелемент (1), оптично просвітлюючі шари (2), електровиводи (3), діелектричний шар (4), термостат (5).

висоти  $b$  пластини 1. Це, у свою чергу, приводить до появи на контактах 3 поперечної термоерс, яка однозначно визначає величину густини падаючого променевого потоку  $q_0$ . При наявності внутрішніх джерел тепла розподіл температури в пластині знаходимо із закону теплопровідності [18], який для стаціонарного випадку  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$  має такий вигляд:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \beta^2 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_0 \gamma}{\chi_{22}} e^{-\gamma(c-z)} = 0, \quad (3)$$

де  $\beta^2 = \frac{\chi_{33}}{\chi_{22}}$ , а  $\gamma$  – коефіцієнт поглинання матеріалу АОТ.

Крайові умови вибираємо так:

$$T|_{y=0} = T_0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=b} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=c} = 0, \\ \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=a} = 0. \quad (4)$$

Система  $\{\cos \lambda_n z\}_{n=0}^{\infty}$  є повною, замкнутою, ортогональною системою функцій на відрізку  $[0, c]$  задачі Штурма-Ліувіля

$$\frac{d^2 \Phi}{dz^2} + \lambda^2 \Phi = 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{y=c} = 0, \quad (5)$$

де  $\lambda_n = n\pi/c$  – власне значення власної функції  $\cos \lambda_n z$ , а  $n=0, 1, 2, \dots$

Це дозволяє проводити розклад функції  $\Phi(z)$  у ряд Фур'є за цією системою. Функція  $\Phi(z)$  за своїми зображенням [19]

$$\widehat{F}_n[\Phi(z)] = \int_0^c \Phi(z) \cos \lambda_n z dz \equiv \Phi_n, \quad (6)$$

однозначно відновлюється за правилом

$$\Phi(z) = \widehat{F}_n^{-1}[\Phi_n] = \frac{1}{c} \sum_{n=0}^{\infty} \delta_n \Phi_n \cos \lambda_n z, \quad (7)$$

де

$$\delta_n = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 2, & n = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Співвідношення (6) і (7) носять назву оптичного прямого  $\widehat{F}_n$  і оберненого  $\widehat{F}_n^{-1}$  інтегральних косинус-перетворень Фур'є.

Для розв'язку задачі (3)-(4) використаємо оператор  $\widehat{F}_n$  за правилом (6). Внаслідок тотожності

$$\widehat{F}_n \left[ \beta^2 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \int_0^c \beta^2 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \cos \lambda_n z dz \equiv -\beta^2 \lambda_n^2 T_n(y), \quad (8)$$

де

$$T_n(y) = \int_0^c T(y, z) \cos \lambda_n z dz,$$

маємо задачу побудови розв'язку рівняння

$$\frac{d^2 T_n(y)}{dy^2} - \beta^2 \lambda_n^2 T_n(y) = -f_n, \quad y \in (0, b), \quad (9)$$

$$f_n = \int_0^c \frac{q_0 \gamma}{\chi_{22}} e^{-\gamma(c-z)} \cos \lambda_n z dz, \quad (10)$$

за крайовими умовами

$$T_n(y)|_{y=0} = T_{0n}, \quad \left. \frac{dT_n(y)}{dy} \right|_{y=b} = 0, \quad (11)$$

$$T_{0n} = \int_0^c T_0 \cos \lambda_n z dz = \begin{cases} T_0 c, & n = 0 \\ 0, & n = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Розв'язок задачі (9)-(11) при  $n=0$  такий

$$T_0(y) = \frac{q_0}{2\chi_{22}} (e^{-\gamma c} - 1)(y^2 - 2by) + T_0 c. \quad (12)$$

Загальний розв'язок неоднорідного рівняння (9) при  $n>0$  будемо шукати у вигляді загального розв'язку однорідного і часткового розв'язку неоднорідного рівнянь

$$T_n(y)|_{n>0} = T_n^{\text{одн}}(y)|_{n>0} + T_n^{\text{неодн}}(y)|_{n>0}. \quad (13)$$

