

ТЕРМОЕЛЕКТРИКА

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у грудні 1993 р.,
видається 6 разів на рік

№ 3

2021

Редакційна колегія

Головний редактор Л.І. АНАТИЧУК

Л.М. Вихор

Б.І. Стадник

В.В. Лисько

О.Я. Лусте

С.В. Мельничук

О.І. Рогачова

А.О. Снарський

Міжнародна редакційна рада

Л.І. Анатичук, *Україна*

Ю. Грін, *Німеччина*

С.П. Ашмонтас, *Литва*

Т. Кадзікава, *Японія*

Ж.К. Теденак, *Франція*

Т. Трітт, *США*

Х.Дж. Голдсмід, *Австралія*

С.О. Філін, *Польща*

Л. Чен, *Китай*

Д. Шарп, *США*

Т. Кайя, *США*

Ю.Г. Гуревич, *Мексика*

Засновники – Національна академія наук України,
Інститут термоелектрики Національної академії
наук та Міністерства освіти і науки України

Свідоцтво про державну реєстрацію – серія КВ № 15496-4068 ПР

Редактори

В.М. Крамар, П.В. Горський, О.Я. Лусте, Т.Г. Подбегаліна

Схвалено до друку Вченою радою Інституту термоелектрики
Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України

Адреса редакції:

Україна, 58002, м.Чернівці, Головоштамт, а/с 86

Тел. : + (380-372) 90 31 65.

Факс :+(380-3722) 4 19 17

E-mail: jt@inst.cv.ua

<http://www.jt.inst.cv.ua>

Підписано до друку: 26.03.2021 Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк
офсетний. Ум. друк. арк. 11.5. Обл.-вид. арк. 9.2. Наклад 400 прим. Замовлення 4.

Надруковано з оригінал-макету, виготовленого редакцією журналу «Термоелектрика»,
у типографії видавництва “Букрек”,
Україна, 58000, м. Чернівці, вул. Радищева, 10.

© Інститут термоелектрики Національної академії
наук та Міністерства освіти і науки України, 2020

ЗМІСТ

Теорія

<i>Ащеулов А.А.</i> Про енергетичні можливості у анізотропному біполярному електропровідному середовищі	5
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

Матеріалознавство

<i>Анатичук Л.І., Вихор Л.М.</i> Вплив електричних та теплових опорів контактів і комутацій на холодильний коефіцієнт термоелектричного модуля	19
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Закордонець В.С., Сисак І.</i> Термоелектрична добротність напівпровідникових надграток	34
--------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Рибчаков Д.Є. Сербин М.В.</i> Комп'ютерний метод опису технологій та властивостей термоелектричних матеріалів на основі $Bi_2 - Te_3$, отриманих методом Бріджмена	45
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Конструювання

<i>Микитюк П.Д., Микитюк О.Ю.</i> До питання вибору матеріалу термопари для термоперетворювачів метрологічного призначення	53
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Метрологія і стандартизація

<i>Анатичук Л.І., Гаврилюк М.В., Лисько В.В.</i> Автоматизація та комп'ютеризація процесів вимірювань термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних та холодильних термоелектричних модулів	63
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>Анатичук Л.І., Лисько В.В.</i> Методика визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження	73
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Термоелектричні вироби

<i>Гаврилюк М.В., Руснак О.С.</i> Стенд для градування тепломірів для визначення параметрів генераторних термоелектричних модулів	86
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

УДК 537.31



Ащеулов А.А.

Ащеулов А.А. док. техн. наук, професор

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
e-mail: ashcheulovaa@rambler.ru

**ПРО ЕНЕРГЕТИЧНІ МОЖЛИВОСТІ У
АНІЗОТРОПНОМУ БІПОЛЯРНОМУ
ЕЛЕКТРОПРОВІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

Проведено дослідження особливостей перетворення електричного струму анізотропним електропровідним середовищем яке характеризується різними типами провідності (p - та n -типи) у вибраних кристалографічних напрямках в умовах омичного контакту. Встановлено, що у випадку протікання зовнішнього електричного струму синусоїдальної форми через пристрій в основі якого є прямокутна пластина із згадуваного вище анізотропного матеріалу, в її об'ємі виникають вихори електричного струму. На основі аналізу функції $m(K, \alpha)$ (випадок $|m| > 1$), що визначає коефіцієнт перетворення пристрою, зроблено висновок про енергетичну взаємодію між об'ємом анізотропної пластини і зовнішнім середовищем. Проведені дослідження показали, що використання анізотропного електропровідного біполярного матеріалу призводить до значно вищої ($m > 1$) або нижчої ($m < -1$) величини коефіцієнта перетворення m ніж у випадку уніполярних анізотропних електропровідних матеріалів. До феномену електроомичного перетворення веде поява вихорів електричного поля, які характеризуються турбулентною течією, що представляються виразом $\text{rot } \mathbf{j} = \pm \omega$, де ω – кругова частота обертання вихору, а знаки «+» та «-» – позначають напрямок його обертання та визначаються величиною коефіцієнта анізотропії $K = \sigma_{11} / \sigma_{22}$. Такі електричні вихори з турбулентним характером течії є ефективним механізмом, що перекачує енергію між зовнішнім середовищем і в нашому випадку, анізотропною пластинною пристрою. Слід відмітити, що в окремих випадках спостерігається аномальне значення згадуваного коефіцієнта. Застосування розглянутого методу перетворення електричного струму за допомогою запропонованих пристроїв, в основі роботи яких є пластинна виготовлена з анізотропного електропровідного матеріалу, значно розширює галузі альтернативної електроенергетики та інших пов'язаних з ним областей науки та техніки. Бібл. 14, рис.7.

Ключові слова: анізотропне середовища; електропровідність; перетворення; електричний струм; коефіцієнт корисної дії; нагрів; охолодження; генерація.

Вступ

У роботі [1] вперше показано можливість виникнення ефекту трансформації в анізотропних

електропровідних уніполярних середовищах. У цьому випадку пристрій, який отримав назву анізотропного електроомічного трансформатора, являє собою прямокутну пластину довжиною a висотою b та шириною c , виконану з анізотропних монокристалічних або шарових електропровідних матеріалів, що характеризуються лінійними вольт-амперними характеристиками. Вибрані кристалографічні осі анізотропного матеріалу 1 та 2, вздовж яких значення електропровідності дорівнюють σ_{11} та σ_{22} , і є за знаком уніполярними, розташовані в площині бічної грані $a \times b$ пластини, одну з яких орієнтовано під деяким кутом α . На торцевих гранях $b \times c$ та верхній і нижній грані $a \times c$ цієї пластини розташовані вхідні та вихідні електровиводи відповідно.

У випадку протікання змінного електричного струму синусоїдальної форми через торцеві контакти 4 та 5 електричного струму J_{in} через вихідні контакти 6, 7 протікає електричний струм J_{out} , а коефіцієнт трансформації m такого пристрою (рис. 1) представляється наступним виразом

$$J_{out} / J_{in} = m = p \cdot f \quad (1)$$

де p – коефіцієнт перетворення матеріалу пластини, $f = a / b$ коефіцієнт її форми.

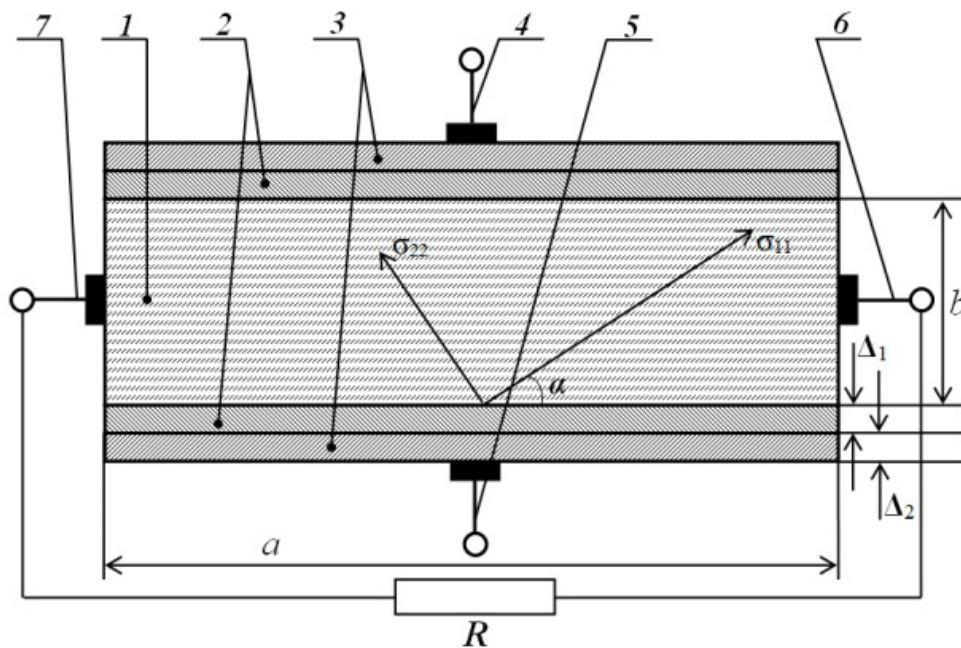


Рис. 1. Схематичне зображення конструкції анізотропного трансформатора 1 – Пластина з анізотропного електропровідного матеріалу; 2 – електроізоляційні шари; 3 – електропровідні шари; 4, 5 – вхідні; 6, 7 – вихідні електровиводи.

При цьому оптимальне значення кута нахилу α визначається із співвідношення

$$\alpha = \arctg\sqrt{K} \tag{2}$$

де $K = \sigma_{11} / \sigma_{22}$ – коефіцієнт анізотропії матеріалу пластини.

Оскільки у розглядуваному випадку виконується умова $\frac{\partial E_{11}}{\partial x} \neq \frac{\partial E_{22}}{\partial y}$ то в об'ємі такої анізотропної пластини виникає вихровий електричний струм який характеризується ламінарною течією [2].

Проведені дослідження показали, що в розглядуваному випадку величина коефіцієнта перетворення не перевищує 1 ($m \leq 1$). Для випадків, як $0 < K < 1$, так і для $1 < K < \infty$. У випадку $K = 1$, $n = 0$.

Метод трансформації, що розглянуто в роботах [1, 3] значно відрізняється від існуючих і має ряд відповідних, як переваг так і недоліків.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Ситуація зміниться, якщо перейти до анізотропного електропровідного середовища яке характеризується різним типом провідності (p - та n - типами провідності) у 1-му та 2-му вибраному кристалографічному напрямках (рис. 2), при цьому контакт між всіма шарами є омічним [4].

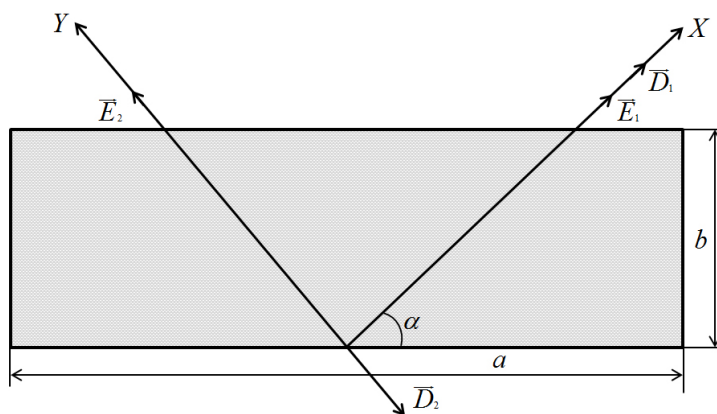


Рис. 2. Орієнтація кристалографічних осей OX, OY та OZ анізотропної електропровідної пластини та розташування векторів електричних полів \vec{E}_1 , \vec{E}_2 , та індукції \vec{D}_1 , \vec{D}_2

Тензор електропровідності такого монокристалічного або штучного анізотропного середовища має наступний вигляд.

$$\hat{\sigma} = \sigma_0 \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sigma_n & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_p & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_n \end{vmatrix} \tag{3}$$

Створення з такого матеріалу прямокутної пластини розмірами $a \times b \times c$ ($a \approx c \gg b$) головні кристалографічні осі OX та OY якої розміщені в площині її бічної грані $a \times b$, а одна з цих осей розташована під деяким кутом α до ребра a ($0 < \alpha < 90^\circ$) (рис. 2), дозволяє представити тензор $\hat{\sigma}$ наступним чином [5]:

$$\hat{\sigma} = \sigma_0 \begin{vmatrix} \sigma_{11} \cos^2 \alpha - \sigma_{22} \sin^2 \alpha & (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \sin \alpha \cos \alpha & 0 \\ (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \sin \alpha \cos \alpha & \sigma_{11} \sin^2 \alpha - \sigma_{22} \cos^2 \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad (4)$$

що характеризується наявністю як поздовжньої (σ_{\parallel}) так і поперечної (σ_{\perp}) складових

$$\sigma_{\parallel} = \sigma_0 (\sigma_{11} \cos^2 \alpha - \sigma_{22} \sin^2 \alpha), \quad (5)$$

$$\sigma_{\perp} = \sigma_0 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \sin \alpha \cos \alpha. \quad (6)$$

При цьому коефіцієнт перетворення m_1 пристрою, в основі якого знаходиться вищезгадана прямокутна пластинка, має такий вигляд

$$m_1 = \frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\parallel}} = \frac{(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \sin \alpha \cos \alpha}{\sigma_{11} \cos^2 \alpha - \sigma_{22} \sin^2 \alpha} \quad (7)$$

Проведені чисельні оцінки показують, що при $a \approx c \gg b$ крайовими умовами на торцевих $b \times c$ і на бічних $a \times b$ гранях можна знехтувати [2].

Дослідження функції

$$m_1(K, \alpha) = \frac{(K + 1) \operatorname{tg} \alpha}{K - \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (8)$$

на екстремум ($\partial m / \partial \alpha = 0, \partial^2 m / \partial \alpha^2 < 0$) демонструє, що точки екстремуму функції відсутні.

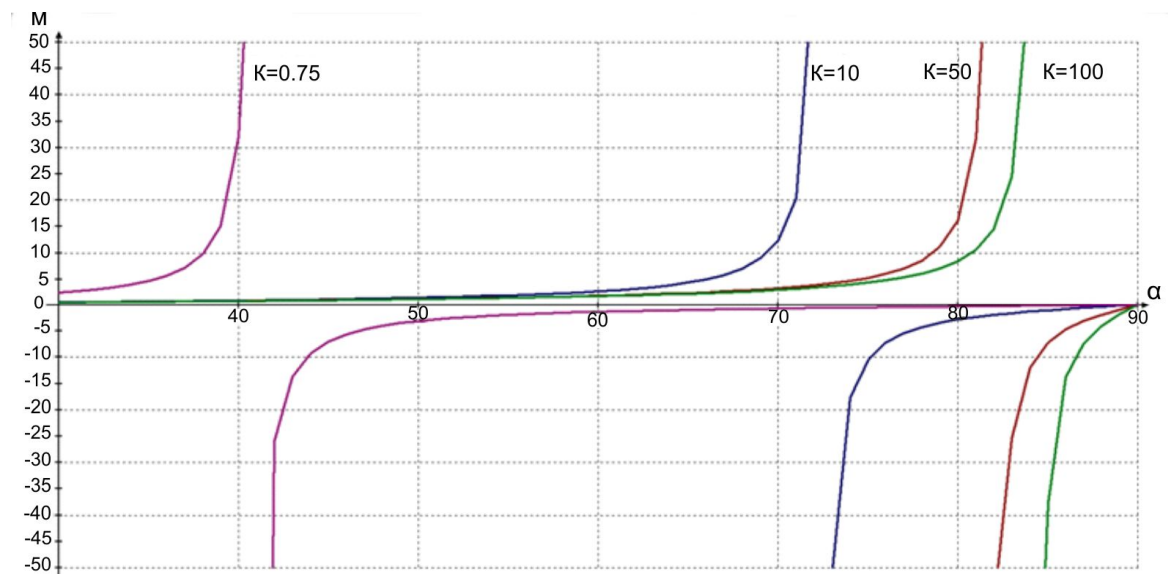


Рис. 3. Залежність коефіцієнта перетворення m від кута α при фіксованих коефіцієнтах анізотропії електропровідного матеріалу $K=0,75; 10; 50; 100$.

Це дає змогу варіювати величину коефіцієнта m цього пристрою в широких межах шляхом підбору відповідного кута α . Таку можливість продемонстровано на рис. 3. для чотирьох анізотропних електропровідних біполярних матеріалів з коефіцієнтами анізотропії 0.75, 10, 50 і 100. З цього графіка випливає, що завжди існує можливість підбору кута α для заданого m з необхідною величиною і знаком.

У разі кута $\alpha = 45^\circ$ вираз (7) набуває наступного вигляду

$$m = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}} = \frac{K + 1}{K - 1} \quad (9)$$

Аналіз цих функцій показує, що значення коефіцієнта $|m| > 1$ це дає можливість зробити висновок про енергетичну взаємодію між об'ємом анізотропної пластини 1 із зовнішнім середовищем. Таким чином, використання анізотропного електропровідного біполярного матеріалу веде до значно вищої величини коефіцієнта перетворення m ніж у випадку уніполярних анізотропних електропровідних матеріалів (рис. 4.).

Пояснення цього явища можна представити з використанням уявлень вихрової електродинаміки. Якщо через пластину пропустити зовнішній електричний струм синусоїдальної форми то в її об'ємі виникають вихори електричного струму, які характеризуються турбулентною течією. [6, 7] У нашому випадку, аналогічно [8, 9] зміна характеру вихору з ламінарною течією на турбулентну обумовлена переорієнтацією напрямків відповідних складових векторів електричного струму та поля. У цьому випадку поздовжня складова вектора електричного струму та поля розташовується антипаралельно кристалографічному напрямку другої вибраної кристалографічної вісі. Напрямок електричного струму у цьому випадку розташовується антипаралельно напрямку електричного поля.

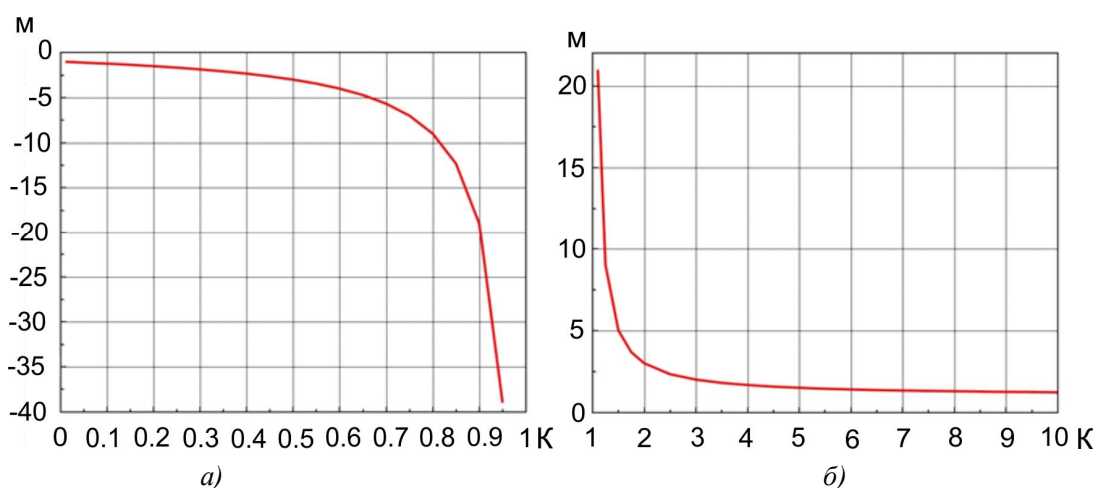


Рис. 4. Залежність коефіцієнта перетворення m від величини анізотропії до електропровідного матеріалу при $\alpha=45^\circ$ а) Залежність коефіцієнта перетворення m від величини анізотропії при $0 < K < 1$ та куті $\alpha=45^\circ$; б) Залежність коефіцієнта перетворення m від величини анізотропії при $1 < K < \infty$ та куті $\alpha=45^\circ$.

Протікання вхідного електричного струму через торцеві контакти J_{on} викликає появу електричного струму J_{out} на вихідних контактах.

У цьому випадку вихор електричного струму згідно з [10, 11] представляється наступним чином:

$$\operatorname{rot} j = -\omega \quad \text{для} \quad 0 < K < 1, \quad (10)$$

$$\operatorname{rot} j = \omega \quad \text{для} \quad 1 < K < \infty \quad (11)$$

де $\omega = F(\sigma_{11}, \sigma_{22}, a, b, c, \alpha)$ – кругова частота обертання електричного вихору, знаки «+» та «-» – позначають напрямок його обертання.

Такі електричні вихори є ефективним механізмом, що перекачує енергію між зовнішнім середовищем і, в нашому випадку, об'ємом анізотропної електропровідної чергуючої біполярної пластини.

Представлений механізм енергетичної взаємодії є перспективним для сучасної науки та техніки.

Про можливості застосування запропонованого методу перетворення енергії:

У загальному випадку вибір конкретної конструкції анізотропного пристрою визначається як призначенням і функціональними особливостями, так і умовами його експлуатації.

У всіх можливих конструкціях такого пристрою основою є прямокутна пластинка 1 з анізотропного матеріалу, який у вибраних кристалографічних осях Ox та Oy характеризується p - та n - типами електропровідності відповідно. При застосуванні штучного анізотропного електропровідного матеріалу він являтиме собою шарувату структуру, що чергується, на основі шарів електропровідного матеріалу 1 товщини τ_1 та електропровідного матеріалу 2 товщини τ_2 . Методика розрахунку цієї структури та її оптимізації аналогічна до методики, наведеної у [12].

Підбираючи відповідне значення коефіцієнта анізотропії шарів 1 та 2 цієї пластини, а також її геометричні розміри, дає можливість створення необхідних пристроїв та приладів з відповідними параметрами. Розглянемо конструкції конкретних пристроїв на основі вищенаведених анізотропних пластин.

Анізотропний електроомічний генератор (АЕГ)

У цьому випадку перетворювач – АЕГ в основі якого лежить прямокутна анізотропна пластинка яка характеризується додатнім значенням коефіцієнта перетворення m ($1 < K < \infty$) та орієнтацією кристалографічної осі 1 під деяким обраним кутом α .

Схематична конструкція такого генератора представлена на рис. 5, яка складається: з пластини 1; шарів 2 – електроізоляційний шар та 3 – електропровідний шар; вхідних електровиводів 4, 5 які підключено до зовнішнього джерела електроенергії створюваної генератором, що задає; вихідних електровиводів 6, 7, до яких підключено зовнішнє навантаження, опором Z .

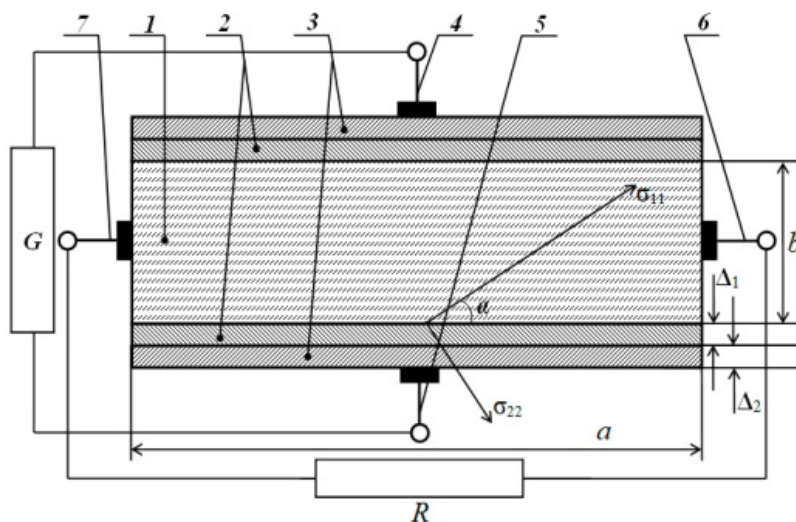


Рис. 5. Схематичне зображення конструкції АЕГ 1 – Пластина з анізотропного електропровідного матеріалу; 2 – електроізоляційні шари; 3 – електропровідні шари; 4, 5 – входні; 6, 7 – вихідні електровиводи.

При подачі деякої потужності $P(t) = P_0 \sin(\omega_1 t)$ від задаючого генератора на вхід АЕГ, в об'ємі пластини 1 виникають електричні вихори з турбулентною течією, які далі взаємодіють із зовнішнім середовищем. Це веде до виникнення енергетичного потоку спрямованих із цього середовища в об'єм пластини, яка перетворюється у електричну. Це призводить до появи на вихідних електровиводах 6, 7 деякої електричної потужності, P_{out} , яка представляється в наступному вигляді:

$$P_{out} = P_0 \sin(\omega_1 t_0) \frac{(K + 1) \cdot \operatorname{tg} \alpha}{K - \operatorname{tg}^2 \alpha}, \quad (12)$$

таким чином, правостороннє обертання електричних вихорів з турбулентною течією зумовлює можливість роботи пластини у режимі генерації електричної енергії. При цьому ω_1 – частота електричного вихору, яка визначається задаючим генератором.

Коефіцієнт корисної дії η_1 у цьому випадку визначається так:

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + P_1/P_2}, \quad (13)$$

де P_1/P_2 – потужності що виділяються в об'ємі, як пластини так і зовнішні навантаження опором Z відповідно.

Максимальне значення електричної потужності P_{max} , яку може генерувати АЕГ, визначається наступним виразом:

$$P_{max} = (s \cdot M \cdot \Delta T) / (P_1/P_2), \quad (14)$$

де $M = a \cdot b \cdot c \cdot d$ – маса пластини; d – щільність її матеріалу; s – питома теплоємність матеріалу; T_0 – температура довкілля; T_{max} – гранична робоча температура матеріалу, пластини 1.

Чисельні оцінки, які було проведено, показують, що величина ККД запропонованого пристрою знаходиться в межах $0.5 \div 0.99$

Слід зазначити, що при певних умовах АЕГ, що розглядається, також може активно функціонувати в режимі генерації теплової потужності.

Анізотропний електроомічний нагрівач (АЕН)

Особливістю такого нагрівача у порівняння із генератором є підвищені значення внутрішнього опору пластини. Схематична конструкція такого АЕН (рис. 6) аналогічна конструкції вищезгаданого АЕГ з тією різницею, що опір $R = 0$

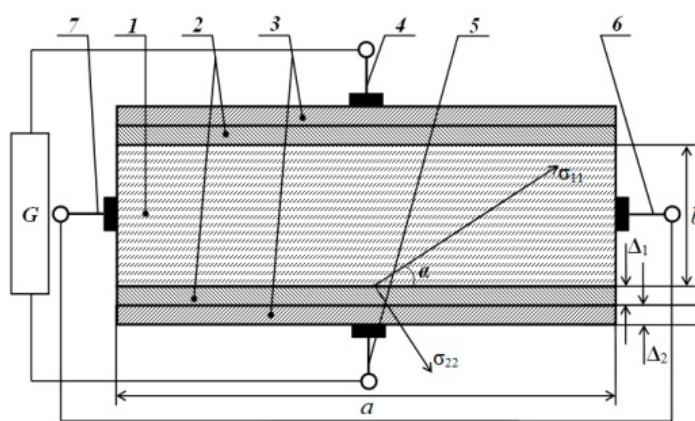


Рис. 6. Схематичне зображення конструкції АЕН 1 – Пластина з анізотропного електропровідного матеріалу; 2 – електроізоляційні шари; 3 – електропровідні шари; 4, 5 – вхідні; 6, 7 – вихідні електровиводи.

Анізотропний електроомічний охолоджувач (АЕО)

На відміну від конструкції АЕГ та АЕН конструкція АЕО складається з анізотропної прямокутної пластини 1 та електровиводів 4, 5 (рис. 7). Анізотропія електропровідності матеріалів пластини 1 вибирається з коефіцієнтом $0 < K < 1$.

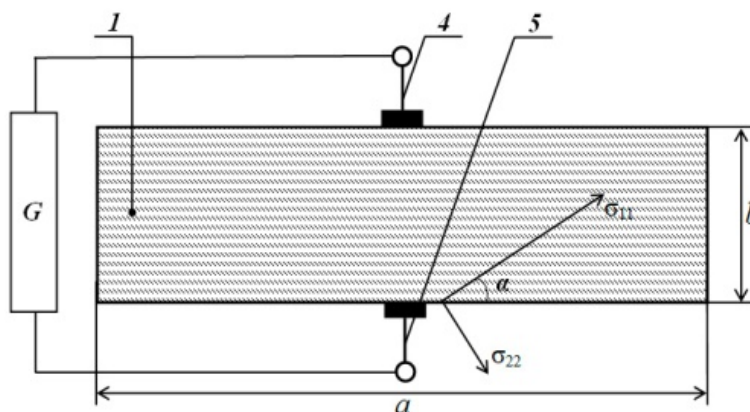


Рис. 7. Схематичне зображення конструкції АЕО 1 – Пластина з анізотропного електропровідного матеріалу; 4, 5 – вхідні; 6, 7 – вихідні електровиводи.

У цьому випадку прикладання до контактів 4, 5 потужності генератора веде до виникнення в її об'ємі турбулентних вихорів електричного струму з лівостороннім обертанням. Це призводить до зменшення внутрішньої енергії анізотропної пластини, що в кінцевому рахунку веде до відповідного зниження температури T пластини.

При додатному напівперіоді потужності, що подається на вхід такого пристрою частина його внутрішньої енергії поглинається зовнішнім середовищем через одну з бічних граней ($a \times b$), при від'ємному напівперіоді – через протилежну бічну грань ($a \times b$).

У цьому випадку холодопродуктивність Q визначається таким чином [13]:

$$Q = W_{\text{out}} \frac{(K + 1) \cdot \text{tg} \alpha}{K - \text{tg}^2 \alpha}, \quad (15)$$

а різниця температур ΔT між навколишнім середовищем та анізотропним пристроєм, що досягається при адіабатичній ізоляції граней пластини,

$$\Delta T = (Q - q_{\text{los}}) / (s \cdot M), \quad (16)$$

де q_{los} – втрати, зумовлені охолодженням електропровідних та металевих шарів на верхній та нижній гранях перетворювача, s – теплоємність, M – його маса.

Коефіцієнт корисної дії ϑ аналізованого процесу охолодження представляється класичним виразом:

$$\vartheta = (T_1 - T_2) / T_1$$

де T_1 – температура оточуючого середовища, T_2 – температура анізотропної пластини яка досягається при охолодженні

Слід відмітити, що в якості матеріалів для пластини можливе застосування як напівпровідників з вузькою шириною забороненої зони напівпровідників p - та n - провідності, напівметалів та металів також відповідної провідності.

Результати проведених досліджень показують перспективність використання даного пристрою, як високоефективних холодильних елементів. Даний метод дозволяє здійснювати ефективну утилізацію та акумуляцію теплової енергії, що виділяється, як конкретних об'єктів, різних приладів і пристроїв, перекачуючи її в зовнішнє середовище.

Висновки

Вперше запропоновано оригінальну фізичну модель енергетичної взаємодії між вихровим електричним полем пластини з анізотропного електропровідного матеріалу, що характеризується різними типами провідності у вибраних кристолографічних осях та зовнішнім середовищем. Аналіз цієї моделі показує, що в інтервалі $0 < K < 1$ величина коефіцієнта перетворення m

характеризується від'ємним значенням, а в інтервалі $1 < K < \infty$ – додатнім. У першому випадку спостерігається ефект охолодження у другому – режим генерації електроенергії та виділення тепла.

Використання монокристалічних та штучно-анізотропних електропровідних матеріалів з різним типами провідності у вибраних кристалографічних осях дає можливість отримати значеннями модуль $m > 1$, яке зумовлене дією вихорів електричного поля з турбулентною течією в об'ємі анізотропної пластини.

Визначено перспективні галузі практичного застосування таких пристроїв у вигляді генераторів електрики, тепла та холоду, отримано розрахункові вирази для їх коефіцієнта корисної дії, що знаходиться в інтервалі $\eta = 0.5 \div 0.98$, а температура охолодження даного пристрою при застосуванні відповідних матеріалів з необхідною температурною залежністю їх кінетичних коефіцієнтів може досягати температури рідкого гелію.

Запропонована модель сприятиме появі нових науково-технічних напрямків в галузі електрики та усіх напрямках, які пов'язані із нею.

Література

1. Ashcheulov A., Derevianchuk M., Lavreniuk D. (2020). The Phenomenon of Electroohmic Transformation. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(4), 743-748. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.743-748>
2. Самойлович А.Г. Термоэлектрические и термомагнитные методы преобразования энергии / А.Г. Самойлович. – Черновцы : Рута, 2006. – 226 с.
3. Ащеулов А.А., Деревянчук Н.Я., Лавренюк Д.А., Романюк И.С. Трансформация электрического тока анизотропной электропроводной средой / Ащеулов А.А., Деревянчук Н.Я., Лавренюк Д.А., Романюк И.С // ТКЭА. – 2020. – № 5-6, с. 28-32. – Режим доступа: DOI: 10.15222/ТКЭА2020.5-6.28
4. Ащеулов А.А. Термоэлектричні модулі Пельтье на основі кристалів твердих розчинів Bi-Te-Se-Sb / Ащеулов А.А., Горобець М.В., Добровольский Ю.Г., Романюк И.С. –Чернівці: Прут, 2011. -168с.
5. J.F. Nye, *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices* (Oxford University Press, 1985)
6. Козлов В.В. Общая теория вихрей. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. 319 с.
7. Davidson L. *An introduction to turbulence models*. – Göteborg: Charmles Un-ty of Technology, 2003. – 48 p.
8. Хлопков Ю.И., Жаров В.А., Горелов С.Л. Лекции по теоретическим методам исследования турбулентности. – М.: Изд-во МФТИ, 2005. – 197 с.
9. Елизарова Т.Г., Широков И.А. Ламинарный и турбулентный режимы распада вихря Тейлора–Грина // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. No 63. 16 с. URL:

<http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-63>

10. Боев А.Г. Электромагнитная теория смерча. Электродинамика вихря. / А.Г. Боев // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009 – Т.14, №2, С. 121–149.
11. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия. [Т.1-Т.5 Справочное издание] / А.М. Прохоров – Москва: Советская энциклопедия, 1988-1998, –704 с., 704 с. , 672 с., 704с., 760 с.
12. Patent UA. №147993. Anisotropic electrically conductive material. А.А. Ascheulov, М.Ya. Derevianchuk, D.O. Lavrenyuk. Bull. №25/2021 dated 23.06.2021
13. Процес термостатичного охолодження : пат. Україна : А.А. Ащеулов – № у 2021 03958; заявл. 07.07.2021
14. Энергия и физический вакуум / А.Н. Власов [и другие], – Волгоград: Станица-2, 2004. – 192 с.

Надійшли до редакції: 15.07.2021

Ащеулов А.А. док. техн. наук, профессор

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: ashcheulovaa@rambler.ru

О ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЯХ В АНИЗОТРОПНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ СРЕДАХ

Проведено исследование особенностей преобразования электрического тока анизотропной электропроводной средой, характеризующейся разными типами проводимости (р- и n-типы) в выбранных кристаллографических направлениях в условиях омического контакта. Установлено, что в случае протекания внешнего электрического тока синусоидальной формы через устройство, в основе которого имеется прямоугольная пластина из вышеупомянутого анизотропного материала, в ее объеме возникают вихри электрического тока. На основе анализа функции $m(K, \alpha)$ (случай), определяющий коэффициент преобразования устройства, сделан вывод об энергетическом взаимодействии между объемом анизотропной пластины и внешней средой. Проведенные исследования показали, что использование анизотропного электропроводного биполярного материала приводит к значительно более высокой ($m > 1$) или более низкой ($m < -1$) величине коэффициента преобразования m , чем в случае униполярных анизотропных электропроводных материалов. К феномену электроомического превращения ведет появление вихрей электрического поля, характеризующихся турбулентным течением, представляемым выражением $\text{rot } \vec{j} = \underline{1} \omega$

где ω – круговая частота вращения вихря, а знаки «+» и «-» – обозначают направление его вращения и определяются величиной коэффициента анизотропии $K=\sigma_{11}/\sigma_{22}$. Такие электрические вихри с турбулентным характером течения являются эффективным механизмом, перекачивающим энергию между внешней средой и в нашем случае, анизотропной пластиной устройства. Следует отметить, что в редких случаях наблюдается аномальное значение упомянутого коэффициента. Применение рассматриваемого метода преобразования электрического тока с помощью предложенных устройств, в основе работы которых пластина изготовлена из анизотропного электропроводящего материала, значительно расширяет области альтернативной электроэнергетики и другие, связанных с ней области науки и техники. Библ. 14, рис.7.

Ключевые слова: анизотропная среда; электропроводность; превращение; электрический ток; коэффициент полезного действия; нагрев; охлаждение; генерация.

Ashcheulov A.A., D.Sc (Tech), Prof.

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str, Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: ashcheulovaa@rambler.ru

ON ENERGY OPPORTUNITIES IN ANISOTROPIC BIPOLAR ELECTRICALLY CONDUCTIVE MEDIA

A study was made of the features of electric current transformation by an anisotropic electrically conductive medium characterized by different types of conductivity (p- and n-types) in selected crystallographic directions under ohmic contact conditions. It has been established that in the case of an external sinusoidal electric current flowing through a device based on a rectangular plate of the above mentioned anisotropic material, electric current vortices occur in its bulk. Based on the analysis of the function $m(K, \alpha)$ (case $|m| > 1$), which determines the transformation coefficient of the device, a conclusion is made about the energy interaction between the bulk of the anisotropic plate and the external medium.. Studies have shown that the use of anisotropic electrically conductive bipolar material leads to a significant higher ($m > 1$) or lower ($m < -1$) value of the transformation coefficient m than in the case of unipolar anisotropic electrically conductive materials. The phenomenon of electroohmic transformation is caused by the appearance of electric field vortices which are characterized by turbulent flow represented by the expression $\text{rot } \vec{j} = \pm \omega$, where ω is a circular frequency of vortex rotation, and signs «+» and «-» denote the direction of its rotation and are determined by the value of the anisotropy coefficient $K=\sigma_{11}/\sigma_{22}$. Such electric vortices with a turbulent flow are an efficient mechanism of pumping energy between the external medium and, in our case, the anisotropic plate of the device. It should be noted that in some cases

there is an anomalous value of the abovementioned coefficient. The application of the considered method of electric current transformation with the help of the proposed devices, which are based on a plate made of anisotropic electrically conductive material, significantly expands the field of alternative electricity and other related fields of science and technology. Bibl. 14, Fig. 7.

Key words: anisotropic medium; electrical conductivity; transformation; electric current; efficiency; heating; cooling; generation.

References

1. Ashcheulov A., Derevianchuk M., Lavreniuk D. (2020). The phenomenon of electroohmic transformation. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(4), 743-748. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.743-748>
2. Samoilovich A.G. (2006). *Termoelektricheskiie i termomagnitnyie metody preobrasovaniia energii [Thermoelectric and thermomagnetic methods of energy conversion]*. Chernivtsi:Ruta [in Russian].
3. Ashcheulov A.A., Derevianchuk N.Ya., Lavreniuk D.A., Romaniuk I.S. (2020). Transformatsiia elektricheskogo toka anizotropnoi elektroprovodnoi sredoi [Electric current transformation by anisotropic electroconductive medium]. *TKEA*, 5-6, 28-32. – Retrieved from: DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.28
4. Ashcheulov A.A., Horobets M.V., Dobrovolskyi Yu.H., Romaniuk I.S. (2011). *Termoelektrychni moduli Peltier na osnovi krystaliv tverdykh rozchyniv Bi-Te-Se-Sb [Thermoelectric Peltier modules based on Bi-Te-Se-Sb solid solution crystals]*. Chernivtsi: Prut [in Ukrainian].
5. Nye J.F. (1985). *Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices* (Oxford University Press).
6. Kozlov V.V. (2013). *Obshchaia teoriia vikhrei [General theory of vortices]*. 2nd ed. revised and enlarged. Moscow: Izhevsk, Institute of Computer Research [in Russian].
7. Davidson L. (2003). *An introduction to turbulence models*. – Göteborg: Charmles Un-ty of Technology.
8. Khlopkov Yu.I., Zharov V.A., Gorelov S.L. (2005). *Lektsii po teoreticheskim metodam issledovaniia turbulentnosti [Lectures on the theoretical methods of turbulence study]*. Moscow: FFTI Publ [in Russian]. .
9. Yelizarova T.G., Shirokov I.A. (2013). Laminarnyi i turbulentnyi rezhimy raspada Taylor-Green vikhria [Laminar and turbulent modes of the Taylor-Green vortex decay]. *Preprints of the Keldysh IPM*, No 63. 16 c. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-63> [in Russian].
10. Boev A.G. (2009). *Electromagnetic theory of tornado. Electrodynamics of vortex. Radiophysics and Radioastronomy*, 14 (2), 121–149.
11. Prokhorov A.M. (1988-1998). *Fizicheskaiia entsiklopediia. T.1-T.5. Spravochnoie izdaniie [Physics encyclopedia. Vol.1-Vol. 5 Reference edition]*. Moscow: Soviet encyclopedia, 1988-1998 [in Russian].
12. *Patent UA. №147993*. A.A. Ascheulov, M.Ya. Derevianchuk, D.O. Lavrenyuk Anisotropic

electrically conductive material. Bull. №25/2021 dated 23.06.2021[in Ukrainian].

13. *Patent UA № u 2021 03958*. A.A.Ashcheulov. Thermostatic cooling process [in Ukrainian].
14. Vlasov A.N., et al. (20045). *Energiia i fizicheskii vakuum [Energy and physical vacuum]*. Volgograd: Stanitsa-2 [in Russian].

Submitted: 15.07.2021

УДК 537.32

Анатичук Л.І. акад. НАН України^{1,2},

Вихор Л.М. док. фіз.-мат. наук¹



Анатичук Л.І.

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

e-mail: anatyuch@gmail.com

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



Вихор Л.М.

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ОПОРІВ КОНТАКТІВ І КОМУТАЦІЙ НА ХОЛОДИЛЬНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

В роботі описаний метод розрахунку максимального холодильного коефіцієнта для реальної моделі термоелектричного модуля, яка враховує вплив електричного опору контактів та комутацій і теплового опору комутаційних та ізоляційних пластин. Розраховані залежності максимального холодильного коефіцієнта модуля від висоти його віток і перепаду температур. Проведено порівняльний аналіз холодильного коефіцієнта реальної моделі модуля з його "ідеальним" значенням, яке не враховує вплив електричних і теплових опорів контактів, комутаційних та ізоляційних пластин. Бібл. 35, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: термоелектричний охолодний модуль, холодильний коефіцієнт, електричний контактний опір, тепловий опір комутаційної та ізоляційної пластин.

Вступ

Технологія термоелектричного охолодження вже понад 50 років широко застосовується в різних сферах життєдіяльності людини завдяки своїм основним перевагам, таким як відсутність шкідливих холодоагентів, безшумність роботи, можливість функціонувати за довільної орієнтації в просторі, здатність з високою точністю підтримувати задані температурні режими, великий ресурс роботи та ін. Термоелектричні пристрої використовуються для охолодження, керування тепловими режимами та стабілізації температури елементів і систем електроніки та оптоелектроніки, таких як фотоприймачі, сенсори ІЧ випромінювання [1], ПЗЗ-матриці, лазерні діоди, інтегральні чипи, мікропроцесори [2 – 10], світлодіоди [11, 12]. Термоелектричний спосіб охолодження застосовується в біологічному та медичному обладнанні: в кріодеструкторах, стимуляторах холод-тепло, міні термостатах для ліків, в біокалориметрах, спектрометрах і

біоаналізаторах [13–18]. Різноманітною є побутова техніка з термоелектричними модулями охолодження, це побутові кондиціонери [19–21], портативні побутові холодильники, мінібари для напоїв, сумки-холодильники для пікніків [22–25]. Термоелектричні охолоджувачі (ТЕО) використовуються в автомобільній і транспортній індустрії для охолодження-нагріву сидінь [26, 27], в кондиціонерах для транспортних засобів [28].

Загальновідомо, що основним недоліком термоелектричних охолоджувачів є низький холодильний коефіцієнт порівняно з механічними способами охолодження. Підвищення холодильного коефіцієнту є актуальним завданням [29, 30]. Холодильний коефіцієнт термоелектричного модуля як основного елемента охолоджувача залежить від добротності матеріалів віток термоелементів та від електричного і теплового опорів контактів, комутаційних та ізоляційних пластин модуля. Ці опори призводять до електричних та теплових втрат ефективності термоелектричного перетворення енергії [31, 32]. Збільшення добротності матеріалів сприяє підвищенню холодильного коефіцієнта. Але з 50-х років минулого століття модулі охолодження виготовляють з матеріалів на основі Bi_2Te_3 , безрозмірна добротність яких залишається на рівні 1–1.2 [30]. Пошук нових матеріалів з підвищеною добротністю поки що не дає відчутних позитивних результатів. Електричні і теплові втрати в модулях зменшують холодильний коефіцієнт і є однією з основних причин того факту, що в термоелектричних охолоджувачах властивості матеріалів не реалізуються в повній мірі.

В роботах [31, 32] описані наближені аналітичні методи розрахунку холодильного коефіцієнта, які враховують електричні і теплові опори контактів, комутаційних та ізоляційних пластин в модулі. Показано, що величина холодильного коефіцієнта зменшується, якщо зменшувати висоту віток термоелементів.

Мета цієї роботи полягає в тому, щоб теоретичними методами встановити вплив спільної дії контактного опору, електричного опору комутації, теплового опору комутаційних та ізоляційних пластин на величину максимального холодильного коефіцієнта модуля і визначити, який з опорів більш суттєво впливає на холодильний коефіцієнт за умов зменшення висоти віток термоелементів.

Метод розрахунку максимального холодильного коефіцієнта

Модель термоелектричного модуля наведена на рис. 1.

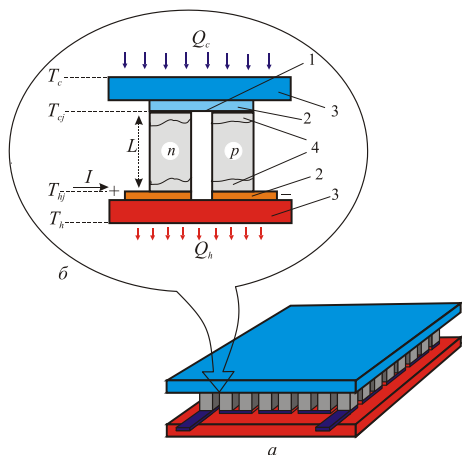


Рис. 1. Модель модуля охолодження (а) і термоелемента (б). 1 – теплопоглинаючий спай термоелемента, 2 – комутаційна пластина, 3 – ізоляційна пластина, 4 – зона контакту.

Модуль містить ряд термоелементів з напівпровідникових віток n - та p -типів провідності. Зазвичай вітки з'єднані в послідовне електричне коло металевими комутаційними пластинами і монтується між двома ізоляційними пластинами паралельно по відношенню до теплового потоку. Якщо пропускати електричний струм I вказаної на рис. 1б полярності, то на спаях термоелементів 1 тепло поглинається, а на протилежних спаях – виділяється. Якщо тепловиділяючу поверхню модуля підтримувати за температури T_h близької до температури оточуючого середовища, то теплопоглинаюча поверхня буде охолоджуватися до деякої температури T_c .

Енергетична ефективність модуля визначається холодильним коефіцієнтом

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W}, \quad (1)$$

де $W = Q_h - Q_c$ – споживана потужність, Q_c – холодопродуктивність, Q_h – теплопродуктивність кожного термоелемента в модулі.

Для розрахунку і оптимізації холодильного коефіцієнта використані наступні наближення:

1. В стаціонарному стані розподіл температури в вітках термоелементів є одновимірним, тобто $T = T(x)$, де x – координата, направлена вздовж висоти вітки.
2. Коефіцієнти термоЕРС $\alpha_{n,p}$, питомого опору $\rho_{n,p}$ і теплопровідності $\kappa_{n,p}$ матеріалів віток n - і p -типів провідності є незалежними від температури.
3. Враховується вплив електричного контактного опору r_c , електричного опору r_{com} комутації та теплового опору R_t комутаційної та ізоляційної пластин.

За таких наближень холодопродуктивність Q_c і теплопродуктивність Q_h визначаються із системи рівнянь теплового балансу для термоелемента, яка має вигляд

$$Q_c = \frac{1}{R_t}(T_c - T_{cj}), \quad (2)$$

$$Q_c = \alpha I T_{cj} - \left(\frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} + \frac{2r_c}{s} + r_{com} \right) I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_{hj} - T_{cj}), \quad (3)$$

$$Q_h = \alpha I T_{hj} + \left(\frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} + \frac{2r_c}{s} + r_{com} \right) I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_{hj} - T_{cj}), \quad (4)$$

$$Q_h = \frac{1}{R_t}(T_{hj} - T_h), \quad (5)$$

де $\alpha = |\alpha_n| + \alpha_p$, $\rho = \rho_n + \rho_p$, $\kappa = \kappa_n + \kappa_p$, L – висота вітки, s – площа поперечного перерізу вітки, T_{cj} і T_{hj} – температури теплопоглинального і тепловиділяючого спаяв термоелемента. Опір комутаційної пластини обчислюється за формулою $r_{com} = \frac{\rho_{com}}{l_{com} \sqrt{s}} \left(\frac{2}{3} \sqrt{s} + a \right)$ [33], а тепловий опір комутаційної та

ізоляційної пластин визначається наступним чином: $R_t = \frac{l_{com}}{\kappa_{com} s_{com}} + \frac{l_{ins}}{\kappa_{ins} s_{ins}}$, де ρ_{com} – питомий опір комутаційної пластини, κ_{com} , κ_{ins} – теплопровідність комутаційної та ізоляційної пластин відповідно, l_{com} , l_{ins} – їх висота, $s_{com} = (2\sqrt{s} + a)\sqrt{s}$ – площа комутаційної пластини, $s_{ins} = 2(\sqrt{s} + a)^2$ – площа ізоляційної пластини, a – віддаль між термоелектричними вітками.