Загальний розв'язок однорідного рівняння (9) такий:

$$T_n^{\text{одн}}(y)|_{n>0} = A_{1n} \text{ch} \lambda_n y + A_{2n} \text{sh} \lambda_n y. \quad (14)$$

Для часткового розв'язку неоднорідного рівняння (9) при врахуванні співвідношення (10) маємо

$$T_n^{\text{ч.неодн}}(y)|_{n>0} = \frac{q_0 \gamma^2}{\chi_{22} \beta^2} \frac{((-1)^n - e^{-\gamma c})}{\lambda_n^2 (\lambda_n^2 + \gamma^2)}. \quad (15)$$

Коефіцієнти  $A_{1n}$  і  $A_{2n}$  знаходимо за крайовими умовами (11) для  $n>0$ :

$$A_{1n} = \frac{q_0 \gamma^2}{\chi_{22} \beta^2} \frac{(e^{-\gamma c} - (-1)^n)}{\lambda_n^2 (\lambda_n^2 + \gamma^2)}, \quad (16)$$

$$A_{2n} = \frac{q_0 \gamma^2}{\chi_{22} \beta^2} \frac{((-1)^n - e^{-\gamma c})}{\lambda_n^2 (\lambda_n^2 + \gamma^2)} \text{th}(\beta \lambda_n b).$$

Підставляючи (16) в (14) і враховуючи (12), (13) і (15), отримуємо вираз для загального розв'язку неоднорідного диференціального рівняння (9) при  $n \geq 0$  у такому вигляді

$$T_n(y) = \frac{q_0}{2\chi_{22}} \left( e^{-\gamma c} - 1 \right) (y^2 - 2by) + T_0 c + \frac{q_0 \gamma^2 \left| (-1)^n - e^{-\gamma c} \right|}{\chi_{22} \beta^2 \lambda_n^2 (\lambda_n^2 + \gamma^2)} \times \left\{ 1 - \frac{\text{ch}[\beta \lambda_n (y - b)]}{\text{ch}(\beta \lambda_n b)} \right\}. \quad (17)$$

Застосовуючи обернене інтегральне косинус-перетворення Фур'є (7) до розв'язку (15). У результаті одержуємо кінцевий вираз розподілу температури досліджуваного АОТ

$$T(y, z) = T_0 + \frac{q_0}{2\chi_{22} c} \left( e^{-\gamma c} - 1 \right) (y^2 - 2by) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2q_0 \gamma^2 \left[ (-1)^n - e^{-\gamma c} \right]}{\chi_{22} c \beta^2 \lambda_n^2 (\lambda_n^2 + \gamma^2)} \times \left\{ 1 - \frac{\text{ch}[\beta \lambda_n (y - b)]}{\text{ch}(\beta \lambda_n b)} \right\} \cos \lambda_n z. \quad (18)$$

Поперечна складова напруженості термоелектричного поля, зумовлена проходженням променевого потоку через анізотропну пластину, визначається співвідношенням

$$E_x^T = \alpha_{11} \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_{12} \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha_{13} \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (19)$$

Згідно з [20] електрорушійна сила  $\varepsilon$  анізотропного термоелемента із врахуванням (19) має вигляд:

$$\varepsilon = \frac{1}{bc} \int_0^b dy \int_0^c dz \int_0^a dx \left( \alpha_{11} \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_{12} \frac{\partial T}{\partial y} + \alpha_{13} \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (20)$$

Підставляючи (18) в (20), одержимо після інтегрування наступний вираз для поперечної термоерс  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 0,5 q_0 \frac{ab}{c} \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22}} \left( 1 - e^{-\gamma c} \right). \quad (21)$$

Вольт-ватна чутливість  $S_0$  розглянутого АОТ визначається таким співвідношенням

$$S_0 = \frac{\varepsilon}{q_0 ab} = 0,5 c^{-1} \frac{\alpha_{12}}{\chi_{22}} \left( 1 - e^{-\gamma c} \right). \quad (22)$$