З рівнянь (2), (5) знаходяться температури T_{cj} , T_{hj} і підставляються в рівняння (3), (4), розв'язком яких є наступні вирази для Q_c , Q_h :

$$Q_c = \frac{Q_{c0} - \kappa \frac{s}{L} R_t Q_{ho}}{F_2}, \quad (6)$$

$$Q_h = \frac{Q_{h0} - Q_c \kappa \frac{s}{L} R_t}{F_1}, \quad (7)$$

де $F_1 = 1 - (\alpha I - \kappa \frac{s}{L}) R_t$, $F_2 = 1 + 2\kappa \frac{s}{L} R_t - (\alpha I R_t)^2$,

$$Q_{c0} = \alpha I T_c - \left(\frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} + \frac{2r_c}{s} + r_{com} \right) I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_h - T_c), \quad (8)$$

$$Q_{h0} = \alpha I T_h + \left(\frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} + \frac{2r_c}{s} + r_{com} \right) I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_h - T_c). \quad (9)$$

Холодопродуктивність Q_c і теплопродуктивність Q_h залежать від величини струму I у вітках термоелемента. Комп'ютерними методами обраховується оптимальна величина струму I_{opt} , за якої досягається максимальне значення холодильного коефіцієнта, що визначається за формулою (1).

Зауважимо, що для ідеальної моделі модуля, в якій впливом електричного і теплового опорів контактів, комутаційних та ізоляційних пластин нехтується, тобто $r_c \rightarrow 0$, $r_{com} \rightarrow 0$, $R_t \rightarrow 0$, формули (6), (7) для Q_c , Q_h набувають класичного вигляду [33]

$$Q_c = \alpha I T_c - \frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_h - T_c),$$

$$Q_h = \alpha I T_h + \frac{1}{2} \rho \frac{L}{s} I^2 - \kappa \frac{s}{L} (T_h - T_c),$$

що уможливує обчислення максимального холодильного коефіцієнта за класичною формулою [33]

$$\varepsilon_{\max} = \frac{M T_c - T_h}{\Delta T (M + 1)}, \quad (10)$$

$$\text{де } \Delta T = T_h - T_c, M = \sqrt{1 + 0.5Z(T_h + T_c)}, Z = \frac{\alpha^2}{\rho k}.$$

Результати розрахунку максимального холодильного коефіцієнта та їх аналіз

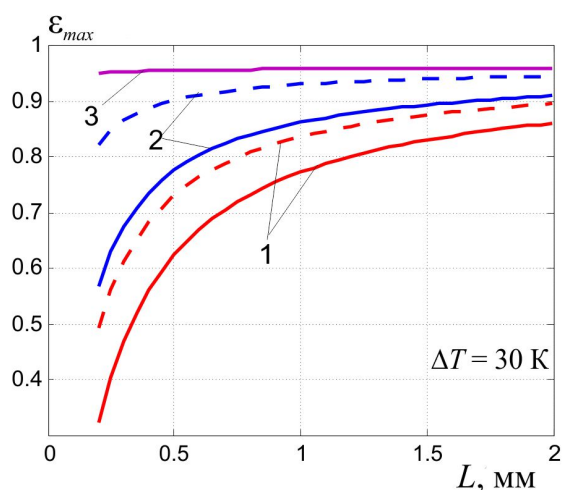
Для теоретичного дослідження впливу електричного та теплового опорів контактів, комутаційних та ізоляційних пластин на енергетичну ефективність термоелектричних охолоджувачів розраховувався максимальний холодильний коефіцієнт для модулів з матеріалів на основі Bi_2Te_3 . Термоелектричні параметри матеріалів віток n - і p -типів провідності вважалися однаковими. Розрахунки виконані для модулів з мідною комутацією віток та з ізоляційними пластинами з оксиду алюмінію Al_2O_3 і з нітриду алюмінію AlN , теплопровідність якого в 5 разів краща, ніж у Al_2O_3 . Для аналізу впливу електричного контактного опору r_c на максимальний холодильний коефіцієнт розрахунки проведені для двох значень r_c , а саме для величини $r_c = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см², яка вважається типовою для модулів масового виробництва [34], і для мінімальної величини $r_c = 10^{-7}$ Ом·см² контактного опору, зумовленого потенціальним бар'єром на границі між термоелектричним матеріалом і антидифузійним шаром нікелю [35]. Вихідні дані для розрахунку ϵ_{\max} наведені в табл. 1.

Таблиця 1

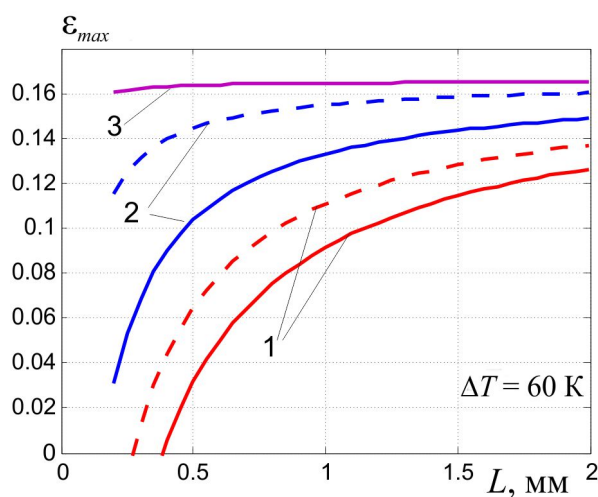
Значення величин, використані для розрахунку максимального холодильного коефіцієнта

Величина	Значення
Коефіцієнт термоЕРС α , мкВ/К	210
Питомий опір ρ , Ом·см	10^{-3}
Коефіцієнт теплопровідності k , Вт/см·К	0.015
Висота віток L , см	0.02 – 0.2
Переріз віток s , см ²	0.1×0.1
Віддаль між вітками a , см	0.05
Висота комутаційної пластини l_{com} , см	0.025
Висота ізоляційної пластини l_{ins} , см	0.063

Залежності ϵ_{\max} від висоти віток термоелементів, розраховані для перепадів температури на модулі 30 К і 60 К, показані на рис. 2.



а)



б)

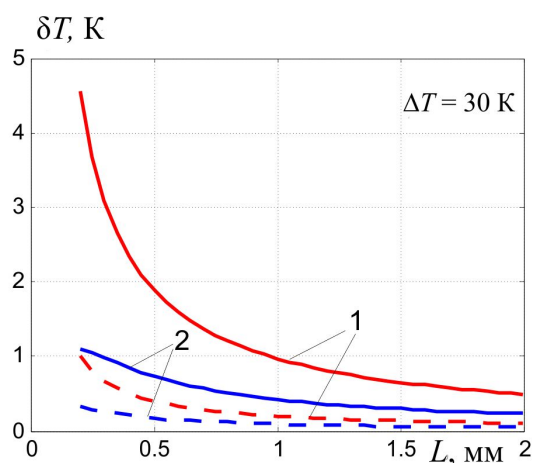
Рис. 2. Залежності максимального холодильного коефіцієнта ε_{max} від висоти віток L термоелемента. 1 і 2 – враховані електричний опір контактів і комутаційних пластин та тепловий опір комутаційних та ізоляційних пластин з Al_2O_3 (суцільні лінії), з AlN (пунктирні лінії). 1 - контактний опір $r_c = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см²; 2 – $r_c = 10^{-7}$ Ом·см²; 3 – тепловий опір не врахований, $r_c = 10^{-7}$ Ом·см². Перепад температури $\Delta T = 30$ К (а), $\Delta T = 60$ К (б), $T_h = 30$ °С.

Якщо контактний опір мінімальний, а теплові втрати, зумовлені тепловим опором комутаційних та ізоляційних пластин, не враховані, то холодильний коефіцієнт не залежить від висоти віток термоелемента (залежність 3 на рис. 2). Ці умови відповідають ідеальній моделі модуля охолодження, а максимальний холодильний коефіцієнт може бути обчислений за класичною формулою (10).

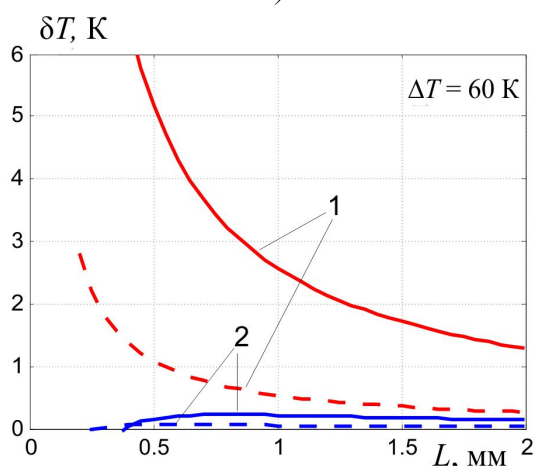
Зауважимо, результати розрахунків ε_{max} показали, що електричний опір комутаційних пластин практично не впливає на ε_{max} .

Вплив теплового опору комутаційних та ізоляційних пластин за умов як мінімального (залежності 2 на рис. 2), так і реального (залежності 1 на рис. 2) контактного опору зумовлює залежність ε_{\max} від висоти віток термоелементів. Зменшення висоти віток призводить до зменшення холодильного коефіцієнта, що особливо відчувається за умов мініатюризації термоелементів, коли висота віток менше 0.1 см.

Тепловий опір є причиною перепаду температури δT на комутаційних та ізоляційних пластинах (рис. 3), який для мініатюрних віток є тим більшим, чим менша їх висота. Очевидно, що $\delta T_h = T_{hj} - T_h$ на тепловідляючій ізоляційній пластині буде суттєво більшим ніж $\delta T_c = T_c - T_{ej}$ на теплопоглинаючій. Для модулів з висотою віток $L=0.05$ см та ізоляційними пластинами з Al_2O_3 δT_h досягає 5 градусів (рис. 3б) і відповідно підвищується температура тепловідляючих спаїв термоелементів, що призводить до зменшення холодильного коефіцієнта.



а)



б)

Рис.3. Залежності перепаду температури δT на комутаційних та ізоляційних пластинах з Al_2O_3 (суцільні лінії), з AlN (пунктирні лінії) від висоти віток термоелемента L .

1 – δT_h на тепловідляючій поверхні термоелементів в модулі, 2 – δT_c на теплопоглинаючій поверхні. Перепад температури на модулі $\Delta T = 30$ К (а), $\Delta T = 60$ К (б), $T_h = 30$ °С.

Зменшити втрати ефективності охолодження можна шляхом зменшення теплового опору ізоляційних пластин, якщо використовувати більш тонкі пластини з матеріалів більш високої теплопровідності, наприклад, з *AlN*. Для ізоляції з *AlN* при $L = 0.05$ см δT_h замість 5 К досягатиме величини менше 1 К (рис. 3).

Залежність ε_{\max} від різниці температур на модулі показана на рис. 4. Тут наведені результати розрахунку для модулів з висотою віток $L = 0.2$ см і для мініатюрних віток з $L = 0.02$ см. Якщо вітки високі, то ε_{\max} реальної моделі модуля (залежність 3, рис. 4), яка враховує електричні та теплові опори контактів, комутаційних та ізоляційних пластин, не суттєво відрізняється від ε_{\max} ідеальної моделі (залежність 4, рис. 4). Для мініатюрних віток ця різниця буде не суттєвою лише за умов мінімального контактного опору та використання ізоляційних пластин з високою теплопровідністю (залежність 2 для пластин з *AlN*, рис. 4). Інакше ε_{\max} реального мікромодуля буде в 2 – 5 разів менше, порівняно з ε_0 , розрахованим з використанням наближень ідеальної моделі. Такий висновок випливає з результатів розрахунку співвідношення $\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ холодильних коефіцієнтів ідеальної та реальної моделей, представлених в табл. 2.

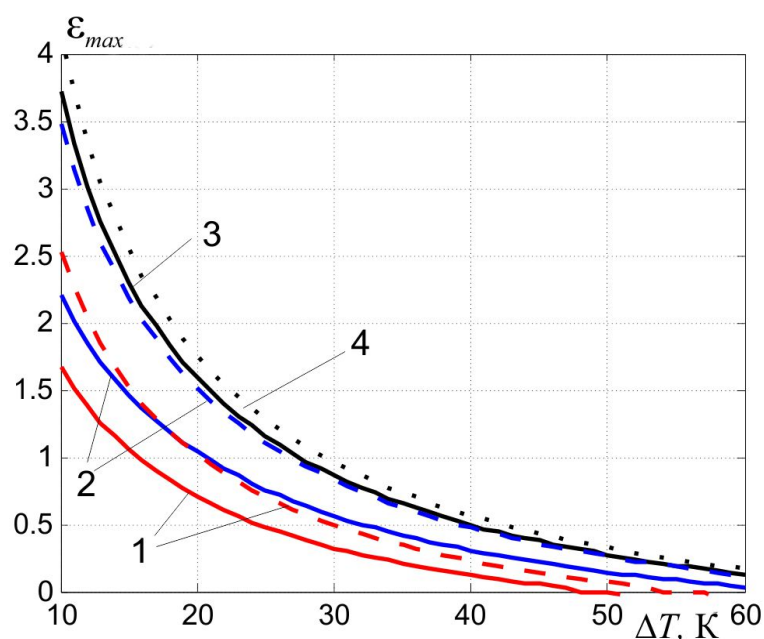


Рис. 4. Залежності максимального холодильного коефіцієнта ε_{\max} від перепаду температур ΔT , $T_h = 30$ °С. 1, 2, 3 – враховані теплові втрати в комутаційних та ізоляційних пластинах з Al_2O_3 (суцільні лінії), з *AlN* (пунктирні лінії).

1 – висота віток $L = 0.02$ см, контактний опір $r_c = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см²;

2 – $L = 0.02$ см, $r_c = 10^{-7}$ Ом·см²; 3 – $L = 0.2$ см, $r_c = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см²;

4 – теплові втрати не враховані, $L = 0.2$ см, $r_c = 10^{-7}$ Ом·см².

Таблиця 2

Залежність співвідношення $\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ від висоти віток термоелемента.

ε_{\max} - значення холодильного коефіцієнта за умов врахування електричних та теплових втрат в контактах з опором r_c і в мідних комутаційних та ізоляційних пластинах з Al_2O_3 , ε_0 - значення холодильного коефіцієнта для ідеальної моделі модуля, коли втрати не враховуються.

Висота віток L , см	$\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ враховані тільки електричні втрати в контактах $r_c=10^{-7}$ Ом·см ²	$\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ враховані електричні і теплові втрати $r_c=10^{-7}$ Ом·см ²	$\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ враховані тільки електричні втрати в контактах $r_c=5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см ²	$\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$ враховані електричні і теплові втрати $r_c=5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см ²
Перепад температур на модулі $\Delta T=10$ К, $\varepsilon_0=4.15$				
0.2	1.0	1.08	1.04	1.12
0.15	1.0	1.10	1.06	1.16
0.1	1.002	1.16	1.08	1.24
0.05	1.003	1.32	1.17	1.51
0.02	1.008	1.89	1.43	2.48
Перепад температур на модулі $\Delta T=30$ К, $\varepsilon_0=0.96$				
0.2	1.00	1.06	1.06	1.12
0.15	1.001	1.08	1.08	1.16
0.1	1.002	1.12	1.12	1.24
0.05	1.004	1.24	1.24	1.54
0.02	1.01	1.71	1.69	2.99
Перепад температур на модулі $\Delta T=60$ К, $\varepsilon_0=0.17$				
0.2	1.00	1.11	1.17	1.31
0.15	1.004	1.15	1.24	1.45
0.1	1.006	1.25	1.39	1.81
0.05	1.01	1.60	2.08	5.24
0.02	1.03	5.37	-	-

Тут наведені дані розрахунку відношення $\varepsilon_0/\varepsilon_{\max}$, аналіз яких також показує, що втрати ефективності модуля за умов зменшення висоти віток термоелементів, причиною яких є тепловий опір комутаційних та ізоляційних пластин, співмірні з втратами, зумовленими електричним контактним опором.

Отже для проектування модулів охолодження з вітками, висота яких менше 1 мм, важливо враховувати як електричний контактний опір, так і тепловий опір комутаційних та ізоляційних

пластин. Для модулів з вітками більшими за 0.15 см можна скористатися ідеальною моделлю, яка не враховує вплив електричних і теплових втрат енергетичної ефективності.

Висновки

Розрахунок і аналіз максимального холодильного коефіцієнта, проведені на основі реальної моделі модуля охолодження, що враховує вплив електричного контактного опору і електричного та теплового опорів комутаційних та ізоляційних пластин, уможливають наступні висновки:

1. Холодильний коефіцієнт залежить від висоти віток термоелементів. Чим менша висота віток, тим менший холодильний коефіцієнт. Для перепадів температур менших за 40 К холодильний коефіцієнт модулів з ізоляційними пластинами з Al_2O_3 і вітками з матеріалів на основі Bi_2Te_3 висотою 0.05 см досягає лише 65 % свого "ідеального" значення, яке не враховує вплив електричних і теплових опорів, а для $\Delta T = 60$ К це буде всього 19 %. Водночас для модулів з висотою віток 0.2 см цей показник становить 90 %.

2. Чим більшими є величини електричного контактного опору і теплового опору комутаційних та ізоляційних пластин, тим суттєвіше зменшується холодильний коефіцієнт із зменшенням висоти віток. Причому зменшення холодильного коефіцієнта за рахунок теплового опору співмірне із його зменшенням внаслідок впливу електричного контактного опору.

3. Підвищити енергетичну ефективність модулів можна шляхом застосування технологій їх виготовлення, що мінімізують контактний опір [35], і використання ізоляційних пластин з високотеплопровідних матеріалів, наприклад, з AlN замість Al_2O_3 . Холодильний коефіцієнт таких модулів не буде суттєво залежати від висоти віток і наблизиться до свого "ідеального" значення.

Література

1. Анатичук Л.І., Вихор Л.М. Границі термоелектричного охолодження для фотоприймачів. Термоелектрика, 2013, №5, с. 58–63.
2. Вайнер А.Л., Моисеев В.Ф. Совмещенные приборы криотермоэлектрической электроники. Одесса: Студия «Негоциант», 2000.
3. K. Mansour, Y. Qiu, C.J. Hill, A. Soibel, R.Q. Yang, Mid-infrared interband cascade lasers at thermoelectric cooler temperatures, *Electron. Lett.* 42 (Issue 18) (2006) 1034-1036.
4. Reiyu Chein, Guanming Huang. Thermoelectric cooler application in electronic cooling, *Appl. Therm. Eng.* 24 (2004) 2207-2217.
5. Yuanyuan Zhou, Jianlin Yu. Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices, *Int. J. Refrig.* 35 (2012) 1139-1144.
6. H.Y. Zhang, Y.C. Mui, M. Tarin. Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages, *Appl. Therm. Eng.* 30 (2010) 561-568.
7. Patrick E. Phelan, Victor A. Chiriack, Tien-Yu Tom Lee. Current and future miniature refrigeration cooling technologies for high power microelectronics, *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 25 (3)

(September 2002).

8. Hsiang-Sheng Huang, Ying-Che Weng, Yu-Wei Chang, Sih-Li Chen, Ming-Tsun Ke. Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 37 (2010) 140-146.
9. Yu-Wei Chang, Chih-Chung Chang, Ming-Tsun Ke, Sih-Li Chen. Thermoelectric air-cooling module for electronic devices, *Appl. Therm. Eng.* 29 (2009) 2731-2737.
10. Liu Zhu, Hongbo Tan, Jianlin Yu. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications, *Energy Convers. Manage.* 76 (2013) 685-690.
11. Junhui Li, Bangke Ma, Ruishan Wang, Lei Han. Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs, *Microelectron. Reliab.* 51 (2011) 2210-2215.
12. Rong-Yuan Jou. Heat transfer enhancement of the liquid-cooled LED illumination module, *Appl. Mech. Mater.* 284-287 (2013) 768-772.
13. L.I. Anatyshuk, R.R. Kobylyansky. Thermoelectric device for treatment of radiculitis and spinal massage, *AIP Conf. Proc.* (2012) 509–511.
14. L. Anatyshuk, L. Vikhor, M. Kotsur, R. Kobylyanskyi, T. Kadaniuk. Optimal Control of Time Dependence of Temperature in Thermoelectric Devices for Medical Purposes, *Int. J. Thermophys.* 39 (2018) 1–12.
15. Анатичук Л.І., Пасечнікова Н.В., Науменко В.О., Задорожний О.С., Назаретян Р.Е., Гаврилюк М.В., Тюменцев В.А., Кобилянський Р.Р. Термоелектричний прилад для безконтактного охолодження очей людини, *Термоелектрика*, №4, (2020), 77-90.
16. R.R. He, H.Y. Zhong, Y. Cai, D. Liu, F.Y. Zhao. Theoretical and Experimental Investigations of Thermoelectric Refrigeration Box Used for Medical Service, *Procedia Eng.* 205 (2017) 1215–1222.
17. N.F. Güler, R. Ahiska. Design and testing of a microprocessor-controlled portable thermoelectric medical cooling kit, *Appl. Therm. Eng.* 22 (11) (2002) 1271–1276.
18. Nandy Putra, et al. The characterization of a cascade thermoelectric cooler in a cryosurgery device, *Cryogenics* 50 (2010) 759-764.
19. Mark Gillott, Liben Jiang, Saffa Riffat. An investigation of thermoelectric cooling devices for small-scale space conditioning applications in buildings, *Int. J. Energy Res.* (2009).
20. Tsung-Chieh Cheng, Chin-Hsiang Cheng, Zhu-Zin Huang, Guo-Chun Liao. Development of an energy- saving module via combination of solar cells and thermoelectric coolers for green building applications, *Energy* 36 (2011).
21. Limei Shen, Fu Xiao, Huanxin Chen, Shengwei Wang. Investigation of a novel thermoelectric radiant air-conditioning system, *Energy Build.* 59 (2013) 123-132.
22. D. Astrain, J.G. Vian, J. Albizua. Computational model for refrigerators based on Peltier effect application, *Appl. Therm. Eng.* 25 (2005) 3149-3162.
23. Gao Min, D.M. Rowe. Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators, *Appl. Energy* 83 (2006) 133-152.
24. Sabah A. Abdul-Wahab, et al. Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric

- refrigerator, *Renew. Energy* 34 (2009) 30-34.
- 25.D. Astrain, J.G. Vian, M. Dominguez. Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation, *Appl. Therm. Eng.* 23 (2003) 2183-2200.
- 26.Hyeung-Sik Choi, Sangkook Yun, Kwang-il Whang. Development of a temperature-controlled car-seat system utilizing thermoelectric device, *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 2841-2849.
- 27.Анатичук Л.І., Прибила А.В., Кібак А.М. Термоелектричні кондиціонери для сидінь автотранспорту, *Термоелектрика*, №4, (2020), 90-104.
- 28.A.G. Miranda, T.S. Chen, C.W. Hong. Feasibility study of a green energy powered thermoelectric chip based air conditioner for electric vehicles, *Energy* 59 (2013) 633-641.
- 29.S. B. Riffat, Xiaoli Ma. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review, *Int. J. Energy Res.* 2004; 28:753–768.
- 30.D. Zhao, G. Tan. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications, *Appl. Therm. Eng.* 66 (2014) 15-24.
- 31.Gao Min, D.M. Rowe. Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module, *Energy Convers. Manage.* 41 (2000) 163-171.
- 32.X.C. Xuan. Investigation of thermal contact effect on thermoelectric coolers. *Energy Convers. Manage.* 44 (2003) 399–410.
- 33.Анатичук Л.І. Термоелектричність. Том II. Термоелектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоелектричності, 2003, 376 с.
- 34.P. J. Taylor, J. R. Maddux, G. Meissner, R. Venkatasubramanian et al. Controlled improvement in specific contact resistivity for thermoelectric materials by ion implantation, *Appl. Phys. Lett.* 103, (2013) 043902.(1-5).
- 35.L.M. Vikhor, L.I. Anatyshuk, and P.V. Gorskyi. Electrical resistance of metal contact to Bi₂Te₃ based thermoelectric legs, *J. Appl. Phys.* 126, (2019) 164503.

Надійшли до редакції:21.06.2021

Анатичук Л.І. *акад. НАН України*^{1,2}

Вихор Л.М. *док. физ.-мат. наук*¹

¹Институт термоелектричності НАН и МОН України, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatyshuk@gmail.com ;

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

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ
КОНТАКТОВ И КОММУТАЦИЙ НА ХОЛОДИЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ**

В работе описан метод расчета максимального холодильного коэффициента для реальной модели термоэлектрического модуля, учитывающей влияние электрического сопротивления контактов и коммутаций и теплового сопротивления коммутационных и изоляционных пластин. Рассчитаны зависимости максимального холодильного коэффициента модуля от высоты его ветвей и перепада температур. Проведен сравнительный анализ холодильного коэффициента реальной модели модуля с его "идеальным" значением, не учитывающим влияние электрических и тепловых сопротивлений контактов, коммутационных и изоляционных пластин. Библ. 36, рис. 4., табл. 2.

Ключевые слова: термоэлектрический охлаждающий модуль, холодильный коэффициент, электрическое контактное сопротивление, тепловое сопротивление коммутационной и изоляционной пластин

Anatychuk L.I., *acad. National Academy
of Sciences of Ukraine*^{1,2}

Vikhor L.M. *doc. phys.-math. sciences*¹

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,

1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine

e-mail: anatych@gmail.com;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,

2 Kotsiubynsky str., 58000, Chernivtsi, Ukraine

INFLUENCE OF ELECTRICAL AND THERMAL RESISTANCES OF CONTACTS AND INTERCONNECTS ON THE COEFFICIENT OF PERFORMANCE OF THERMOELECTRIC MODULE

The paper describes a method for calculating the maximum coefficient of performance for a real model of a thermoelectric module, which takes into account the influence of the electrical resistance of contacts and interconnects and the thermal resistance of interconnect and insulating plates. The dependences of the maximum coefficient of performance of the module on the height of its legs and temperature difference are calculated. A comparative analysis of the coefficient of performance of a real module model with its "ideal" value, which does not take into account the influence of electrical and thermal resistances of contacts, interconnects and insulating plates, is carried out.

Key words: thermoelectric cooling module, coefficient of performance, electrical contact resistance, thermal resistance of interconnect and insulating plates

References

1. Anatychuk L.I., Vikhor L.M. (2013). The boundaries of thermoelectric cooling for photodetectors.

- J. Thermoelectricity*, 5, 58–63.
2. Vainer A.L., Moiseev V.F. (2000). *Sovmeshchennyye pribory kriothermoelektricheskoi elektroniki [Combined devices of cryothermoelectric electronics]*. Odessa: Negotsiant studio [in Russian].
 3. Mansour K., Qiu Y., Hill C.J., Soibel A., Yang R.Q. (2006). Mid-infrared interband cascade lasers at thermoelectric cooler temperatures. *Electron. Lett.* 42 (18), 1034-1036.
 4. Chein Reiyu, Huang Guanming (2004). Thermoelectric cooler application in electronic cooling, *Appl. Therm. Eng.*, 24, 2207-2217.
 5. Zhou Yuanyuan, Yu Jianlin (2012). Design optimization of thermoelectric cooling systems for applications in electronic devices. *Int. J. Refrig.* 35, 1139-1144.
 6. Zhang H.Y., Mui Y.C., Tarin M. (2010). Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages. *Appl. Therm. Eng.* 30, 561-568.
 7. Phelan Patrick E., Chiriac Victor A., Tom Lee Tien-Yu (2002). Current and future miniature refrigeration cooling technologies for high power microelectronics. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 25 (3).
 8. Huang Hsiang-Sheng, Weng Ying-Che, Chang Yu-Wei, Chen Sih-Li, Ke Ming-Tsun (2010). Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 37, 140-146.
 9. Chang Yu-Wei, Chang Chih-Chung, Ke Ming-Tsun, Chen Sih-Li (2009). Thermoelectric air-cooling module for electronic devices. *Appl. Therm. Eng.* 29, 2731-2737.
 10. Zhu Liu, Tan Hongbo, Yu Jianlin (2013). Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications. *Energy Convers. Manage.* 76, 685-690.
 11. Li Junhui, Ma Bangke, Wang Ruishan, Han Lei (2011). Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs. *Microelectron. Reliab.* 51, 2210-2215.
 12. Jou Rong-Yuan (2013). Heat transfer enhancement of the liquid-cooled LED illumination module. *Appl. Mech. Mater.* 284-287, 768-772.
 13. Anatyshuk L.I., Kobylansky R.R. (2012). Thermoelectric device for treatment of radiculitis and spinal massage. *AIP Conf. Proc.* 509–511.
 14. Anatyshuk L., Vikhor L., Kotsur M., Kobylanskyi R., Kadenuk T. (2018). Optimal control of time dependence of temperature in thermoelectric devices for medical purposes. *Int. J. Thermophys.* 39, 1–12.
 15. Anatyshuk L.I., Pasechnikova N.V., Naumenko V.O., Zadorozhnyi O.S., Nazaretyan R.E., Havryliuk M.V., Tiumentsev V.A., Kobylanskyi R.R. (2020). Thermoelectric device for non-contact cooling of human eyes. *J. Thermoelectricity*, 4, 77-90.
 16. He R.R., Zhong H.Y., Cai Y., Liu D., Zhao F.Y. (2017). Theoretical and experimental investigations of thermoelectric refrigeration box used for medical service. *Procedia Eng.*, 205, 1215–1222.
 17. Güler N.F., Ahiska R. (2002). Design and testing of a microprocessor-controlled portable thermoelectric medical cooling kit. *Appl. Therm. Eng.*, 22 (11), 1271–1276.
 18. Putra Nandy, et al. (2010). The characterization of a cascade thermoelectric cooler in a cryosurgery device. *Cryogenics* 50, 759-764.

19. Gillott Mark, Jiang Liben, Riffat Saffa (2009). An investigation of thermoelectric cooling devices for small-scale space conditioning applications in buildings. *Int. J. Energy Res.*
20. Cheng Tsung-Chieh, Cheng Chin-Hsiang, Huang Zhu-Zing, Liao Guo-Chun (2011). Development of an energy-saving module via combination of solar cells and thermoelectric coolers for green building applications. *Energy*, 36.
21. Shen Limei, Xiao Fuo, Chen Huanxin, Wang Shengwei (2013). Investigation of a novel thermoelectric radiant air-conditioning system. *Energy Build.* 59, 123-132.
22. Astrain D., Vian J.G., Albizua J. (2005). Computational model for refrigerators based on Peltier effect application. *Appl. Therm. Eng.* 25, 3149-3162.
23. Min Gao, Rowe D.M. (2006). Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators, *Appl. Energy* 83, 133-152.
24. Sabah A. Abdul-Wahab, et al. (2009). Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator. *Renew. Energy*, 34, 30-34.
25. Astrain D., Vian J.G., Dominguez M. (2003). Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation. *Appl. Therm. Eng.* 23, 2183-2200.
26. Choi Hyeung-Sik, Yun Sangkook, Whang Kwang-il. Development of a temperature-controlled car-seat system utilizing thermoelectric device. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2841-2849.
27. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V., Kibak A.M. (2020). Thermoelectric air conditioners for vehicle seats. *J. Thermoelectricity*, 4, 90-104.
28. Miranda A.G., Chen T.S., Hong C.W. (2013). Feasibility study of a green energy powered thermoelectric chip based air conditioner for electric vehicles. *Energy* 59, 633-641.
29. Riffat S.B., Ma Xiaoli (2004). Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review. *Int. J. Energy Res.* 28, 753-768.
30. Zhao D., Tan G. (2014). A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. *Appl. Therm. Eng.* 66, 15-24.
31. Min Gao, Rowe D.M. (2000). Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module. *Energy Convers. Manage.* 41, 163-171.
32. Xuan X.C. (2003). Investigation of thermal contact effect on thermoelectric coolers. *Energy Convers. Manage.* 44, 399-410.
33. Anatyshuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. T.II. Termoelektricheskiie preobrazovateli energii [Thermoelectricity. Vol.II. Thermoelectric power converters]*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity [in Russian].
34. Taylor P.J., Maddux J.R., Meissner G., Venkatasubramanian R. et al. (2013). Controlled improvement in specific contact resistivity for thermoelectric materials by ion implantation. *Appl. Phys. Lett.* 103, 043902 (1-5).
35. Vikhor L.M., Anatyshuk L.I., Gorskyi P.V. (2019). Electrical resistance of metal contact to Bi₂Te₃ based thermoelectric legs. *J. Appl. Phys.* 126, 164503.

Submitted: 21.06.2021

УДК 536.24



Закордонець В.С.

Закордонець В.С. канд. фіз.-мат. наук, доцент

Сисак І.М. канд. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя, вул. Руська, 56, Тернопіль, 46001,
Україна; e-mail: wladim21@gmail.com



Сисак І.М.

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНА ДОБРОТНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ НАДГРАТОК

В квазікласичному одномізонному наближенні досліджена термоелектрична добротність напівпровідникових надграток. Врахована зміна часу релаксації носіїв струму 2D структурах в порівнянні з їх 3D аналогами при розсіюванні носіїв струму на акустичних фонах, точкових дефектах і неполярних оптичних фонах при довільній статистиці. Встановлена аналітична залежність добротності від коефіцієнта термоелектричної якості матеріалу та ширини мінізони провідності в напрямку осі надгратки. Показано, що добротність напівпровідникових надграток збільшується із збільшенням цих параметрів. Бібл. 14, рис. 4

Ключові слова: надгратки, мінізона провідності, час релаксації, термоЕРС, фононна теплопровідність, термоелектрична добротність.

Постановка проблеми.

ККД термоелектричних генераторів, а також холодильний коефіцієнт термоелектричних холодильників визначається параметром безрозмірної термоелектричної добротності (ТЕД)

$$zT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa_e + \kappa_{ph}} T, \quad (1)$$

де, α , σ , κ_e , κ_{ph} - коефіцієнти термоЕРС, електропровідності, електронної і фононної теплопровідності термоелектричного матеріалу, T – середня абсолютна температура, яка характеризує умови застосування термоелектричного пристрою [1].

В [2] показано, що для об'ємних кристалічних напівпровідникових матеріалів, навіть при ідеальній комбінації їх параметрів $zT < 1.5$. Практично ж величина zT сучасних термоелектриків на основі Bi_2Te_3 наблизилася до граничної величини $zT < 1$.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останні десятиріччя продовжувалися інтенсивні пошуки шляхів збільшення термоелектричної добротності. При цьому збільшення ТЕД, в основному, пов'язувалося із

зменшенням фононної теплопровідності при підтриманні електропровідності хоча б на рівні вироджених широкозонних напівпровідників. Було запропоновано використання напівпровідникових структур низької розмірності: тонких плівок [3, 4], надґраток, [5, 6], нанорозмірних структур [7]. Аналіз експериментальних даних підтверджує перспективність створення високоефективних термоелектричних матеріалів на базі нанотехнологій [8].

Однак, зменшення фононної складової теплопровідності ґратки не єдиний наслідок впливу структур низької розмірності на властивості термоелектричного матеріалу: в наноструктурованих матеріалах можуть змінюватися процеси переносу і розсіювання не тільки фононів, але і електронів [9, 10].

Метою роботи є дослідження термоелектричної добротності напівпровідникових надґраток в квазікласичному одномінізонному наближенні з урахуванням зміни часу релаксації в 2D структурах в порівнянні з їх 3D аналогами у при розсіюванні носіїв струму на акустичних фонах, точкових дефектах і неполярних оптичних фонах у випадку довільній статистики.

Постановка завдання

Знаходження функції розподілу

Фізичні властивості напівпровідникових матеріалів визначаються їх електронним спектром, який в надґратках має сильну анізотропію. В той час, як рух носіїв струму в напрямку перпендикулярному осі НГ майже вільний і відповідає руху по широкій зоні провідності, рух вздовж осі надґратки обмежений. В цьому напрямку електронний спектр має мінізонний характер. У випадку достатньо вузьких шарів, які являють собою квантові ями для електронів, всі електрони будуть знаходитися поблизу дна нижньої мінізони розмірного квантування. В рамках квазікласичного наближення $2\varepsilon_0 \gg \hbar/\tau_{2D}$, eE_0 , $a\nabla_z k_0 T$ закон дисперсії електронів в нижній мінізоні НГ має вигляд [11]

$$\varepsilon(\vec{k}) = \frac{\hbar^2 k_{\perp}^2}{2m_{\perp}} + 2\varepsilon_0(1 - \cos k_z a) \quad (2)$$

де $k_{\perp} = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$, і k_z – поперечна і поздовжня до осі НГ компоненти квазіхвильового вектора, m_{\perp} – поперечна ефективна маса, яка близька по величині до ефективної маси m^* електронів напівпровідника, що формує НГ, a – період НГ, $2\varepsilon_0$ – ширина мінізони провідності НГ в напрямку k_z .

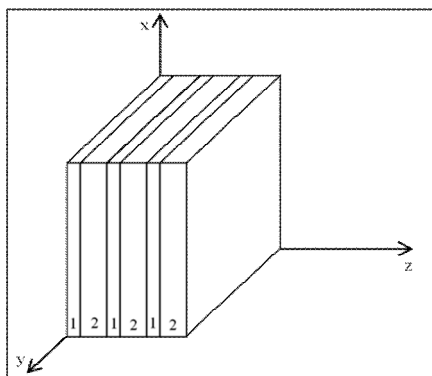


Рис.1 Схематична будова напівпровідникової надґратки GaAs/AlAs. 1 – шар GaAs, 2 – шар AlAs.

Розрахунок кінетичних коефіцієнтів проведемо в квазікласичному одномізонному наближенні з урахуванням зміни часу релаксації в 2D - структурах у порівнянні з їх об'ємними 3D – аналогами. Нерівноважну функцію розподілу електронів f будемо шукати з кінетичного рівняння Больцмана

$$\vec{v} \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} - e \vec{E}_0 \frac{\partial f}{\hbar \partial \vec{k}} = - \frac{f_1}{\tau_{2D}}, \quad (2)$$

де $\vec{v} = \hbar^{-1} \partial \varepsilon(\vec{k}) / \partial \vec{k}$ – швидкість електрона, $\vec{E}_0 = -\partial \varphi / \partial \vec{r}$ – напруженість електричного поля, φ – електричний потенціал, $f_1 = f - f_0$, $f_0 = [1 + \exp(\varepsilon - \zeta) / k_0 T]$ - рівноважна функція розподілу Фермі-Дірака із змінною в просторі абсолютною температурою T і хімічним потенціалом ζ , τ_{2D} - час релаксації, k_0 - постійна Больцмана.

Поздовжню складову тензора часу релаксації електронного газу НГ напишемо у вигляді [12]

$$\tau_{2D} = a \frac{2\sqrt{2m_{\perp} k_0 T}}{3\pi \hbar} \tau_{3D} \left(\frac{\varepsilon}{k_0 T} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

де

$$\tau_{3D} = \tau_0 \left(\frac{\varepsilon}{k_0 T} \right)^{r-1/2}, \quad (4)$$

- час релаксації в об'ємному зразку, τ_0 - незалежна від енергії електрона постійна, r - параметр розсіювання мають вигляд:

на точкових дефектах (короткодійний потенціал)

$$\tau_0 = \frac{\pi \hbar^4}{m_n (2m_n k_0 T)^{1/2} U_0^2 N_g}, \quad (5)$$

на акустичних фононах

$$\tau_0 = \frac{2\pi \hbar^4 \rho v_0^2}{E_1^2 (2m_n k_0 T)^{3/2}}, \quad (6)$$

на неполярних оптичних фононах ($k_0 T \gg \hbar \omega_0$)

$$\tau_0 = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\hbar \omega_0}{E_0} \right)^2 \frac{\hbar^2 a^2 \rho}{m_n (2m_n k_0 T)^{3/2}}, \quad (7)$$

Очевидно, що відмінності в степеневій залежності часу релаксації об'ємного зразка і надгратки виникають із-за різної енергетичної залежності густини станів.

Розв'язуючи рівняння (2) в наближенні часу релаксації, для нерівноважної добавки до функції розподілу Фермі-Дірака отримаємо

$$f_1 = -\tau_{2D} \left(\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) \left[\frac{\varepsilon(\vec{k}) - \zeta}{T} \vec{v} \nabla T - e \vec{v} \nabla \left(\varphi - \frac{\zeta}{e} \right) \right]. \quad (8)$$

Очевидно, що перша складова нерівноважної добавки викликана грідиентом температури в зразку, а друга з градієнтом енергії носіїв струму.

Розрахунок кінетичних коефіцієнтів

Густину струму і густину потоку енергії знайдемо із відомих співвідношень [12]

$$\vec{j} = -\frac{2e}{(2\pi)^3} \int \vec{v}(\vec{k}) f_1(\vec{k}, \vec{r}) d\vec{k}, \quad (9)$$

$$\vec{w} = \frac{2}{(2\pi)^3} \int [\varepsilon(\vec{k}) - \zeta] \vec{v}(\vec{k}) f_1(\vec{k}, \vec{r}) d\vec{k} \quad (10)$$

Будемо вважати що вектори \vec{E}_0 і ∇T направлені вздовж осі надгратки, яку сумістимо з віссю циліндричної системи координат $0z$. Враховуючи (8) та інтегруючи в циліндричній системі координат для густини струму і енергії отримаємо

$$j = j_z = \sigma(\eta, \beta) \nabla_z \left(\frac{\zeta}{e} - \varphi \right) - \alpha(\eta, \beta) \sigma(\eta, \beta) \nabla_z T \quad (11)$$

$$w = w_z = -\kappa_e(\eta, \beta) \nabla_z T \quad (12)$$

де $\alpha(\eta, \beta)$, $\sigma(\eta, \beta)$, $\kappa_e(\eta, \beta)$ - коефіцієнти термоЕРС, електропровідності і електронної складової теплопровідності вздовж осі НГ.

Враховуючи вигляд функції розподілу із (11) і (12) знайдемо кінетичні коефіцієнти.

Коефіцієнт термоЕРС

$$\alpha(\eta, \beta) = \frac{\nabla_z \left(\frac{\zeta}{e} - \varphi \right)}{\nabla_z T} = -\frac{k_0}{e} \left[\frac{I_{1,2,0}(\eta, \beta) + \beta I_{0,2,2}(\eta, \beta)}{I_{0,2,0}(\eta, \beta)} - \eta \right], \quad (13)$$

коефіцієнт електропровідності

$$\sigma(\eta, \beta) = \sigma_0 \beta^2 I_{0,2,0}(\eta, \beta), \quad (14)$$

електронну складову коефіцієнта теплопровідності

$$\kappa_e(\eta, \beta) = L_{2D}(\eta, \beta) \sigma(\eta, \beta) T, \quad (15)$$

де

$$L_{2D}(\eta, \beta) = \left(\frac{k_0}{e} \right)^2 \left\{ \frac{I_{2,2,0}(\eta, \beta) + 2\beta I_{1,2,2}(\eta, \beta) + \beta^2 I_{0,2,4}(\eta, \beta)}{I_{0,2,0}(\eta, \beta)} - \left[\frac{I_{1,2,0}(\eta, \beta)}{I_{0,2,0}(\eta, \beta)} + \beta \frac{I_{0,2,2}(\eta, \beta)}{I_{0,2,0}(\eta, \beta)} \right]^2 \right\} \quad (16)$$

число Лоренца,

$$I_{k,l,m}(\eta, \beta) = \int_0^\pi F_k(\eta, z, \beta) (\sin z)^l \left(\sin \frac{z}{2} \right)^m dz, \quad (17)$$

$$F_k(\eta, z, \beta) = \int_0^\infty \frac{\exp\left(x - \eta + \beta \sin^2 \frac{z}{2}\right)}{\left[1 + \exp\left(x - \eta + \beta \sin^2 \frac{z}{2}\right)\right]^2} x^k dx, \quad (18)$$

трьохпараметричні інтеграли Фермі [12],

$\varepsilon_\perp = \hbar^2 k_\perp^2 / 2m_\perp$, $x = \varepsilon_\perp / k_0 T$, $\eta = \zeta / k_0 T$, $z = ak_z$, $\beta = 2\varepsilon_0 / k_0 T$ - приведена ширина мінізони провідності в напрямку осі надґратки.

Розрахунок термоелектричної добротності

Використовуючи знайдені кінетичні коефіцієнти розрахуємо термоелектричну добротність 2D- структури

$$z_{2D}(\eta, \beta) T = \frac{\alpha^2(\eta, \beta) \sigma(\eta, \beta)}{\kappa_e(\eta, \beta) + \kappa_{ph}} T = \frac{\alpha_0^2(\eta, \beta)}{L_0(\eta, \beta) + B^{-1} [\beta^2 I_{0,2,0}(\eta, \beta)]^{-1}}, \quad (19)$$

де $L_0(\eta, \beta) = L_{2D}(\eta, \beta) / (k_0/e)^2$ - приведене число Лоренца, $\alpha_0(\eta, \beta) = \alpha(\eta, \beta) / (-k_0/e)$ - приведений коефіцієнт термоЕРС,

$B = \left(\frac{k_0}{e} \right)^2 \frac{\sigma_0 T}{\kappa_{ph}}$ - коефіцієнт термоелектричної якості (КЯ), який містить матеріальні параметри

2D ґратки: коефіцієнт фононної теплопровідності, період НГ, ефективну масу та рухливість носіїв струму в напрямку осі НГ, і суттєво впливає на величину ТЕД. Аналогічний параметр введений для масивних напівпровідникових зразків в [2].

Аналіз отриманих результатів

При фіксованих значеннях параметрів носіїв струму B і β ТЕД є функцією лише η , причому залежність $z(\eta)$ має екстремум. Тобто, існує оптимальна концентрація легуючих домішок, яка приводить до максимальних значень добротності. Після максималізації $z(\eta)$ по хімічному потенціалу був досліджений вплив на ТЕД параметрів B і β . Оцінка найбільш реалістичного діапазону зміни коефіцієнта термоелектричної якості дає $B = 0.075 - 0.125$.

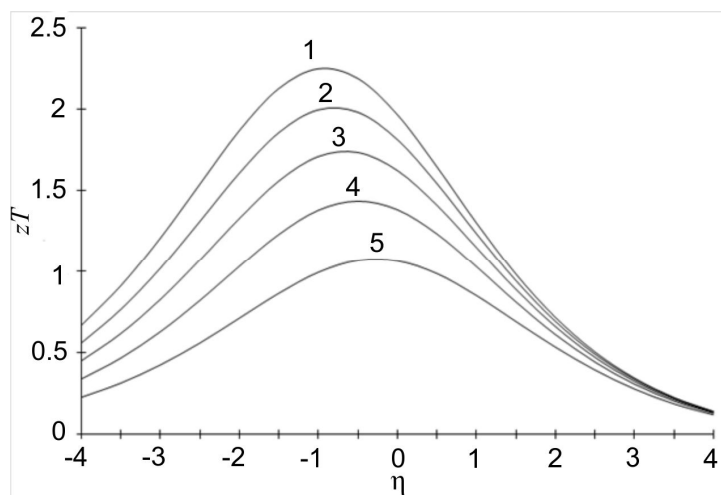


Рис. 2 Залежність термоелектричної добротності від приведеного хімічного потенціалу при ширині мінізони провідності $\beta=5$ та при різних величинах КЯ. Крива 1 при $B = 0.15$, 2- $B = 0.125$, 3 - $B = 0.1$, 4 - $B = 0.075$, 5 - $B = 0.05$.

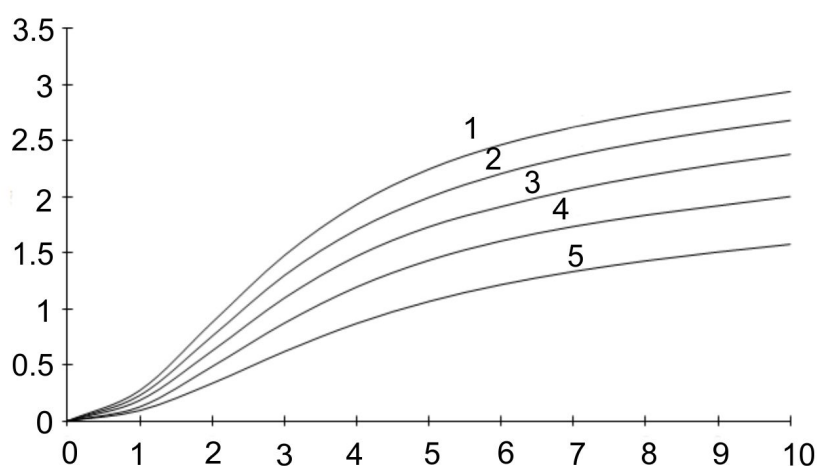


Рис. 3 Залежність максимальної термоелектричної добротності від ширини мінізони провідності при різних величинах КЯ. Крива 1 при $B = 0.15$, 2- при $B = 0.125$, 3 – при $B = 0.1$, 4 при - $B = 0.075$, 5 при- $B = 0.05$.

Врахування скінченності ширини мінізони провідності призводить до залежності числа Лоренца від її ширини. Зокрема, при зменшенні ширини мінізони у напрямку осі НГ зменшується число Лоренца та коефіцієнти електропровідності і електронної складової теплопровідності. І, незважаючи на зменшення фононної теплопровідності, даний процес призводить до загального зменшення ТЕД. Навпаки, збільшення ширини мінізони провідності збільшує коефіцієнт електропровідності. Однак, при цьому збільшується електронна складова теплопровідності, яка може компенсувати зменшення фононної теплопровідності. Цей процес може спричинити загальне зменшення ТЕД. Очевидно, що існує оптимальна ширина мінізони провідності, яка для надграток *GaAs/AlAs* знаходиться в інтервалі $\beta = 5-9$.