На рис.2,3 наведено графіки залежності вольт-ватної чутливості  $S_0$  від  $\gamma c$  у випадках оптичного пропускання ( $\gamma c \ll 1$ ) і поверхневого поглинання ( $\gamma c \gg 1$ ) для АОТ із CdSb при опроміненні бокової грані. Показано, що в обидвох випадках вольт-ватна чутливість зменшується з ростом  $\gamma c$ , але при поверхневому поглинанні вона характеризується більшими за величиною значеннями, ніж у випадку оптичного пропускання.

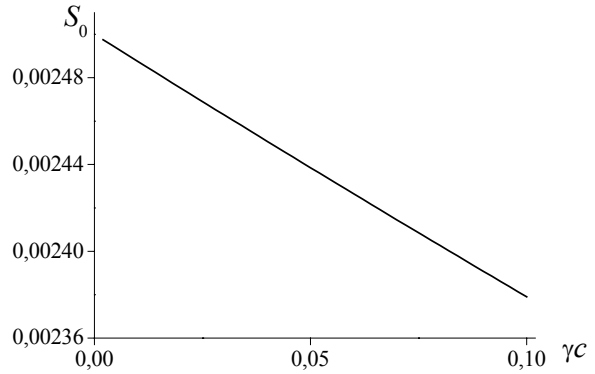


Рис.2. Залежність вольт-ватної чутливості  $S_0$  АОТ із CdSb у випадку оптичного пропускання ( $\gamma c \ll 1$ ) при опроміненні бокової грані.

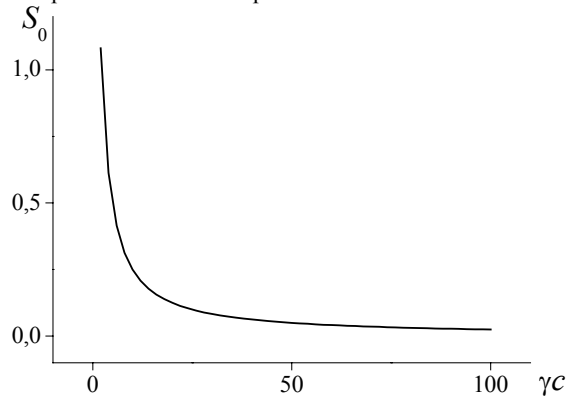


Рис.3. Залежність вольт-ватної чутливості  $S_0$  АОТ із CdSb у випадку поверхневого поглинання ( $\gamma c \gg 1$ ) при опроміненні бокової грані.

Аналіз одержаних результатів показує, що запропонований оптикотермоелемент дозволяє реєструвати відносно високі значення енергій променивих потоків. Максимальне значення поперечної термоерс  $\varepsilon$  визначається анізотропією коефіцієнтів як термоерс  $\bar{\alpha}$ , так і теплопровідності  $\bar{\chi}$  і спостерігається при деякому оптимальному значенні кута  $\varphi$ . Такий термоелемент зручний в експлуатації, може встановлюватись як вихідні вікна випромінювача та дозволяє контролювати енергію при виконанні технологічних задач із можливістю здійснення автоматичного управління рівнем густини променевої енергії. Змінюючи геометричні розміри АОТ, а також застосовуючи реальні матеріали, можна одержати відповідні пристрої з необхідними параметрами.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Анатъчук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. - Киев: Наук. думка, 1979.
2. Ащеулов А.А., Кондратенко В.М., Пилявский Ю.Б., Раренко И.М. ЭДС анизотропного термоэлемента в режиме проходящей мощности // УФЖ. - 1984. - 29, №9. - С.1427-1429.

3. *Ащеулов А.А.* Анизотропный радиационный термоэлемент для измерения проходной мощности // ОМП. - 1989. - **12**. - С.48-49.
4. *Ащеулов А.А., Гуцул И.В., Раренко А.И.* Анизотропный радиационный термоэлемент, действующий в режиме внутреннего отражения // Оптический журнал. - 1993. - **4**. - С.78-79.
5. *Ashcheulov A.A., Gutsul I.V.* Anisotropic optical thermoelectric elements // J. of Thermoelectricity. - 1997. - **3**. - P.81-89.
6. *Ащеулов А.А., Гуцул И.В., Раренко А.И.* Електрошушійна сила і коефіцієнт корисної дії анізотропного термоелемента у випадку врахування анізотропії коефіцієнтів термоЕРС і теплопровідності // УФЖ. - 1997. - **42**, №6. - С.698-701.
7. *Ashcheulov A.A., Gutsul I.V., Rarenko A.I.* About the Possibilities of Transverse Thermoelectromotion Force in the Case of Optical Media // Proceedens XVI International Conference on Thermoelectrics, Dresden, Augus 26-29 1997. - Dresden, Germany, 1997. - P.764-767.
8. *Гуцул И.В.* Анізотропний оптикотермоелемент у випадку збігу напрямків променевого потоку та градієнта температури // УФЖ. - 1998. - **43**, №10. - С.1278-1281.
9. Анізотропний термоелектричний приймач лазерного випромінювання: Заявка №23478 АН 01L 35/02, від 02.06.1998 р. Бюл.№4 31.08.1998р. / *Ащеулов А.А., Гуцул И.В., Раренко А.И.*
10. *Гуцул И.В.* Анизотропный радиационный термоэлемент для измерения проходной мощности в случае термостатирования верхней рабочей грани // Опт. журн. - 1999. - **66**, №7. - С.109-111.
11. *Гуцул И.В.* Особливості розподілу температури анізотропної пластини // Науковий вісник ЧДУ. Вип.50: Фізика. - Чернівці: Рута, 1999. - С.15-17.
12. *Гуцул И.В.* Можливості використання поперечної термоелектрорушійної сили в оптичних середовищах для перетворення та реєстрації променивих потоків // Журн. фізичних досліджень. - 1999. - **3**, №1. - С.98-101.
13. *Ащеулов А.А., Гуцул И.В., Раренко А.И.* Метод "прозрачной стенки" для контроля лучистых потоков различной мощности // ТКЭА. - 1999. - **2-3**. - С.33-36.
14. *Гуцул И.В.* Дослідження вольт-ватної чутливості анізотропного оптико термоелемента при антипаралельних напрямках градієнта температури та променевого потоку // Науковий вісник ЧНУ. Вип.79: Фізика.Електроніка. - Чернівці: Рута, 2000. - С.12-14.
15. *Гуцул И.В., Ащеулов А.А.* Поперечна термоЕРС і вольт-ватна чутливість анізотропного оптико термоелемента у випадку термостатування його бокових граней // Науковий вісник ЧНУ. Вип.92: Фізика. Електроніка. - Чернівці: Рута, 2000. - С.5-8.
16. *Gutsul I.V., Ashcheulov A.A.* Investigation of Transverse Thermopower, Efficiency and Volt-Watt Sensitivity of Anisotropic Optical Thermoelement with a Triangular Cross-Section // J. of Thermoelectricity. - 2000. - **2**. - P.49-53.
17. *Гуцул И.В.* Явища електро- та теплопереносу в анізотропних напівпровідниках: Дис. докт. фіз.-мат. наук. - Чернівці, 2000.
18. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. - М.: Высш. шк., 1967.
19. *Ленюк М.П.* Интегральные преобразования с раздельными переменными (Фур'е-Ханкеля). - Киев, 1983. - (Препр. / Институт математики АН УССР: №83.4).
20. *Снарский А.А.* ЭДС термоэлементов, использующих анизотропию термоЭДС. I. Анизотропные термоэлементы прямоугольной формы // ФТП. - 1977. - **11**, вып.10. - С.2053-2055.