В двовимірних структурах для статистики виродженого газу носіїв струму приведені число Лоренца досягає максимальної величини - $L_0(\infty, \beta) = \pi^2/3$, а для невиродженого електронного газу і надвузкої мінізони провідності мінімуму - $L_0(\eta, 0) = 1$.

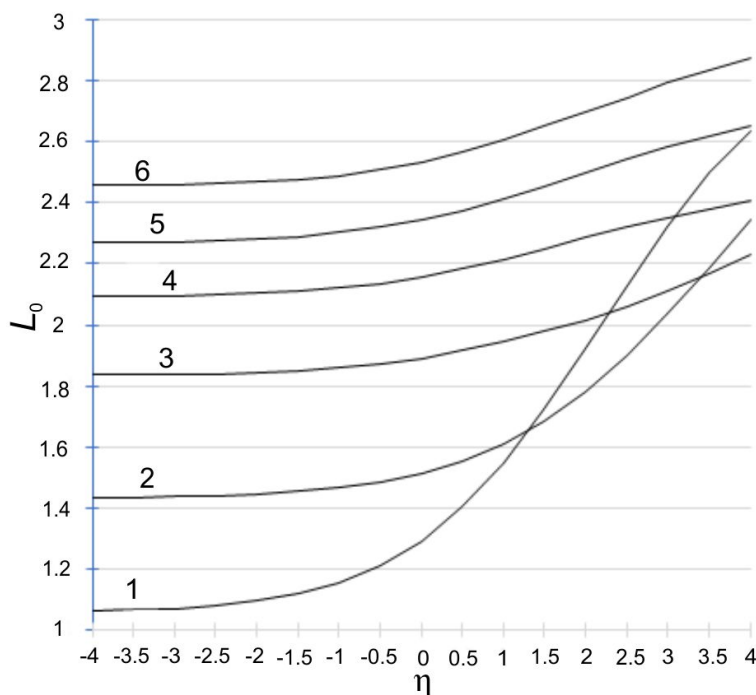


Рис. 4 Залежність приведеного числа Лоренца від хімпотенціалу при різній ширині мінізони провідності. Криві: 1 - при $\beta=1$, 2 - при $\beta=3$, 3 при $\beta=5$, 4 при $\beta=7$, 5 при $\beta=10$, 6 - при $\beta=\infty$.

Для перевірки правильності отриманих співвідношень був здійснений граничний перехід при $\beta \rightarrow \infty$. Збільшення β слід розглядати як наближення ширини мінізони провідності в напрямку паралельному до осі НГ до ширини широкої зони провідності в напрямку k_{\perp} . В граничному випадку $\beta = \infty$, аналітичні співвідношення для кінетичних коефіцієнтів переходять у відомі формули для масивних напівпровідників з параболічним законом дисперсії [12].

Одним з найважливіших результатів створення гетероструктур пониженої розмірності, які приводять до збільшення ТЕД є зменшення теплопровідності ґратки в результаті розсіювання фононів на поверхнях і гетерограницях. Однак, зменшення теплопровідності ґратки не єдиний наслідок впливу структур низької розмірності на властивості термоелектричного матеріалу: в наноструктурованих матеріалах змінюються процеси розсіювання не тільки фононів, але і електронів. Зокрема, змінюється час релаксації носіїв струму в 2D структурах у порівнянні з їх 3D аналогами.

Висновки

Термоелектрична добротність надґраток залежить від хімічного потенціалу η , ширини мінізони провідності β та коефіцієнта термоелектричної якості B . Безрозмірний параметр якості термоелектричного матеріалу визначається величиною: коефіцієнта фононної теплопровідності, періоду надґратки, ефективної маси носіїв струму в напрямку осі надґратки та ін.. Найбільш реалістичний діапазон зміни B для двовимірних структур на основі $GaAs/AlAs$ складає 0.050-0.125.

При фіксованих значеннях параметрів B і β термоелектрична добротність є функцією лише η , причому залежність $z(\eta)$ має екстремум, який при збільшенні B , зміщується в бік менших значень хімпотенціалу. В області кімнатних температур при умові оптимальної концентрації легуючих домішок, при ширині мінізони провідності $\beta = 10$ та при максимально сприятливій величині коефіцієнта термоелектричної якості $B = 0.125$ величина ТЕД надґраток на основі $AlGaAs$ може досягти значень $zT = 3$. Отримана гранична величина ТЕД НГ є достатньою для того, щоб термоелектричні пристрої по ефективності склали конкуренцію електричним генераторам і холодильникам, які працюють на інших принципах.

Звичайно, що на величину ТЕД НГ суттєві корективи може внести ефект електрон - фононного захоплення [13, 14].

Література

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наукова думка, 1979. – 768с.
2. Булат Л.П., Закордонец В.С. Предельная термоэлектрическая добротность полупроводниковых кристаллических материалов //ФТП. –1995. –29, вып.10.-С.1743 – 1749.
3. Закордонец В.С., Логвинов Г.Н. Термоэлектрическая добротность монополярных полупроводников ограниченных размеров //ФТП. –1997. –31, вып.3.-С.324 – 325.
4. Venkatasubramanian R., Colpitts T., Watko E., Lamvik M., El-Masry N. MOCVD of Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 and their superlattice structures for thin-film thermoelectric applications. Journal of Crystal Growth, 1997;(1–4):170721–817.
5. Ezzahri Y., Zeng G., Fukutani K., Bian Z., Shakouri A. Comparison of thin film microrefrigerators based on Si/SiGe superlattice and bulk SiGe. J. Microelectronics, 2008; 39:981–991.

6. Venkatasubramanian R., Siivola E., Colpitts T., O'Quinn B. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit. *Nature*, 2001; 431:597–602.
7. Ivanova L.D., Granatkina Yu.V., Malchev A.G., Nikhezina I.Yu., Emel'yanov M.V. Materials based on solid solutions of bismuth and antimony tellurides formed by rapid melt crystallization methods. *Semiconductors*, 2019;53(5):652–656.
8. Baranskiy P.I., Gaydar S.P. On the way from myths to realities in mastering high-performance thermoelectric converters based on the achievements of nanophysics and nanotechnologies. *Journal of thermoelectricity*, 2007;(2):46–53.
9. Д.А. Пшеная-Северин, Ю.И. Равич ФТП 36, **8**, (2002) Расчет подвижности и термоэлектрической эффективности многослойных структур с квантовыми ямами.
10. Закордонець В.С. ТермоЕРС в напівпровідникових надгратках при розсіюванні носіїв струму на фононах і точкових дефектах // *Термоелектрика*. №1, 2021. — С. 23–31.
11. Б.М. Аскеров, Б.И. Гулиев, С.Р. Фигарова, И.Р. Гадирова ТермоЭДС в квазидвумерных системах при рассеянии носителей тока на фононах // *ФТТ* 39, 10, 1857 (1997).
12. Б.М. Аскеров. Электронные явления переноса в полупроводниках. М.:Наука. 1985. 320с.
13. Zakordonets V., Stephansky V., Chainyk M. The Influence of Electron-Phonon Drag on Thermoelectric Figure of Merit of Limited-Sized Semiconductors. *Journal of thermoelectricity*, 1999;(2):56–61.
14. Zakordonets V., Stephansky V. Temperature fields and thermoEMF in semiconductors of limited dimensions under the electron-phonon drag. *Journal of thermoelectricity*, 1998;(2):33–38.

Надійшли до редакції: 08.07.2021

Закордонець В.С., канд. физ.-мат. наук, доцент

Сысак И. канд. техн. наук

Тернопольский национальный технический университет
имени Ивана Пулюя, ул. Русская, 56, Тернополь, 46001,
Украина; e-mail: wladim21@gmail.com

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДОБРОТНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТОК

В квазиклассическом одноминизонном приближении исследована термоэлектрическая добротность полупроводниковых сверхрешеток. Учтено изменение времени релаксации носителей тока в 2D структурах по сравнению с их 3D аналогами при рассеивании носителей тока на акустических фононах, точечных дефектах и неполярных оптических

фононах при произвольной статистике. Установлена аналитическая зависимость добротности от коэффициента термоэлектрического качества материала и ширины минизоны проводимости по оси сверхрешетки. Показано, что добротность полупроводниковых сверхрешеток увеличивается с увеличением этих параметров. Библиография. 14, рис. 4.

Ключевые слова: сверхрешетки, минизона проводимости, время релаксации, термоЭДС, фононная теплопроводность, термоэлектрическая добротность, .

V. Zakordonets, cand. of Phys. and Math. Sciences, docent

I. Sysak cand. tehn. Sciences

Ternopil National Technical University
named after Ivan Pulyuy, st. Russian, 56, Ternopil,
46001, Ukraine; e-mail: wladim21@gmail.com

THERMOELECTRIC FIGURE OF MERIT OF SEMICONDUCTOR SUPERLATTICES

The thermoelectric figure of merit of semiconductor superlattices has been studied in the quasi-classical one-miniband approximation. The change in the relaxation time of current carriers in 2D structures compared to their 3D analogs is taken into account when current carriers are scattered by acoustic phonons, point defects, and nonpolar optical phonons with arbitrary statistics. An analytical dependence of the figure of merit on the thermoelectric quality factor of the material and the width of the conduction miniband along the superlattice axis is established. It is shown that the figure of merit of semiconductor superlattices increases with increasing these parameters. Bibliography. 14, Fig. 4.

Key words: superlattices, conduction miniband, relaxation time, thermopower, phonon thermal conductivity, thermoelectric figure of merit.

References

1. Anatyчук L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
2. Bulat L.P., Zakordonets V.S. (1995). *Predelnaiia termoelektricheskaiia dobrotnost' poluprovodnikovyykh kristallicheskikh materialov [Maximum thermoelectric figure of merit of semiconductor crystalline materials]*. *Semiconductors*, 29(10), 1743 – 1749 [in Russian].
3. Zakordonets V.S., Logvinov G.N. (1997). *Termoelektricheskaiia dobrotnost monopoliarnyykh poluprovodnikov ogranichennykh razmerov [Thermoelectric figure of merit of limited-size monopolar semiconductors]*. *Semiconductors*, 31(3), 324 – 325.

4. Venkatasubramanian R., Colpitts T., Watko E., Lamvik M., El-Masry N. (1997). MOCVD of Bi₂Te₃, Sb₂Te₃ and their superlattice structures for thin-film thermoelectric applications. *Journal of Crystal Growth*, 1–4:170721–817.
5. Ezzahri Y., Zeng G., Fukutani K., Bian Z., Shakouri A. (2008). Comparison of thin film microrefrigerators based on Si/SiGe superlattice and bulk SiGe. *J. Microelectronics*, 39, 981–991.
6. Venkatasubramanian R., Siivola E., Colpitts T., O'Quinn B. (2001). Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit. *Nature*, 431, 597–602.
7. Ivanova L.D., Granatkina Yu.V., Malchev A.G., Nikhezina I.Yu., Emel'yanov M.V. (2019). Materials based on solid solutions of bismuth and antimony tellurides formed by rapid melt crystallization methods. *Semiconductors*, 53(5), 652–656.
8. Baranskiy P.I., Gaydar S.P. (2007). On the way from myths to realities in mastering high-performance thermoelectric converters based on the achievements of nanophysics and nanotechnologies. *J. Thermoelectricity*, 2, 46–53.
9. Pshenai-Severin D.A., Ravich Yu.I. (2002). Calculation of mobility and thermoelectric figure of merit of multi-layer structures with quantum wells. *Semiconductors*, 36(8).
10. Zakordonets V.S. (2021). ThermoEMF in semiconductor superlattices at scattering of current carriers by phonons and point defects. *J. Thermoelectricity*, 1, 23–31.
11. Askerov B.M., Giliiev B.I., Figarova S.R., Gadirova I.R. (1997). TermoEDS v kvazidvumernykh sistemakh pri rasseianii nositelei toka na fononakh [ThermoEMF in quasi-two-dimensional system at scattering of current carriers by phonons]. *Semiconductors*, 39 (10), 1857.
12. Askerov B.M. (1985). *Elektronnyie iavleniia perenosa v poluprovodnikakh [Electronic effects of transport in semiconductors]*. Moscow: Nauka [in Russian].
13. Zakordonets V., Stephansky V., Chainyk M. (1999). The influence of electron-phonon drag on thermoelectric figure of merit of limited-sized semiconductors. *J. Thermoelectricity*, 2, 56–61.
14. Zakordonets V., Stephansky V. (1998). Temperature fields and thermoEMF in semiconductors of limited dimensions under the electron-phonon drag. *J. Thermoelectricity*, 2, 33–38.

Submitted: 08.07.2021



Рибчаков Д.С.

Рибчаков Д.С.
Сербин М.В.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
e-mail: anatysh@gmail.com



Сербин М.В.

**КОМП'ЮТЕРНИЙ МЕТОД ОПИСУ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ
 Bi_2-Te_3 , ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ БРІДЖМЕНА**

У даній роботі наводяться результати дослідження літературних джерел в яких описуються технології та властивості термоелектричних матеріалів отриманих методом Бріджмена. Наводяться результати одного з етапів створення програмного продукту для опису технологій отримання та властивостей термоелектричного матеріалу на основі сполук $Bi-Te$. Бібл. 8. рис. 2. табл. 1.

Ключові слова: метод Бріджмена, інтерполяція, телурид вісмуту.

Вступ

Термоелектричні матеріали мають великий попит через використання в пристроях для виробництва електроенергії та охолодження. Вони є відмінним рішенням у пристроях активного охолодження у військовому, телекомунікаційному обладнанні та системах контролю температури.

Телурид вісмуту (Bi_2Te_3) – є одним з найкращих термоелектричних матеріалів з найбільшою термоелектричною добротністю (Z), яка у свою чергу, пов'язана з теплопровідністю (κ) та електропровідністю (σ), як представлено у формулі 1

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad - \quad (1)$$

де α – коефіцієнт Зеєбека.

Як традиційні методи виготовлення сполук телуриду вісмуту існують методи плавки по Бріджмену, Чохральського та методи зонної плавки, а також методи порошкової металургії, такі як гаряче пресування та гаряча екструзія [1].

Метою даної роботи є: дослідження термоелектричних характеристик твердих розчинів на основі телуриду вісмуту отриманих методом Бріджмена. Застосування модифікованої

комп'ютерної програми з дослідженням методу Бріджмена та характеристик термоелектричних матеріалів на основі сполук $Bi-Te$.

Залежність термоелектричних характеристик матеріалів на основі Bi_2-Te_3 отриманих методом Бріджмена

При отриманні зразків Bi_2Te_3 і його твердих розчинів методом Бріджмена матеріал синтезують, сплавляючи вихідні компоненти у тій же ампулі, в якій в подальшому матеріал буде вирощуватися [2]. Метод Бріджмена полягає у тому що, ампула з кристалізуючою речовиною переміщується в печі з верхньої частини з температурою, що переважає температуру плавлення у нижню частину, температура якої менша за температуру плавлення. Отримані методом Бріджменазлитки Bi_2Te_3 складаються з одного або декількох кристалічних зерен, достатньо великих, щоб з нього можна було вирізати монокристалічні зразки.

У (табл. 1) вказані термоелектричні характеристики матеріалів на основі $Bi-Te$ отримані методом Бріджмена.

Таблиця 1

Термоелектричні характеристики матеріалів на основі $Bi-Te$ отримані методом Бріджмена.

Робоча температура, К	$Z, 10^{-3}, K^{-1}$	$\alpha, mV/K$	$\sigma, \Omega^{-1}cm^{-1}$	$\kappa, W/mK$	Тип матеріалу:	Склад матеріалу:	Довжина злитку, мм	Температура розплаву, К	Температура відпалу, К	Час відпалу, год	Джерело:
308	4.57	-	-	1.21	<i>P</i>	$(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$	15	686	473-673	2-5	[3]
308	3.67	-	-	-	<i>N</i>	$Bi_2(Te_{0.94}Se_{0.06})_3$	15				[3]
298	1.27	-	-	1.38	<i>P</i>	$(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$	-	-	-	-	[4]
298	1.25	-	-	1.36	<i>N</i>	$Bi_2(Te_{0.94}Se_{0.06})_3$	-	-	-	-	[4]
298	0.91	22 1	-	1.36	<i>P</i>	$(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$	15	-	673	5	[5]
298	1.09	22 3	-	1.65	<i>N</i>	$Bi_2(Te_{0.94}Se_{0.06})_3$	15	-	673	5	[5]
473	-	-	-	-	<i>P</i>	$Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te_{3.0}$	-	923	-	-	[6]

Продовження таблиці 1

300	2.8	17 1	1910	10.2	<i>N</i>	$Bi_2Te_{1.5}Se_{1.5}$	-	-	600	120 0	[7]
300	2.7	16 1	2120	9.5	<i>N</i>	$Bi_{1.9998}Sn_{0.0002}Te_{1.5}Se_{1.5}$	-	-	600	120 0	[7]
300	3	16 3	2320	8.9	<i>N</i>	$Bi_{1.9996}Sn_{0.0004}Te_{1.5}Se_{1.5}$	-	-	600	120 0	[7]

Всі данні в таблиці були впроваджені в програмний продукт для опису технологій та властивостей термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te*. Оновлення бази даних програмного продукту буде описано в подальших статтях.

Теорія лінійної інтерполяції

Інтерполювання у загальному розумінні є спосіб обчислення тих чи інших проміжних значень будь-якої досліджуваної величини за набором відомих значень.

Якщо досліджуваний процес можна описати лінійною функцією, процедура розрахунку невідомих параметрів порівняно з іншими випадками розрахунку може бути значно спрощена. Математичне моделювання різних виробничих ситуацій інженерної та наукової практичності методами лінійної інтерполяції передбачає можливість математичного прогнозування через виявлення значення інтерпольованої координати Y за заданим параметром координати X при відомих координатах двох точок лінійної функції.[8]

Для успішного управління потрібно передбачити, як поводитиметься та чи інша система в рамках існуючого описуваного відповідною лінійною функцією процесу. Перша точка лінійної функції має координати X_0, Y_0 , друга – X_1, Y_1 , результативна інтерпольована координата Y , що розраховується, за заданим значенням координати X обчислюється за формулою 2:

$$Y = ((X - X_0) \times (Y_1 - Y_0) \div (X_1 - X_0)) + Y_0, \quad (2)$$

Подальший розвитку програмного продукту для опису технологій та властивостей термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te*.

Наразі в програмний продукт для опису технологій отримання та характеристик термоелектричного матеріалу на основі сполук *Bi-Te*, була впроваджена функція теоретичного розрахунку невідомих значень α та δ за допомогою інтерполяції. Загальний алгоритм роботи даної функції наступний.

- Виклик користувачем функції Інтерполяції.
- Створення динамічної форми, та всіх її компонентів, для проведення інтерполяції.
- Після вводу користувачем необхідної робочої температури, програма здійснює пошук в базі

даних матеріалу в діапазон робочих характеристик, якого може увійти шукане значення. Для здійснення цього виконується наступний алгоритм рис. 1.

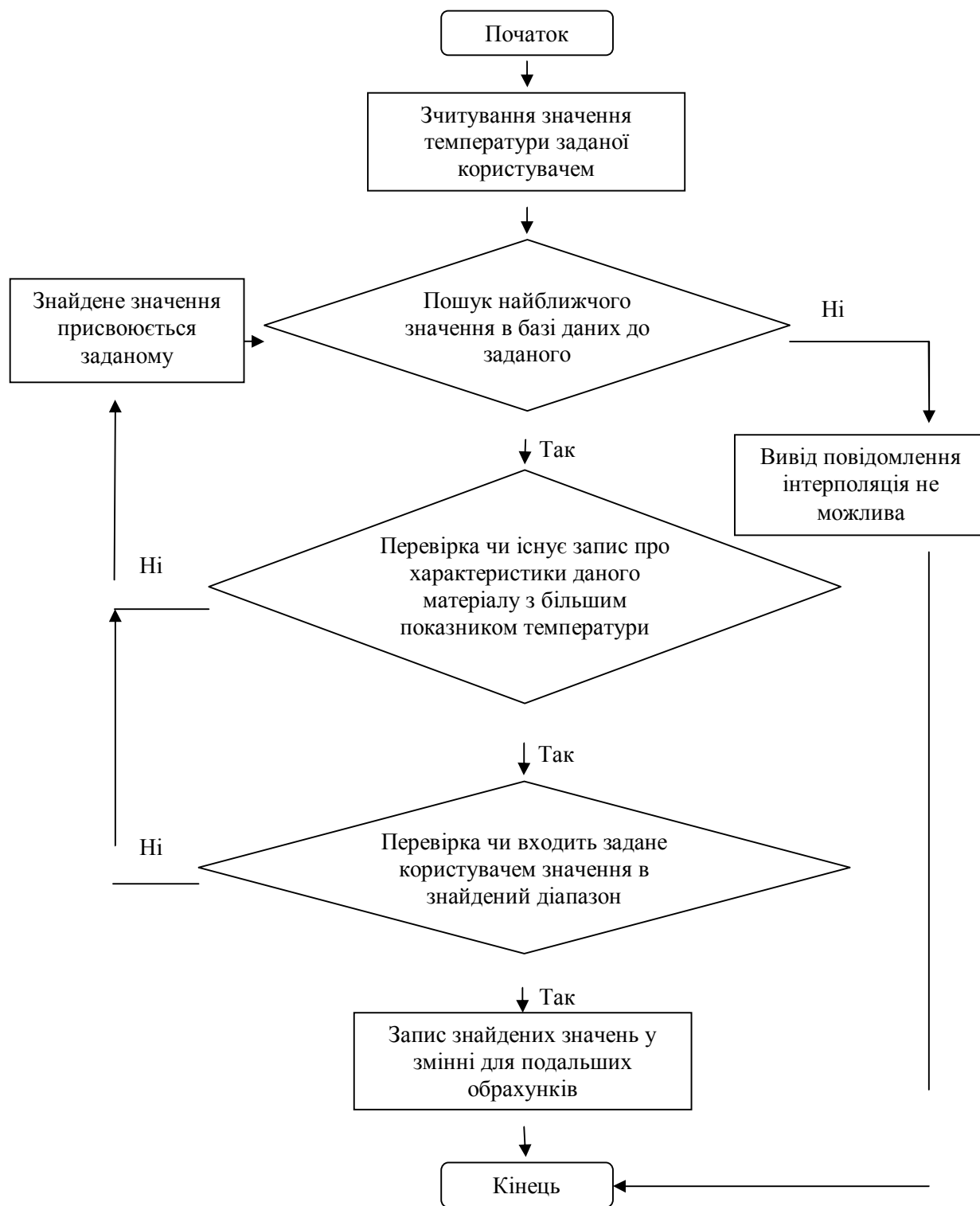


Рис. 1. Алгоритм пошуку оптимального матеріалу для виконання інтерполяції.

- Після підбору оптимального матеріалу програма розраховує значення коефіцієнту α за формулою лінійної інтерполяції.

- На основі отриманого результату програма будує графік залежності α від температури.
- Отримавши результати α програма розраховує значення δ за формулою лінійної інтерполяції.
- На основі отриманого результату програма будує графік залежності δ від температури.
- Отримані результати також виводяться в Label.
- Після завершення роботи користувачем програма видаляє всі компоненти форми та саму форму.

Загальний вигляд вікна інтерполяції значень представлено на рис. 1.

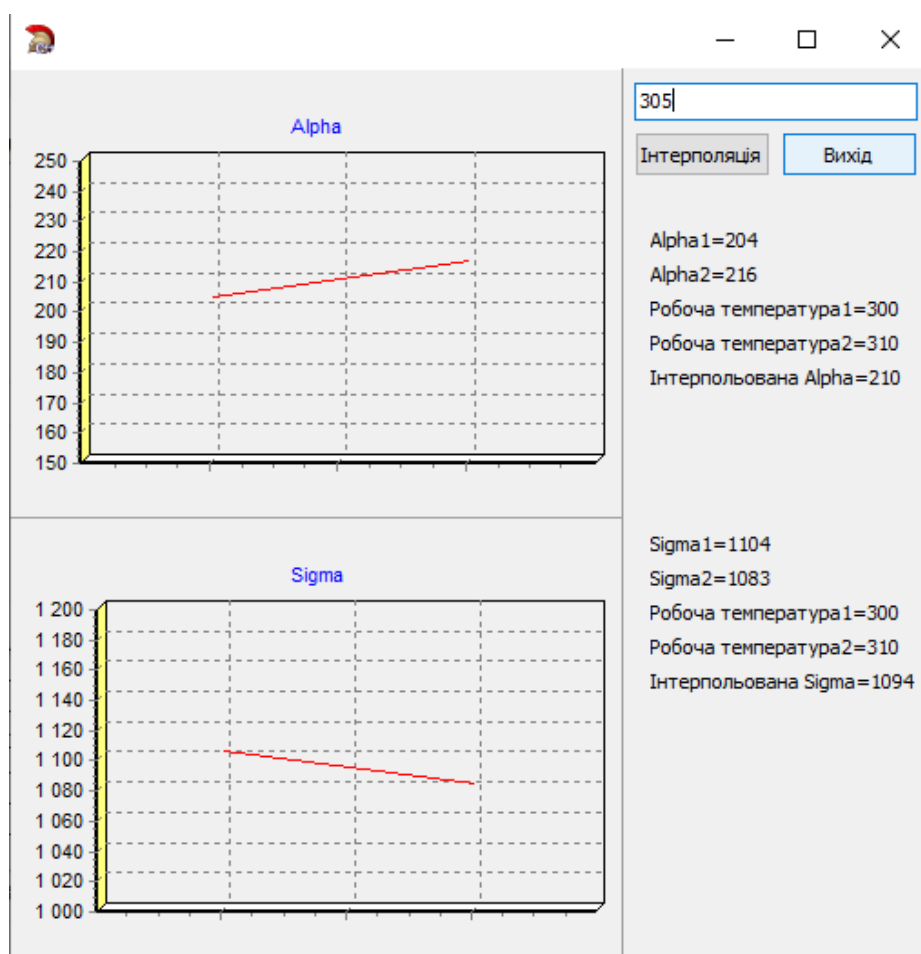


Рис. 2. Загальний вигляд вікна інтерполяції значень.

Подальший розвиток програмного продукту буде описано в майбутніх статтях.

Висновки

1. Проведено дослідження літературних джерел в яких описуються термоелектричні матеріали на основі *Bi-Te* отримані методом Бріджмена.

2. Дані дослідження були додані до бази даних програмного продукту для опису технологій та властивостей отримання термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te*.
3. Ведена функція інтерполяції в програмний продукт для опису технологій та властивостей отримання термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te*.
4. Подальші версії програмного продукту будуть описані в наступних статтях.

Література

1. O. Yamashita, H. Odahara. Influence of annealing on the distribution of thermoelectric figure of merit in bismuth-telluride ingots. // - 2006. – P. 323-331.
2. Гольцман Б.М., Кудинов Б.А., Смирнов И.А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 . М.: Наука, 1972. 320с.
3. Osamu Yamashita and Shoichi Tomiyoshi. Bismuth telluride compounds with high thermoelectric figures of merit. // Journal of Applied Physics. - Vol. 93. – No. 1. – 2003.
4. Osamu Yamashita, Takahiro Ochi, Hirotaka Odahara. Effect of the cooling rate on the thermoelectric properties of *p*-type $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ and *n*-type $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.94}\text{Se}_{0.06})_3$ after melting in the bismuth–telluride system. // Materials Research Bulletin.
5. O. Yamashita. High-performance bismuth-telluride compounds with highly stable thermoelectric figure of merit. // Journal of materials science. – 2005. – P. 6439 – 6444.
6. Osamu Yamashita and Shoichi Tomiyoshi. Effect of annealing on thermoelectric properties of bismuth telluride compounds doped with various additives. // Journal of Applied Physics. – Vol. 95. – No. 1. – 2004.
7. Г. Р. Гурбанов, М. Б. Адыгезалова. Электрофизические свойства твердого раствора $\text{Bi}_2\text{Te}_{1.5}\text{Se}_{1.5}$, легированного оловом. // Неорганические материалы. – 2020. – Том 56. – № 6. С. 583–587
8. А.П. Полищук, С. А. Семериков. (1999). Методы вычислений в классах языка C++. Кривой Рог: Издательский отдел КГПИ.

Автори виражають подяку академіку НАНУ Анагичуку Лук'яну Івановичу за запропоновану тему статті.

Надійшли до редакції: 12.07.2021

Рыбчаков Д.Е., Сербин М.В.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatyach@gmail.com

**КОМП'ЮТЕРНИЙ МЕТОД ОПИСУ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ВЛАСТИВОСТЕЙ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ
НА ОСНОВІ Bi_2-Te_3 , ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ БРІДЖМЕНА**

У даній роботі наводяться результати дослідження літературних джерел, в яких описуються технології та властивості термоелектричних матеріалів, отриманих методом Бриджмена. Наводяться результати одного з етапів створення програмного продукту для опису технологій виробництва та властивостей термоелектричного матеріалу на основі сполуки $Bi-Te$. Бібл. 8. рис. 2. табл. 1.

Ключові слова: метод Бриджмена, інтерполяція, телурид вісмуту.

Rybchakov D.E., Serbyn M.V.

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatyach@gmail.com

**COMPUTER METHOD OF DESCRIPTION OF THE
TECHNOLOGIES AND PROPERTIES OF Bi_2-Te_3 , BASED
THERMOELECTRIC MATERIALS OBTAINED
BY THE BRIDGMAN METHOD**

This paper presents the results of the study of literary sources describing the technologies and properties of thermoelectric materials obtained by the Bridgman method. The results of one of the stages of creating a software product for the description of the production technologies and properties of a thermoelectric material based on $Bi-Te$ compounds are given. Bibl. 8, Fig. 2, Table 1.

Key words: Bridgman method, interpolation, bismuth telluride.

References

1. Yamashita O., Odahara H. (2006). *Influence of annealing on the distribution of thermoelectric figure of merit in bismuth telluride ingots.*
2. Goltsman B.M., Kudinov B.A., Smirnov I.A. (1972). *Poluprovodnikovye termoelektricheskie materialy na osnove Bi_2Te_3 [Semiconductor thermoelectric materials based on Bi_2Te_3].* Moscow: Nauka [in Russian].

3. Yamashita Osamu and Tomiyoshi Shoichi. (2003). Bismuth telluride compounds with high thermoelectric figures of merit. *Journal of Applied Physics*, 93(1).
4. Osamu Yamashita, Takahiro Ochi, Hirotaka Odahara. Effect of the cooling rate on the thermoelectric properties of p-type $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ and n-type $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.94}\text{Se}_{0.06})_3$ after melting in the bismuth–telluride system. *Materials Research Bulletin*. – 44(6): 1352-1359.
5. Yamashita O. (2005). High-performance bismuth-telluride compounds with highly stable thermoelectric figure of merit. *Journal of Materials Science*, 6439 – 6444.
6. Yamashita Osamu and Tomiyoshi Shoichi. (2004). Effect of annealing on the thermoelectric properties of bismuth telluride compounds doped with various additives. *Journal of Applied Physics*, 95(1).
7. Gurbanov G.R., Adygezalova M.B. (2020). Electrophysical properties of $\text{Bi}_2\text{Te}_{1.5}\text{Se}_{1.5}$ solid solution doped with tin. *Inorganic Materials*, 56(6), 583–587
8. Polishchuk A.P., Semerikov S.A. (1999). *Calculation methods in C++ language classes*. Kryvyi Rig: Publishing Department of KSPI [in Russian].

Submitted: 12.07.2021

УДК 536.24



Микитюк П.Д.

Микитюк П.Д. канд. фіз.-мат. наук^{1,2}
Микитюк О.Ю. канд. фіз.-мат. наук, доцент³



Микитюк О.Ю.

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул.
Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
e-mail: anatykh@gmail.com

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

³Вищий державний навчальний заклад України
«Буковинський державний медичний університет»,
Театральна площа, 2, Чернівці, 58002, Україна

ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ТЕРМОПАРИ ДЛЯ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МЕТРОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У даній роботі розглянуто способи збільшення чутливості термоелектричного перетворювача метрологічного призначення за рахунок конструктивних удосконалень термоелектричного перетворювача та оптимізації теплових режимів роботи. Показано особливості вимог до термоелектричного матеріалу, призначеного для конструювання термоелектричних перетворювачів як вимірювальних приладів. Бібл. 11, рис. 1.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач, нагрівник, термопара, чутливість, термоелектричний матеріал

Вступ

Створення високоточних приладів для вимірювання величин змінного струму є важливим завданням сучасного термоелектричного приладобудування. Підвищення чутливості таких приладів безпосередньо пов'язане з підвищенням чутливості термоелектричного перетворювача (ТП) метрологічного призначення.

Збільшення чутливості ТП, в основному, досягається за рахунок покращання параметрів термоелектричного матеріалу (ТЕМ). Однак, поряд з пошуком нових ТЕМ і покращанням якості відомих матеріалів, можливості збільшення добротності (z) яких на даному етапі практично вичерпані, існують можливості підвищення параметрів ТП за рахунок їх конструктивних удосконалень, оптимізації теплових режимів роботи з метою збільшення ефективності

використання тепла, що виділяється нагрівником ТП. Актуальним залишається завдання оптимального застосування ТЕМ саме для ТП, оскільки у даному випадку існує суттєва відмінність від використання ТЕМ для інших термоелектричних пристроїв – термогенераторів (ТЕГ), приймачів випромінювання, охолоджувачів та ін.

Тому важливим завданням і метою даної роботи є встановлення особливостей застосування ТЕМ саме при розробці ТП.

Відмінності у виборі ТЕМ для різних типів термоелектричних пристроїв.

Відомо [2], що застосування напівпровідникового матеріалу для перетворювачів теплової енергії в електричну привело до різкого покращання їхнього коефіцієнту корисної дії (ККД) і створило хороші передумови для широкого використання таких перетворювачів. У значно меншій мірі вивчені можливості покращання параметрів ТП метрологічного призначення. Часто спроби використання термоелектричних матеріалів (ТЕМ), розроблених для енергетичних використань не мали очікуваного успіху. Це зумовлено тим, що ТЕМ, призначені для виміральної техніки і метрології, повинні відповідати ряду додаткових вимог, що не враховуються при розробці ТЕМ для інших застосувань. Наприклад, для ТЕГ, термоелектричних холодильників (ТЕО) і пристроїв термоелектричного нагрівання.

При виборі ТЕМ для термопари ТП видозмінюються критерії оптимізації ТЕМ. В ТЕГ, ТЕО і пристроях для термоелектричного нагрівання, основним параметром, що визначає їх якість є ККД. Для ТЕГ ККД (η_{\max}) в режимі максимальної потужності визначається виразом [3]:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{2} \frac{T_1 - T_2}{T_1 + \frac{2}{z} - \frac{1}{4}(T_1 - T_2)}, \quad (1)$$

де T_1 і T_2 – температури гарячих і холодних спаїв, відповідно, z – термоелектрична добротність ТЕМ, що визначається за формулою:

$$z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi}, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт термоЕРС, σ – електропровідність, χ – теплопровідність.

Для характеристики ТЕО використовують холодильний коефіцієнт ε_{\max} , що визначається з рівняння [4]:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{\sqrt{1 + 0.5z(T_1 + T_2)} - T_1/T_2}{\sqrt{1 + 0.5z(T_1 + T_2)} + T_1/T_2}. \quad (3)$$

Опалювальний коефіцієнт K_T для пристроїв термоелектричного нагрівання визначається так [5]:

$$K_T = \frac{1}{4} \left(\frac{T_2}{2} - \frac{T_1 - T_2}{zT_2} \right). \quad (4)$$

Формули (1), (2), (3), (4) залишаються правильними незалежно від того, який тип пристрою із вищезгаданих розглядається. У цих формулах основним параметром, що характеризує ефективність пристрою, є z . Тому основною вимогою, що висувається до ТЕМ, є досягнення максимально можливого значення z .

Іншою, не менш важливою, вимогою є збереження добротності ТЕМ у широкому інтервалі температури.

Лише для невеликої групи вимірювальних приладів – приймачів випромінювання, мікрокалориметрів, термопар – знайдено співвідношення, з яких визначається зв'язок між параметрами ТЕМ і основними характеристиками пристрою з врахуванням можливості досягнення ними граничних значень, обмежених лише тепловими і температурними шумами [5].

Основними параметрами, що описують приймачі випромінювання, є здатність до виявлення сигналу та вольт-ватна чутливість. Для мікрокалориметрів вводяться аналогічні параметри. Ці параметри давно досліджені і описані в роботах [3, 4]. Математичні вирази для визначення цих параметрів не враховують цілий ряд додаткових факторів, властивих різним термоелектричним пристроям. Вирази для реальних конструкцій є значно складнішими [5]. В них у різних комбінаціях входять параметри ТЕМ: α , σ , x . Крім вимог досягнення максимальної чутливості до ТЕМ та ТП висувається і ряд додаткових умов: стабільність у заданому діапазоні температури, висока часова стабільність та ін.

Із наведеного видно, що вимоги, котрі висуваються до ТЕМ, призначених для ТЕГ, ТЕО і теплових насосів, суттєво відрізняються від вимог до ТЕМ, призначених для конструювання ТП як вимірювальних приладів. Наприклад, добротність ТЕМ є визначальною для ТЕГ і її ККД при малих значеннях zT залежить від добротності a законом, близьким до лінійного. Тоді як для вимірювальних приладів вирази, в які входить z , визначаються степеневою залежністю [6] і іншими коефіцієнтами. З цієї причини умови оптимізації ТЕМ для досягнення максимального значення чутливості, швидкодії та ін., будуть відрізнятися між собою. Крім того має місце відмінність у вимогах до ТЕМ і для різних вимірювальних приладів [7]. Через це не може бути створений універсальний ТЕМ, придатний для різних термоелектричних виробів.

У вимірювальних системах з використанням ТП, котра в значній мірі визначається властивостями ТЕМ. Однак, вимоги, що висуваються до ТЕМ для досягнення гранично важливих параметрів ТП, або не в повній мірі досліджені та визначені, або вибираються з міркувань, що не завжди впливають із фізичних принципів роботи ТП, а обумовлені експлуатаційними підходами. У зв'язку з цим часто виникають труднощі з вибором оптимального варіанту ТЕМ для ТП.

Зв'язок основних параметрів ТП з властивостями ТЕМ

Для визначення методики вибору і оптимізації ТЕМ для ТП розглянемо основні параметри ТП.

Найвпливовішими параметрами, що описують властивості ТП, є ті, що визначають зв'язок між вихідними величинами (сила струму, напруга) і вихідними (термоЕРС термопари, термоелектричний струм, потужність в колі термопари). Для опису цього зв'язку в літературі [5] прийняті:

а) чутливість $S_I = \frac{\partial E_T}{\partial I_H}$, як відношення приросту термоЕРС термопари E_T до приросту

струму I_H через нагрівник ;

б) чутливість $S_U = \frac{\partial E_T}{\partial U_H}$, як відношення приросту термоЕРС термопари E_T до приросту

напруги U_H ;

в) чутливість $S_W = \frac{E_T}{P_H}$, як відношення E_T до потужності P_H , що розсіюється нагрівником.

Для визначення S_I і S_U використовують формули [10, 11]:

$$S_I = 2K_1 I_H, \quad (5)$$

$$S_U = 2K_2 U_H. \quad (6)$$

Коефіцієнти перетворення K_1 і K_2 зв'язані співвідношенням:

$$K_I = K_2 R_H^2, \quad (7)$$

де R_H – опір нагрівника.

Коефіцієнт перетворення K_I наближено можна записати у вигляді [10]:

$$K_I = \frac{\alpha R_H}{S \lambda}, \quad (8)$$

де S – поверхня теплообміну, λ – коефіцієнт теплопровідності.

Вирази (5) і (6) для чутливості S_I і S_U включають лише один параметр ТЕМ – α . Формули (5) і (7) вірні тільки для деяких типів ТП, у яких відвід тепла нагрівником значно більший, ніж відвід тепла термопарою.

У більшості конструкцій ТП термопара і нагрівник подібні як за геометричними розмірами, так і за теплофізичними параметрами матеріалів. При цьому, як показано у [8], теплопровідність

термопар впливає на розподіл температури вздовж нагрівника. Тому вирази (5) і (6) не повністю враховують фізичні процеси, що мають місце в ТП.

Вольт-ватна чутливість [9] для малих перепадів температури дорівнює

$$S_W = \frac{\alpha r_T}{S\lambda}, \quad (9)$$

де r_T – тепловий опір термопар, який визначається за формулою:

$$r_T = \frac{l_T}{\chi S_T}, \quad (10)$$

де l_T і S_T – довжина і переріз вітки термопар.

Вольт-ватна чутливість зв'язана з коефіцієнтом перетворення K_I співвідношенням:

$$S_W = \frac{K_I}{R_H}. \quad (11)$$

З врахуванням (11) загальний вираз для чутливості ТП можна записати у вигляді:

$$S_I = \frac{r_\alpha r_T R_H I_H}{S\lambda}. \quad (12)$$

Таким чином вираз (12) визначає зв'язок між основними параметрами термопар. Із формули (12) видно, що S_I дозволяє з більшою визначеністю встановити залежність властивостей ТП від параметрів ТЕМ, однак і чутливість S_I не характеризує їх у повній мірі.

Для найповнішого визначення залежності параметрів ТП від властивостей ТЕМ введемо параметр чутливості

$$S_\eta = \frac{P}{P_H}, \quad (13)$$

Який є відношенням потужності, отриманої на електричному навантаженні термоелементу до підведеної до ТП електричної потужності змінного струму. Для знаходження S_η розглянемо еквівалентну схему безконтактного ТП з навантаженням r_H , рис. 1.

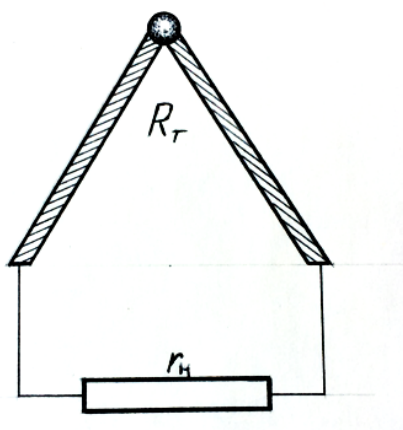


Рис. 1. Схема безконтактного ТП з навантаженням.

Якщо опір навантаження узгоджений з опором термопар ($r_H = R_T$), то ТП працює в режимі близькому до режиму максимального ККД і тоді

$$S_\eta = \frac{E_T^2}{4R_T R_H I_H^2}. \quad (14)$$

З іншої сторони ват-ватна чутливість S_η може бути записана через теплофізичні параметри ТЕМ термопар у вигляді:

$$S_\eta = \frac{z(T_1 - T_2)}{4F_p}, \quad (15)$$

де F_p – коефіцієнт, що характеризує раціональність використання тепла, що виділяється нагрівником у ТП. Причому

$$F_p = \frac{2P_H r_T}{T_1 - T_2}. \quad (16)$$

Формула (15) згідно [3] відповідає виразу для ККД ТЕГ при умові малих перепадів температури в термопарі та при умові, що параметри ТЕМ для термопар не залежать від температури. Більше того, вираз для S_η може бути записаний [5] у вигляді:

$$S_\eta = \eta = \frac{(T_1 - T_2)\sqrt{1 + zT} - 1}{(T_1\sqrt{1 + zT} - T/T_1)F_p}. \quad (17)$$

Із аналізу (15) і (17) слідує, що основні експлуатаційні параметри ТП задаються термоелектричною добротністю $TEM z$, робочим перепадом $\Delta T = T_1 - T_2$ і коефіцієнтом F_p , залежним від концентрації ТП.

Отже, збільшення чутливості ТП може досягатися як збільшенням z і ΔT , так і зменшенням коефіцієнту F_p . Однак, збільшення ΔT однозначно погіршує параметри ТП: квадратичність перетворення (коефіцієнт K_1 у формулі (5) стає залежним від температури), здатності до перевантажень по струму, стабільність у часі через старіння металу нагрівника та прискорення процесів дифузії на спаях термопар. Тому суттєве збільшення ΔT є недоцільним.

Оцінка раціональності конструкції ТП, що враховує можливість зменшення теплових втрат за рахунок вакуумізації корпусу ТП або наповнення його інертними газами з малою теплопровідністю (наприклад, ксеноном) [10], оптимальне співвідношення геометричних розмірів нагрівника і термопар, використання нагрівника зі змінним перерізом [11], що оптимізує використання тепла від нагрівника та ін. суттєво покращують параметри ТП. Але основне збільшення чутливості все ж забезпечується шляхом використанням TEM із максимальним значенням z і коефіцієнтом термоЕРС α .

Висновок

Поєднання різних варіантів підвищення параметрів ТП з використанням ефективних матеріалів на основі Bi_2Te_3 створює сприятливі можливості для розробки ТП з граничними значеннями чутливості.

Література

1. Анатичук Л. І. Диференційний термоелектричний перетворювач змінного струму в режимі різночасового компарування / Л. І. Анатичук, Р. В. Кузь, Д. Д. Ташук. // Термоелектрика. – 2015. – №4. – С. 77–82.
2. Анатичук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Л. И. Анатичук. – Київ: Наукова думка, 1979. – 766 с.
3. Охотин А. С. Термоэлектрические генераторы / А.С. Охотин, А. А. Ефремов, В. С. Охотин. – М.: Атомиздат, 1971. – 288 с.
4. Коленко Е. А. Термоэлектрические охлаждающие приборы / Е. А. Коленко. – Л.: Наука, 1967. – 282 с.
5. Анатичук Л. И. Термоэлектрические преобразователи энергии. Том II / Л. И. Анатичук. – Киев-Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. – 376 с.
6. Шоль Ж., Марфон И., Монш М и др. Приемники инфракрасного излучения. – М.: Мир, 1969. – 269 с.
7. Ando E. Radiation Thermocouples with $(BiSb)_2 (TeSe)_3$. Jap. J. Appl. Phys. 13,N5, 1974, P. 363-369.
8. Микитюк П. Д. Про вплив термопар на розподіл температури в нагрівнику вимірювального

термоперетворювача / П. Д. Микитюк, О. Ю. Микитюк. // Термоелектрика. – 2018. – №1. – С. 64–59.

9. Анатичук Л.И. Монографія. Фізика термоелектричества. Том I. 2008. –388 с.
10. Микитюк П. Д. Про фактори впливу на точність термоперетворювачів / П. Д. Микитюк. // Термоелектрика. – 2017. – №5. – С. 76–83.
11. Микитюк П. Д. Розподіл температури в нагрівнику зі змінним поперечним перерізом у термоелектричному перетворювачі / П. Д. Микитюк, О. Ю. Микитюк. // Термоелектрика. – 2018. – №2. – С. 79–74.

Надійшли до редакції: 17.06.2021

Микитюк П.Д., канд. физ.-мат. наук^{1,2}

Микитюк О.Ю., канд. физ.-мат. наук, доцент³

¹Институт термоелектричества НАН и МОН України,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatyck@gmail.com;

²Черновицкий национальный университет
имени Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского,
2, Черновцы, 58012, Украина;

³Высшее государственное учебное заведение Украины
«Буковинский государственный медицинский университет»,
Театральная площадь, 2, Черновцы, 58002, Украина

К ВОПРОСУ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ТЕРМОПАРЫ ДЛЯ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В данной работе рассмотрены способы увеличения чувствительности термоэлектрического преобразователя метрологического назначения за счет конструктивных усовершенствований термоэлектрического преобразователя и оптимизации тепловых режимов работы. Показаны особенности требований к термоэлектрическому материалу, предназначенному для конструирования термоэлектрических преобразователей как измерительных приборов. Бібл. 11, рис. 1.

Ключевые слова: термоэлектрический преобразователь, нагреватель, термопара, чувствительность, термоэлектрический материал

P.D. Mykytiuk. *cand. phys.-math. sciences*^{1,2},
O.Yu. Mykytiuk. *cand. phys.-math. sciences, docent*³,

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str, Chernivtsi, 58029, Ukraine;
e-mail: anatykh@gmail.com;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

³Higher State Educational Institution of Ukraine
“Bukovinian State Medical University”, 2,
Theatre Square, Chernivtsi, 58002, Ukraine

ON THE ISSUE OF CHOOSING THERMOCOUPLE MATERIAL FOR THERMAL CONVERTERS OF METROLOGICAL PURPOSE

In this paper, we consider ways to increase the sensitivity of a thermoelectric converter for metrological purposes due to design improvements in the thermoelectric converter and optimization of thermal operating modes. The features of the requirements for thermoelectric material intended for designing thermoelectric converters as measuring instruments are shown. Bibl. 11, Fig. 1.

Key words: thermoelectric converter, heater, thermocouple, sensitivity, thermoelectric material

References

1. Anatykhuk L.I., Kuz R.V., Tashchuk D.D. (2015). Differential thermoelectric AC converter in the non-simultaneous comparison mode. *J. Thermoelectricity*, 4, 77–82.
2. Anatykhuk L.I. (1979). *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva [Thermoelements and thermoelectric devices]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
3. Okhotin A.S., Yefremov A.A., Okhotin V.S. (1971). *Termoelektricheskiye generatory [Thermoelectric generators]*. Moscow: Atomizdat [in Russian].
4. Kolenko E. A. (1967). *Termoelektricheskiye okhlazhdaiushchiye pribory [Thermoelectric cooling devices]*. – Leningrad: Nauka [in Russian].
5. Anatykhuk L.I. (2003). *Termoelektrichestvo. T.II, Termoelektricheskiye preobrazovateli energii [Thermoelectricity. Vol.II. Thermoelectric power converters]*. Kyiv-Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity [in Russian].
6. Schol J., Marfon I., Monsh M., et al. (1969). *Piiomniki infrakrasnogo izlucheniia [Infrared radiation receivers]*. Moscow: Mir [Russian Transl.].
7. Ando E. (1974). Radiation thermocouples with $(\text{BiSb})_2(\text{TeSe})_3$. *Jap. J. Appl. Phys.* 13 (5), 363-369.

8. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Impact of thermocouple on temperature distribution in the heater of measuring thermal converter. *J. Thermoelectricity*, 1, 64–59.
9. Anatyshuk L.I. (2008). *Termoelektrichestvo. T.I. Fizika termoelektrichestva Thermoelectricity. Vol.I. Physics of thermoelectricity* [in Russian].
10. Mykytiuk P.D. (2017). Factors of influence on the accuracy of thermal converters. *J. Thermoelectricity*, 5, 76–83.
11. Mykytiuk P.D., Mykytiuk O.Yu. (2018). Temperature distribution in a heater with a variable section in a thermoelectric converter, *J. Thermoelectricity*, 2, 79–74.

Submitted: 17.06.2021

УДК 53.082

Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{1,2}

Гаврилук М.В.¹

Лисько В.В. *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна, *e-mail: anatysh@gmail.com*;

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

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЯ
ПРОЦЕСІВ ВИМІРЮВАНЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ У СКЛАДІ ГЕНЕРАТОРНИХ
ТА ХОЛОДИЛЬНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ**

Представлено результати розробки системи автоматизації процесу вимірювань термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів абсолютним методом. Блок керування вимірюваннями побудовано на основі багатоканального аналогово-цифрового перетворювача. Обробка та відображення результатів вимірювань проводяться за допомогою комп'ютера, до якого блок вимірювань підключається по стандартному каналу USB. Результати відображаються у вигляді графіків і таблиць. Розроблена система автоматизації є універсальною та дозволяє реалізовувати вимірювання термоелектричних властивостей матеріалів як у складі генераторних, так і у складі холодильних термоелектричних модулів. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, термоелектричний матеріал, автоматизація, комп'ютеризація.

Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Відомо, що контроль якості термоелектричних перетворювачів енергії (модулів) відіграє важливу роль як при їх розробці, так і при створенні на основі цих модулів термоелектричних приладів для охолодження та генерації електричної енергії. Такий контроль здійснюється шляхом вимірювання параметрів термоелектричних модулів – холодопродуктивності, холодильного коефіцієнту та перепаду температур на модулі для термоелектричних охолоджувачів; ККД, електричної потужності – для термоелектричних генераторів. Одним з найкращих методів вимірювань при цьому є абсолютний метод [1, 2]. Основними перевагами цього методу є

визначення параметрів модулів у реальних умовах їх експлуатації та можливість інструментальної мінімізації основних джерел похибок вимірювань [3].

Крім того, абсолютний метод дозволяє додатково отримати інформацію про властивості матеріалу у складі модуля – термоЕРС, електропровідності та теплопровідності пари термоелектричних віток. Ця інформація є корисною як для оптимізації термоелектричного матеріалу для конкретних його застосувань, так і для вдосконалення конструкції модулів [4 - 6].

Реалізація цих методик вимагає повної автоматизації процесу вимірювань. Крім того, це дозволить усунути можливі суб'єктивні помилки операторів при вимірюваннях електричних сигналів, їх обробки для визначення σ , α , κ , Z , при побудові графіків та таблиць тощо.

Тому *метою роботи* було створення комп'ютеризованої системи керування вимірюваннями для автоматизації процесів визначення термоелектричних властивостей матеріалів у складі термоелектричних перетворювачів енергії, обробки і відображення їх результатів.

Вимоги до автоматизації вимірювань.

Схеми абсолютного методу, взятого за основу при створенні автоматизованого обладнання для визначення параметрів генераторних та холодильних термоелектричних модулів, наведені на рис. 1 та рис. 2. відповідно.

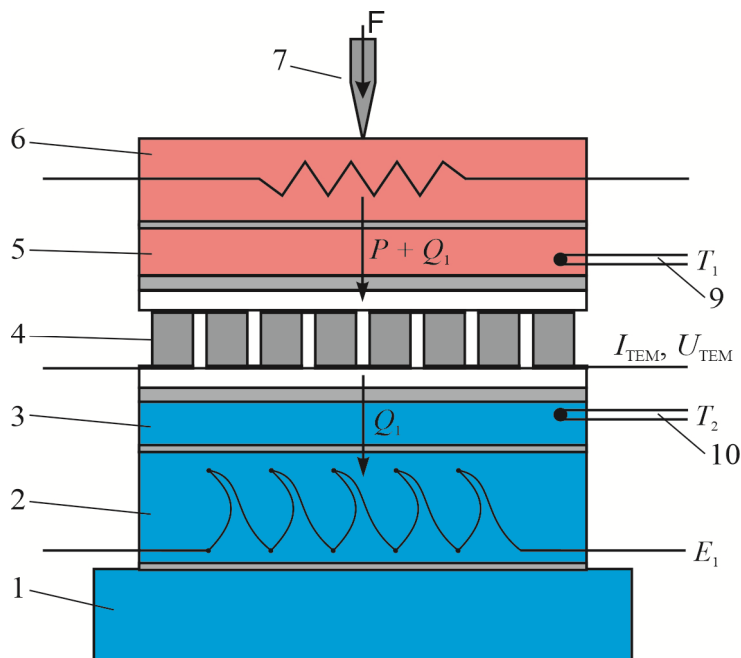


Рис. 1 Абсолютний метод вимірювання параметрів термоелектричних генераторних модулів: 1 – термостат; 2 – тепломір, 3, 5 – тепловирівнюючі пластини; 4 – досліджуваний модуль; 6 – нагрівник; 7 – притиск; 9, 10 – термопари.

Для визначення параметрів генераторного термоелектричного модуля, останній розміщується між двома тепловирівнюючими пластинами, які у свою чергу розташовані між електричним нагрівником та тепломіром (рис. 1). Тепломір другою стороною контактує з термостатом. За допомогою електричного нагрівника на модулі створюється заданий перепад температур та вимірюється ЕРС $E_{ТЕМ}$, що виникає на виводах модуля. Після цього до виводів модуля підключається узгоджене електричне навантаження, при якому напруга на виводах модуля стане рівною половині ЕРС.

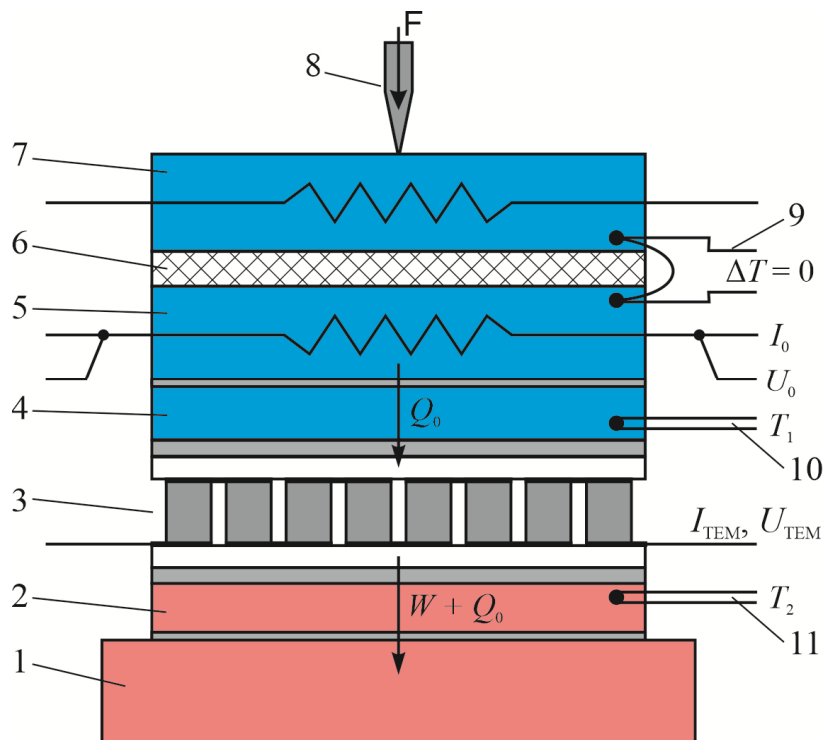


Рис. 2 Абсолютний метод вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження: 1 – термостат; 2, 4 – тепловирівнюючі пластини; 3 – досліджуваний модуль; 5 – еталонний нагрівник; 6 – теплоізоляція; 7 – захисний нагрівник; 8 – притиск; 9 – нуль-термопара; 10, 11 – термопари.

Вимірюються величини електричного струму $I_{ТЕМ}$, що проходить через модуль, напруги на його виводах $U_{ТЕМ}$ та за допомогою тепломіра визначається величина теплового потоку Q_1 , що відводиться від холодної сторони модуля до термостату. Електрична потужність модуля P та його ККД η визначаються за формулами

$$P = I_{ТЕМ} \cdot U_{ТЕМ} , \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P}{Q_1 + P_{ТЕМ}} . \quad (2)$$

де $I_{\text{ТЕМ}}$ та $U_{\text{ТЕМ}}$ – струм та напруга модуля, Q_1 – тепловий потік, що відводиться від холодної сторони модуля та визначається за допомогою тепломіра, F – притиск.

При визначенні параметрів модулів охолодження додатково використовується захисний нагрівник, що запобігає втратам тепла з нагрівника через притискний механізм (рис. 2). Величини холодопродуктивності Q_0 , перепаду температур ΔT та холодильного коефіцієнту ε визначаються по формулам

$$Q_0 = I_0 \cdot U_0, \quad (3)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W}, \quad (5)$$

де I_0 та U_0 – струм через нагрівник та спад напруги на ньому, T_1 – температура «холодної» сторони модуля, T_2 – температура «гарячої» сторони модуля, W – споживана модулем електрична потужність.

Для знаходження властивостей термоелектричного матеріалу у складі модулів використано методику, детально описану у роботах [4, 6]

Усереднені значення електропровідність, термоЕРС, теплопровідності та добротності матеріалу віток термоелектричного модуля визначаються за формулами

$$\sigma = \frac{1}{R_M / 2N} \frac{h_1}{a_1 \cdot b_1} \cdot K_1, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{E / 2N}{\Delta T} \cdot K_2, \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{Q / 2N}{\Delta T} \frac{h_1}{a_1 \cdot b_1} \cdot K_3, \quad (8)$$

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (9)$$

де R_M – опір модуля, виміряний на змінному струмі; $a_1 \times b_1$ – переріз віток; h_1 – висота віток; N – кількість пар; E – ЕРС модуля; ΔT – різниця температур між термопарами, розташованими на тепловирівнюючих пластинах, між якими знаходиться досліджуваний модуль; Q – тепловий потік через модуль; $K_1 - K_3$ – поправочні коефіцієнти для зменшення величини похибок вимірювань,

розраховані для заданої конструкції модуля та вимірювального обладнання або визначені експериментально.

Для реалізації такого методу система керування вимірюваннями повинна мати:

- засоби задання та підтримання температури вимірювального термостату у широкому інтервалі температур (терморегулятор, блок живлення, контрольна термопара тощо);
- регульований блок живлення для пропускання струму через модуль, комутатор струму;
- регульований блок живлення еталонного нагрівника;
- засоби підтримання нульового перепаду температур між еталонним нагрівником та захисним екраном (терморегулятор, блок живлення, контрольна нуль-термопара тощо);
- високоточний вимірювач напруги з розрізною здатністю не менше 1 мкВ;
- можливість відпрацювання необхідної циклограми включення/виключення блоків живлення та запису результатів вимірювання всіх вимірювальних каналів (температур «гарячої» та «холодної» термопар, спаду напруги між модулі, величин струму та напруги через модуль, струму та напруги живлення еталонного нагрівника тощо);
- можливість передавання результатів вимірювань на комп'ютер для їх подальшої обробки, побудови графіків та таблиць, формування паспорту модуля.

Опис системи керування вимірюваннями.

Розроблено універсальні блоки, які мають дискретні входи управління і відповідні аналогові виходи. Комбінуючи ці блоки і керуючи ними по необхідних циклограмах за допомогою програмованого контролера, можна створити різні установки, що дозволяють здійснити будь-який спосіб вимірювання параметрів термоелектричних модулів.

Блок-схема системи автоматизації вимірювань параметрів термоелектричних модулів наведена на рис. 3. Вона побудована на основі 4-канального аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) з диференціальними входами, діапазон вимірюваних напруг якого – $\pm (5 \text{ мкВ} - 2.5 \text{ В})$. Диференціальні входи АЦП дозволяють проводити високоточні вимірювання напруг в електричних колах різних блоків, які можуть мати різні джерела живлення.

До складу системи також входять електронне навантаження 18, в якому використана лінійка сучасних польових транзисторів, виготовлених за MOSFET технологією, з низьким опором у відкритому стані, що зменшує виділення на ньому тепла та дозволяє обійтися без радіаторів.

У держаку термоелектричного модуля 1 використовується змінний нагрівний теплообмінник, який містить в собі еталонний нагрівник 15, з давачем температури в тепловирівнюючій пластині 14, екранний нагрівник та диференціальну нуль-термопару. Теплообмінник через колодку 19 підключається до блоків живлення еталонного 27 та екранного 24 нагрівачів, а також до вимірювачів струму/напруги еталонного нагрівача 26 та нуль-вузла 25. Ці всі елементи входять у силовий блок 2.

Для виконання алгоритму вимірювань застосовується блок керування 3, який містить 4 – канальний прецизійний АЦП 20 та електронне навантаження 18, а також системи управління електронним навантаженням та термостатом охолодження. До системи управління електронним

навантаженням входить блок керування 22 та перетворювач струму/напруги електронного навантаження 21. До системи управління термостатом входять блоки живлення 23 елементів термостата та схеми самого блока керування. Управляє всіма елементами блока керування центральний процесор 29, який також забезпечує вивід отриманої інформації на цифровий індикатор 28. В блоці керування знаходиться силовий ключ 30 для еталонного нагрівника 15.

Термостат пристрою містить основу-радіатор 6 з вентилятором 5, водяний теплообмінник 7 із регульовальним краном води 8 та додатковий нагрівник 9. Над термостатом розташовується тепломір 10 для визначення теплового потоку. Між тепломіром та нагрівником розміщується досліджуваний термоелектричний модуль 12. Елементи термостату 7 – 11 теж можуть бути змінними, в залежності від типу досліджуваного модуля і різних умов вимірювання. Вентилятори 5 та 7, а також нагрівник 9 – допоміжні, використовуються за потреби. Нагрівний теплообмінник, модуль і термостат у держаку між собою притискуються при вимірюванні вузлом притиску, зусилля якого контролюється і визначається динамометром 13.

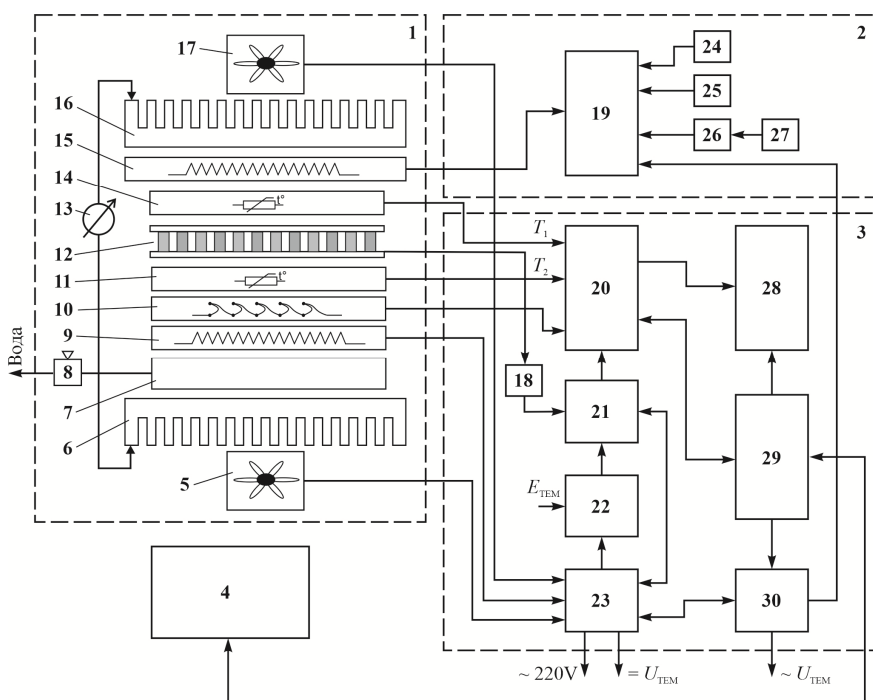


Рис. 3 Блок схема системи автоматизації вимірювань параметрів термоелектричних модулів абсолютним методом: 1 – держак термоелектричного модуля; 2 – силовий блок; 3 – блок керування; 4 – персональний комп'ютер; 5, 17 – вентилятори; 6, 16 – повітряні теплообмінники; 7 – водяний теплообмінник; 8 – кран; 9 – електричний нагрівач термостата; 10 – тепломір; 11, 14 – тепловирівнюючі пластини з вмонтованими давачами температури; 12 – досліджуваний термоелектричний модуль; 13 – динамометр; 15 – нагрівач модуля; 18 – електронне навантаження; 19 – колодка підключення нагрівачів; 20 – 4-канальний прецизійний АЦП; 21 – перетворювач струму/напруги електронного навантаження; 22 – блок керування електронним навантаженням; 23 – блок живлення термостату; 24 – блок живлення екранного нагрівача; 25 – нуль-вузол; 26 – вимірювач струму/напруги еталонного нагрівача; 27 – блок живлення еталонного нагрівача; 28 – цифровий індикатор; 29 – керуючий процесор; 30 – симісторний ключ керування нагрівачем.

Вимірювальний блок по каналу USB підключений до персонального комп'ютера 4, де задаються циклограми вимірювань, відбуваються необхідні обчислення, будуються відповідні графіки, формуються протоколи вимірювань.

Для вимірювання параметрів термоелектричного модуля на термостаті задається необхідна температура, яка підтримується на тепловирівнюючій пластині 11. Підтримка на заданому рівні температури відбувається за допомогою регулювання витрати води у теплообміннику 7 та коригуванні її додатковим нагрівником 8 за допомогою ПД-ШИМ-регулятора. Задається температура і на гарячій стороні термоелектричного модуля, яка буде визначатись за показами давача в пластині 14 нагрівного теплообмінника. На еталонний нагрівник 15, через ключ 30, подається напруга для нагріву гарячої сторони модуля до необхідної температури. Відслідковуючи сигнал нуль-термопари, екранний нагрівник автоматично нагрівається до температури гарячої сторони модуля, максимально компенсуючи таким чином теплові втрати з еталонного нагрівника. Похибка в підтримці температур - не більше $\pm 0,1$ °С. Тепловий потік, що проходить через модуль, проходить також і через тепломір, сигнал якого вимірюється АЦП. Також АЦП вимірює через блок 26 струм і напругу еталонного нагрівника

В залежності від вибраного алгоритму вимірювання, тепловий потік може визначатись як по тепломіру так і по потужності еталонного нагрівника, за умови компенсації теплових втрат екранним нагрівником. Це дозволяє реалізувати різні алгоритми вимірювання параметрів як генераторних модулів, так і модулів охолодження. Наприклад, при визначенні параметрів генераторних модулів теплова потужність від електричного нагрівника, яка проходить через модуль, генерує на його виводах електричну напругу. До моменту виходу температур на тепловирівнюючих пластинах на задані рівні, електронне навантаження відключене і за допомогою АЦП вимірюється термоЕРС модуля. Після досягнення заданого перепаду температур, по команді процесора, вмикається електронне навантаження і вимірюється струм модуля. При цьому терморегулятори термостату і нагрівного теплообмінника автоматично компенсують теплове збурення, викликане ефектом Пельтьє від дії струму модуля. Всі вимірні сигнали надходять у контролер, де нормуються до конкретних фізичних величин. Величини електричних напруг, струмів та температур виводяться на цифровий індикатор 28, а також надходять до персонального комп'ютера 4 для обчислень та побудови графіків в заданому діапазоні температур. Послідовність вимірювань та часові витримки між ними задаються у циклограмі, яку формує оператор перед початком вимірювань.

Зовнішній вигляд системи автоматизації вимірювань наведено на рис. 4.



Рис. 4. Зовнішній вигляд системи автоматизації вимірювань параметрів термоелектричних модулів.

Розроблена система є універсальною. Кількість і характеристики керуючих та вимірювальних каналів дозволяє застосовувати її і для інших методів вимірювання, наприклад, методу Хармана.

На основі розробленої системи управління було проведено автоматизацію обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних генераторних модулів розмірами від 10×10 до 72×72 мм у діапазоні температур від 30 до 600 °С та модулів охолодження аналогічних розмірів – від -50 до 100 °С, а також визначення властивостей термоелектричних матеріалів у складі цих модулів.

Висновки

1. Розроблено універсальну електронну систему керування, що дозволяє реалізовувати вимірювання параметрів термоелектричних генераторних та холодильних модулів абсолютним методом, а також визначення властивостей термоелектричних матеріалів у складі цих модулів. Автоматизоване вимірювальне обладнання на основі такої системи дозволяє проводити вимірювання для широкого діапазону робочих температур: від -50 до 100 °С – для модулів охолодження та від 30 до 600 °С – для генераторних модулів.
2. Проведено комп'ютеризацію процесу вимірювань. Обладнання, створене на основі розробленої системи керування, дозволяє виконувати вимірювання в режимі реального часу, обробляти їх результати, виводити результати вимірювань на екран у вигляді графіків і таблиць, зберігати їх на комп'ютері, роздруковувати паспорт дослідженого модуля.

Література

1. P. Kolodner. High-precision thermal and electrical characterization of thermoelectric modules // Review of Scientific Instruments. – Vol. 85, Iss. 5. – 2014. – pp. 054901/1-054901/11.
2. L.I. Anatyshuk, M.V. Havrylyuk. Procedure and Equipment for Measuring Parameters of Thermoelectric Generator Modules // Journal of Electronic Materials. – Vol. 40. – No. 5. – 2011. – pp. 1292-1297.
3. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermo-electric materials, Journal of Electronic Materials, Volume 43, Issue 10, p. 3863-3869, 2014.
4. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних термоелектричних модулів // Термоелектрика. – 2020, – №3. – С. 70-80.
5. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Визначення температурних залежностей термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних термоелектричних модулів при зростаючому перепаді температур // Термоелектрика. – 2021, №2. – С. 53-57.
6. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Методика визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження // Термоелектрика. – 2021, №3. – С. 49-54.

Надійшли до редакції: 10.06.2021

Анатичук Л.І. *акад. НАН України*

Гаврылюк Н.В.¹

Лысько В.В. *канд. физ.-мат. наук*

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, *e-mail: anatysh@gmail.com*

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

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ
В СОСТАВЕ ГЕНЕРАТОРНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МОДУЛЕЙ ПРИ ВОЗРАСТАЮЩЕМ ПЕРЕПАДЕ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Предложена методика определения термоэлектрических параметров материалов в составе генераторных термоэлектрических модулей в случае, когда холодная сторона модуля термостатирована, а перепад температуры на модуле постепенно возрастает за счет повышения температуры горячей стороны с помощью электрического нагревателя. Рассмотрена подробная физическая модель этой методики и приведены результаты оценки возможных величин погрешностей при измерениях. Библ. 9, рис. 3.

Ключевые слова: измерение, электропроводность, термоЭДС, теплопроводность, добротность, термоэлектрический модуль.

Anatyshuk L.I., *acad. National Academy
of Sciences of Ukraine*^{1,2}

M.V. Havryliuk¹

Lysko V.V., *cand. phys.-math. sciences*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatysh@gmail.com;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;

AUTOMATION AND COMPUTERIZATION OF PROCESSES OF MEASURING THERMOELECTRIC PARAMETERS OF MATERIALS FORMING PART OF GENERATOR AND COOLING THERMOELECTRIC MODULES

The results of development of automation system for measuring thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric modules by the absolute method are presented. The measurement control unit is built on the basis of a multi-channel analog-to-digital converter. Processing and display of measurement results is carried out using a computer to which the measurement unit is connected via a standard USB channel. The results are displayed in the form of graphs and tables. The developed automation system is universal and makes it possible to measure the thermoelectric properties of materials both as part of generator and as part of cooling thermoelectric modules. Bibl. 9, Fig. 3.

Key words: electrical conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, thermoelectric material, automation, computerization.

References

1. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *J. Thermoelectricity*, 1, 67-76.
2. Anatyshuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. (2012). Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 41(6), 1680-1685.
3. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Modified Harman's method. *AIP Conf. Proc.*, 1449, 373-376.
4. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 43 (10), 3863-3869.
5. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2015). Absolute method for measuring of thermoelectric properties of materials. *Materials Today: Proceedings*, 2, 737 – 743.
6. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). Methods for assuring high quality electric and thermal contacts when measuring parameters of thermoelectric materials. *J. Thermoelectricity*, 4, 83-90.
7. *Patent for utility model № 127473* (2018). L.I. Anatyshuk, M.V. Havryliuk, V.V. Lysko. Automated device for determining electric conductivity, thermal conductivity, thermoEMF and figure of merit of thermoelectric materials [in Ukrainian].
8. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V. (2011). Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules. *J. Electronic Materials*, 40(5), 1292 - 1297.

Submitted: 10.06.2021



Анатичук Л.І.

Анатичук Л.І. *акад. НАН України*^{1,2}

Лисько В.В. *канд. фіз.-мат. наук*^{1,2}



Лисько В.В.

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна,
e-mail: anatysh@gmail.com;

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

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ У СКЛАДІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ОХОЛОДЖЕННЯ

Запропоновано методику визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження. Розглянуто детальну фізичну модель цієї методики та наведено результати оцінки можливих величин похибок. Досліджено ефективність застосування різних методів зниження похибок. Бібл. 7, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: вимірювання, електропровідність, термоЕРС, теплопровідність, добротність, термоелектричний модуль.

Вступ

При розробці термоелектричних перетворювачів енергії, зокрема і термоелектричних модулів охолодження, та при створенні на їх основі термоелектричних приладів важливу роль відіграє метрологія модулів. При цьому точність визначення їх параметрів повинна бути високою, щоб надійно фіксувати вплив нових технологій та конструкцій на якість модулів.

Серед існуючих методів визначення параметрів термоелектричних модулів охолодження найбільш поширеним є метод Хармана [1 – 3]. Однак, у цьому методі параметри досліджуваного модуля охолодження (холодопродуктивність, холодильний коефіцієнт, максимальний перепад температур) не вимірюються, а розраховуються за отриманим значенням добротності модуля. При цьому не враховуються температурні залежності параметрів матеріалу. А оскільки умовою методу є невеликий перепад температур на модулі, отримані значення добротності будуть відрізнятися від тих, які будуть насправді в робочому режимі, особливо в режимі, близькому до ΔT_{\max} . Загальний вплив факторів, що призводять до похибок в методі Хармана, для випадку

вимірювань мікромодулів може досягати 60-70%. Навіть їх врахування за допомогою введення поправок, дозволяє зменшити похибки тільки до 10-15%. При цьому необхідно знати багато додаткової інформації про властивості термоелектричного матеріалу, матеріалу комутації, струмових та потенціальних провідників, кераміки тощо [4].

Таких недоліків позбавлений абсолютний метод [5]. Похибки вимірювань абсолютним методом, як і методом Хармана, також можуть бути високими (до 25%). Однак, особливість і перевага абсолютного методу в тому, що ці похибки можуть бути інструментально мінімізовані або визначені експериментально та враховані у вигляді поправок [6].

Однак, таке обладнання призначене для визначення параметрів готових виробів – холодопродуктивності, холодильного коефіцієнту та перепаду температур на модулі. Воно може бути вдосконаленим для отримання інформації про властивості матеріалу у складі модуля – термоЕРС, електропровідності та теплопровідності пари термоелектричних віток. Ця інформація є корисною як для оптимізації термоелектричного матеріалу для конкретних його застосувань, так і для вдосконалення конструкції модулів.

Метою цієї роботи є розробка методики визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження, оцінка можливих величин похибок цієї методики та визначення умов їх мінімізації.

Опис методики визначення σ , α , κ , Z матеріалу віток при вимірюванні параметрів термоелектричного модуля охолодження

При використанні абсолютного методу для визначення параметрів термоелектричного модуля охолодження, досліджуваний модуль розташовують між термостатованою основою та джерелом тепла – електричним нагрівником (рис. 1). Допускається, що бічна та верхня поверхні джерела тепла, а також бічна поверхня модуля є адіабатично ізольованими.

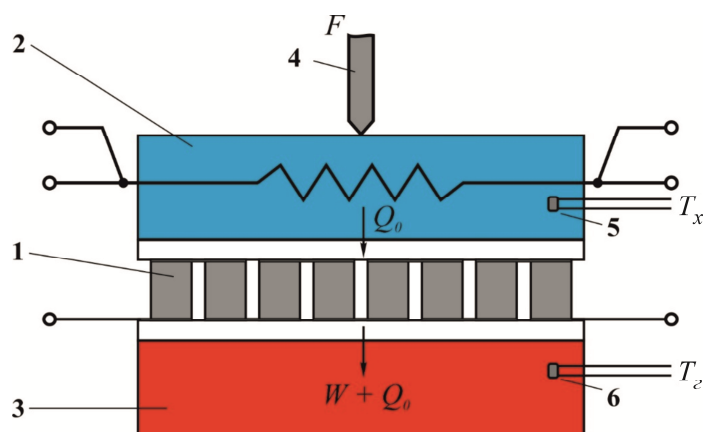


Рис. 1. Абсолютний метод вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження: 1 – термоелектричний модуль, 2 – еталонний нагрівник, 3 – термостат, 4 – притискний механізм, 5, 6 – термопари.

Величини холодопродуктивності Q_0 , перепаду температур ΔT та холодильного коефіцієнту ε визначаються по формулам

$$Q_0 = I_0 \cdot U_0, \quad (1)$$

$$\Delta T = T_2 - T_x, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W}, \quad (3)$$

де I_0 та U_0 – струм через нагрівник та спад напруги на ньому, T_x – температура «холодної» сторони модуля, T_2 – температура «гарячої» сторони модуля, W – споживана модулем електрична потужність.

Методика, що пропонується для визначення усереднених значень σ , α , κ , Z матеріалу віток, з яких складається модуль, полягає у наступному:

- визначення електропровідності σ за виміряними значеннями опору модуля на змінному струмі та відомій конструкції модуля;

- створення на модулі перепаду температур за допомогою електричного нагрівника (при відключеному струмі через модуль);

- визначення коефіцієнту ЕРС α за виміряними значеннями ЕРС модуля та перепаду температур на модулі;

- визначення теплопровідності κ за виміряними значеннями теплового потоку через модуль (потужності електричного нагрівника) та перепаду температур на модулі.

Усереднені значення електропровідності, термоЕРС, теплопровідності та добротності матеріалу віток термоелектричного модуля визначаються за формулами

$$\sigma = \frac{1}{R_M / 2N} \frac{h_1}{a_1 \cdot b_1}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{E / 2N}{\Delta T}, \quad (5)$$

$$\kappa = \frac{Q / 2N}{\Delta T} \frac{h_1}{a_1 \cdot b_1}, \quad (6)$$

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}, \quad (7)$$

де R_M – опір модуля, вимірний на змінному струмі; $a_1 \times b_1$ – переріз віток; h_1 – висота віток; N – кількість пар; E – ЕРС модуля; ΔT – різниця температур між термопарами, розташованими на тепловірвнюючих пластинах, між якими знаходиться досліджуваний модуль; Q – тепловий потік через модуль, що вважається рівним потужності електричного нагрівника.

Однак отримані за формулами (4 - (7) значення σ , α , κ , Z будуть неточними, оскільки у цих формулах не враховано перепади температур між нагрівником (холодильником) і модулем, перепади температур на керамічних пластинах та комутації, контакті та комутаційні електричні опори,

теплообмін з оточуючим середовищем шляхом конвекції, випромінювання та через провідники термопар та струмові провідники модуля тощо.

Оцінка можливих величин похибок запропонованої методики

Для оцінки можливих величин похибок необхідно розглянути детальну фізична модель вимірювань, що наведена на рис. 2. Вона містить досліджуваний термоелектричний модуль, з обох сторін якого розміщені мідні тепловирівнюючі пластини. З «холодної» сторони модуля над тепловирівнюючою пластинною розташовано електричний нагрівник. Модуль, нагрівник та пластини притискаються до основи термостату за допомогою притискного механізму, який складається з гвинта та планки, кінці якої закріплені на стінці термостату. Притискний гвинт для зменшення натікань тепла має загострений кінець. Вся система розміщена під ковпаком вакуумної установки, якою забезпечується вакуум на рівні 10^{-4} Па.

Струм до електричного нагрівника підводиться струмовими провідниками, спад напруги на ньому вимірюється за допомогою додаткових потенціальних провідників. Для визначення властивостей термоелектричного матеріалу, з якого виготовлено модуль, на модулі за допомогою електричного нагрівника створюється невеликий перепад температур, близько 10 К.

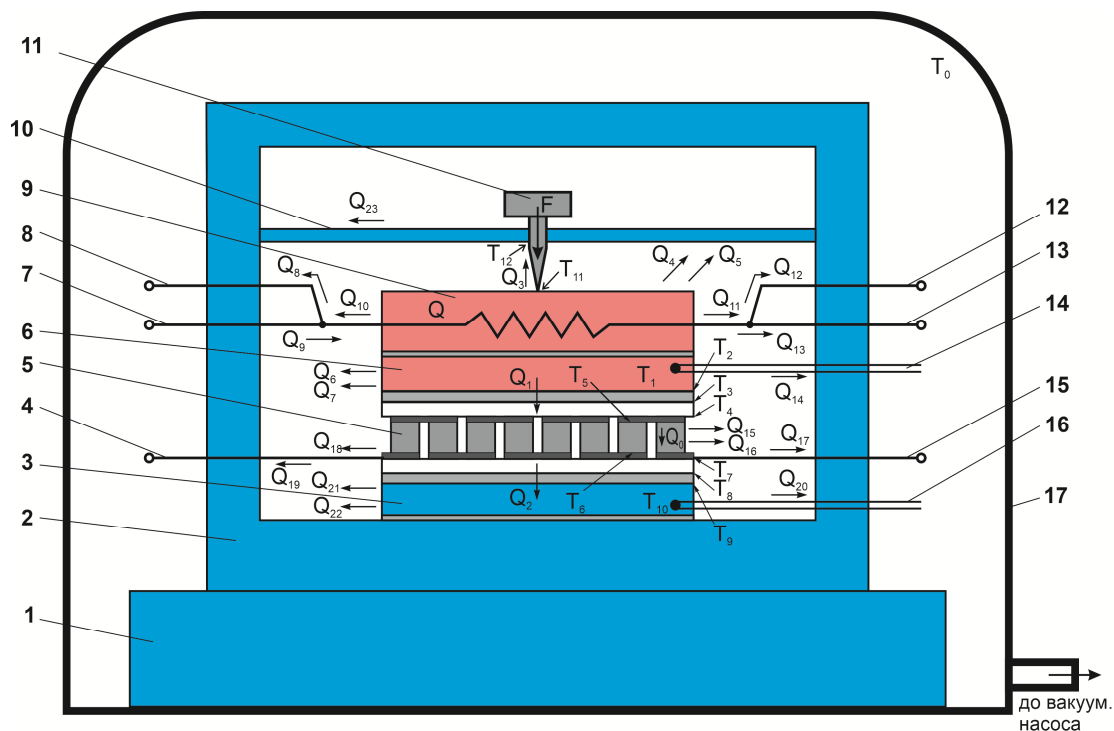


Рис. 2 – Схема абсолютного методу вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження: 1 – термостат; 2 – ізотермічний екран; 3, 6 – тепловирівнюючі пластини; 4, 15 – струмові провідники досліджуваного модуля; 5 – досліджуваний модуль; 7, 13 – струмові провідники нагрівника; 8, 12 – потенціальні провідники нагрівника; 9 – нагрівник; 10 – планка притискного механізму; 11 – притискний гвинт; 14, 16 – термопари; 17 – ковпак вакуумної установки.

На рис. 2: Q_1 – тепло, що передається від електричного нагрівника 9 досліджуваному модулю 5 через тепловирівнюючу пластину 6; Q_2 – тепло, що передається від модуля 5 до тепловирівнюючої пластини 3; Q_3 – тепло, що передається від електричного нагрівника 9 до притискної планки 10; Q_4 – тепло, що передається від нагрівника 9 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом радіаційного випромінювання; Q_5 – тепло, що передається від нагрівника 9 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом конвекції; Q_6 – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 6 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом радіаційного випромінювання; Q_7 – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 6 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом конвекції; $Q_8 - Q_{13}$ – тепло, що передається від нагрівника 9 до ізотермічного екрану 2 через струмові (7 і 13) та потенціальні (8 і 12) провідники нагрівника; Q_{14}, Q_{20} – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 6 до ізотермічного екрану 2 через провідники термопар (14 і 16); Q_{15} – тепло, що передається від бічної поверхні модуля 5 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом радіаційного випромінювання; Q_{16} – тепло, що передається від бічної поверхні модуля 5 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом конвекції; Q_{17}, Q_{18} – тепло, що передається від модуля 5 до ізотермічного екрану 2 через струмові провідники модуля (4 і 15); Q_{21} – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 3 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом радіаційного випромінювання; Q_{22} – тепло, що передається від тепловирівнюючої пластини 3 до внутрішньої поверхні ізотермічного екрану 2 шляхом конвекції; Q_{23} – тепло, що від нагрівника 9 до ізотермічного екрану 2 через планку притискного механізму 10.

Похибки при визначенні електропровідності.

При визначенні усередненого значення електропровідності віток термоелектричного модуля визначається за формулою (4) використовується загальний опір модуля R_M , вимірний на змінному струмі, який крім опору віток R_1 , включає у себе також комутаційний опір R_2 , контактний опір R_3 та опір струмових провідників R_4

$$R_M = R_1 + R_2 + R_3 + R_4. \quad (11)$$

Для оцінки можливих похибок, як приклад використано параметри термоелектричного модуля охолодження типу Altec-СМ-1-S-SQ-127-1.8x1.8-2.0:

- кількість пар – $N = 127$;
- висота віток $h_1 = 2$ мм;
- переріз віток $a_1 \times b_1 = 1.8$ мм \times 1.8 мм;
- товщина кераміки $h_2 = 0.65$ мм;
- площа кераміки $a_2 \times b_2 = 40$ мм \times 40 мм;
- товщина комутації $h_3 = 0.5$ мм;
- електропровідність матеріалу віток $\sigma = 1000$ Ом⁻¹·см⁻¹.

Для наведених значень геометрії модуля та властивостей матеріалів: $R_1 = 1.568 \text{ Ом}$; $R_2 \approx 0.011 \text{ Ом}$; $R_3 = 0.078 \text{ Ом}$ (при величині питомого електричного контактного опору $5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$); $R_4 = 0.008 \text{ Ом}$ (для двох струмових провідників діаметром 1 мм та довжиною 15 см); $R_M \approx 1.665 \text{ Ом}$.

Отже, похибка у визначенні електропровідності через неврахування контактного опору складатиме $\sim 4.7\%$; комутаційного опору $\sim 0.7\%$; опору струмових провідників $\sim 0.5\%$. Похибки, пов'язані з точністю інформації про геометричні розміри віток, визначатимуться технологією виготовлення віток і методами контролю їх геометрії. Зменшити величини цих похибок можна за допомогою введення відповідних поправок, розрахованих для заданої конструкції модуля або визначених експериментально.

Похибки при визначенні термоЕРС.

Похибки при визначенні коефіцієнту термоЕРС матеріалу віток термоелектричного модуля виникатимуть через те, що у формулу (5) повинен входити не перепад температури ($T_1 - T_{10}$) на пластинах, що контактують з модулем, а перепад температури ($T_5 - T_6$) безпосередньо на вітках

$$\alpha = \frac{E/2N}{(T_5 - T_6)}. \quad (12)$$

Перепад температури на вітках ($T_5 - T_6$) можна знайти як

$$(T_5 - T_6) = (T_1 - T_{10}) - (T_1 - T_2) - (T_2 - T_3) - (T_3 - T_4) - (T_4 - T_5) - (T_6 - T_7) - (T_7 - T_8) - (T_8 - T_9) - (T_9 - T_{10}). \quad (13)$$

де ($T_1 - T_2$) та ($T_9 - T_{10}$) – перепади температур на частинах тепловирівнюючих пластин між термopарами та поверхнями пластин, які контактують з «гарячою» та «холодною» сторонами модуля; ($T_2 - T_3$) та ($T_8 - T_9$) – перепади температур на теплових контактних опорах «гарячої» та «холодної» сторін модуля; ($T_3 - T_4$) та ($T_7 - T_8$) – перепади температур на керамічних пластинах «гарячої» та «холодної» сторін модуля; ($T_4 - T_5$) та ($T_6 - T_7$) – перепади температур на комутації «гарячої» та «холодної» сторін модуля.

Для оцінки величин цих перепадів спочатку було оцінено величину теплового потоку Q_1 , що проходить через модуль. Без врахування втрат тепла з модуля та за умови створення на вітках перепаду температур 10 К, величина теплового потоку через одну вітку складатиме 0.00324 Вт, а через весь модуль – 0.823 Вт (при теплопровідності матеріалу віток $\kappa = 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Тоді перепади температур на кожному з елементів можна оцінити як:

$$(T_1 - T_2) = \frac{Q_1}{\kappa_{Cu} \cdot \frac{a_2 \cdot b_2}{h_{Cu}}} = 0.0026 \text{ К} \quad (\text{при відстані між термopарою та поверхнею, яка контактує з}$$

модулем $h_{Cu} = 2 \text{ мм}$);

- $(T_2 - T_3) = \frac{Q_1}{K_{\text{конт.}}} = 0.0412 \text{ K}$ (при величині контактного теплового опору $K_{\text{конт.}} = 20 \text{ Вт/К}$);
- $(T_3 - T_4) = \frac{Q_1}{\kappa_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \frac{a_2 \cdot b_2}{h_2}} = 0.0223 \text{ K}$;
- $(T_4 - T_5) = \frac{Q_1}{\kappa_{\text{Cu}} \cdot \frac{2N \cdot a_1 \cdot b_1}{h_3}} = 0.0013 \text{ K}$ (при допущенні, що тепловий потік Q_1 рівномірно

розподіляється між $2N$ ділянками комутації з площею перерізу рівною площі перерізу вітки та висотою рівною товщині комутації);

- $(T_6 - T_7) = (T_4 - T_5) = 0.0013 \text{ K}$;
- $(T_7 - T_8) = (T_3 - T_4) = 0.0223 \text{ K}$;
- $(T_8 - T_9) = (T_2 - T_3) = 0.0412 \text{ K}$;
- $(T_9 - T_{10}) = (T_1 - T_2) = 0.0026 \text{ K}$.

Таким чином, перепад температур, виміряний термопарами, буде складати $(T_{T_0} - T_{X_0}) = 10.135 \text{ K}$, що на 1.35% більше, ніж перепад на вітках. При цьому, найбільший вклад у похибку вносить контактний тепловий опір (0.82%) та тепловий опір керамічних пластин (0,45%). Ці похибки можуть бути значно зменшені шляхом введення відповідних поправок, визначених експериментально.

Похибки при визначенні теплопровідності.

Похибка при визначенні теплопровідності матеріалу за формулою (6) буде складатись з похибок при визначенні перепаду температур на вітках (без введення поправок $\sim 1.35\%$, відповідно до розрахунків, наведених у п.2.2.), похибок вимірювання геометричних розмірів віток та похибок при визначенні теплового потоку, що пройшов через вітки.

Теплові потоки з модуля та тепловирівнюючої пластини ($Q_{17} - Q_{22}$) можна не брати до уваги, оскільки вони не впливають на визначення теплопровідності матеріалу віток за формулою (6).

Усі провідники та притискний механізм для зменшення теплових втрат мають мати так звані теплові ключі, що представляються собою елементи з електроізоляційного матеріалу, температура яких підтримується близькою до температури нагрівника.

Передача тепла в зазорі між вітками шляхом випромінювання (Q_{24})

$$Q_{24} \approx \varepsilon_1 \sigma_B S (T_4^4 - T_7^4), \quad (14)$$

де ε_1 – коефіцієнт випромінювання внутрішньої поверхні кераміки; $\sigma_B = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постійна Стефана-Больцмана; $S = (a_1 \cdot b_1 - 2N \cdot a_2 \cdot b_2)$ – загальна площа зазору між вітками.

Втрати тепла Q_4 з нагрівника шляхом конвекції

$$Q_4 = H_{conv}(h_4)(2a_2 + 2b_2)(T_{11} - T_{exp}), \quad (13)$$

де H_{conv} – коефіцієнт конвективного теплообміну, h_4 – висота нагрівника.

Втрати тепла Q_5 з нагрівника шляхом випромінювання

$$Q_5 = \varepsilon_4 \sigma_B (h_4)(2a_2 + 2b_2)(T_{11}^4 - T_{exp}^4), \quad (14)$$

де ε_4 – коефіцієнт випромінювання бічної поверхні нагрівника.

Втрати тепла Q_6 з тепловирівнюючої пластини шляхом конвекції

$$Q_6 = H_{conv}(h_5)(2a_2 + 2b_2)(T_1 - T_{exp}), \quad (13)$$

де h_5 – висота тепловирівнюючої пластини.

Втрати тепла Q_7 з тепловирівнюючої пластини шляхом випромінювання

$$Q_7 = \varepsilon_5 \sigma_B (h_5)(2a_2 + 2b_2)(T_1^4 - T_{exp}^4), \quad (14)$$

де ε_5 – коефіцієнт випромінювання бічної поверхні тепловирівнюючої пластини.

Втрати тепла з модуля через потенціальні провідники нагрівника (Q_8 та Q_{12})

$$Q_8 = Q_{12} = \kappa_8 \frac{S_8}{L_8}(T_{11} - T_{ключа}), \quad (11)$$

де: S_8 – площа поперечного перерізу потенціального провідника; L_8 – довжина потенціального провідника; κ_8 – теплопровідність матеріалу потенціального провідника; $T_{ключа}$ – температура теплового ключа.

Втрати тепла з модуля через струмові провідники нагрівника (Q_9 та Q_{13})

$$Q_9 = Q_{13} = \kappa_9 \frac{S_9}{L_9}(T_{11} - T_{ключа}), \quad (11)$$

де: S_9 – площа поперечного перерізу потенціального провідника; L_9 – довжина потенціального провідника; κ_9 – теплопровідність матеріалу потенціального провідника;

Втрати тепла Q_{14} з через провідники термопари

$$Q_{14} = \kappa_{10} \frac{S_{10}}{L_{10}}(T_1 - T_0) + \kappa_{11} \frac{S_{11}}{L_{11}}(T_1 - T_{ключа}), \quad (12)$$

де S_{10} та S_{11} – площі поперечного перерізу провідників термопари; L_{10} та L_{11} – довжини провідників

термопари; κ_{10} та κ_{11} – теплопровідності провідників термопари.

Втрати тепла Q_{15} з бічної поверхні модуля шляхом конвекції

$$Q_{15} \approx H_{conv} (h_1 + 2h_2 + 2h_3)(2a_2 + 2b_2) \left(\frac{T_3 + T_8}{2} - \bar{T}_{екр.} \right), \quad (9)$$

де H_{conv} – коефіцієнт конвективного теплообміну, $\bar{T}_{екр.}$ – середня температура поверхні екрану, що знаходиться навпроти поверхні модуля.

Втрати тепла Q_{16} з бічної поверхні модуля шляхом випромінювання

$$Q_{16} \approx \varepsilon_2 \sigma_B (h_1 + 2h_2 + 2h_3)(2a_2 + 2b_2) \left(\left(\frac{T_3 + T_8}{2} \right)^4 - \bar{T}_{екр.}^4 \right), \quad (10)$$

де ε_2 – коефіцієнт випромінювання бічної поверхні модуля.

Для розрахунків можливих величин цих теплових втрат використано наступні параметри: коефіцієнти випромінювання – 0.7; діаметр струмових та потенціальних провідників нагрівника – 0.2 мм, їх довжина (до контакту з тепловим ключем) – 10 см; діаметр провідників термопар – 0.2 мм, їх довжина (до контакту з тепловим ключем) – 10 см; кількість пар – 127; висота віток – 2 мм; переріз віток – 1.8 мм x 1.8 мм; товщина кераміки – 0.65 мм; площа кераміки – 40 мм x 40 мм; товщина комутації – 0.5 мм; висота нагрівника – 5 мм; висота тепловирівнюючої пластини – 5 мм.

Результати оцінки можливих похибок при визначенні теплового потоку через вітки матеріалу, викликаних втратами тепла через провідники нагрівника та термопари, притиск, а також втратами тепла шляхом випромінювання з поверхні нагрівника, тепловирівнюючої пластини та модуля наведено у табл. 1. Результати отримані для випадку, коли температура теплового ключа рівна температурі тепловирівнюючої пластини T_{10} , а перепад температури між гарячою та холодною пластинами ($T_1 - T_{10}$) складає 10 К. Також розглянуто випадок застосування захисного екрану з температурою, що відрізняється від температури нагрівника не більше ніж на 1К.

Таблиця 1

Результати оцінки можливих похибок при визначенні теплового потоку через вітки матеріалу.

№ з/п	Найменування втрат	δQ, % (відношення втрат тепла до потоку тепла через вітки)	
		без захисного екрана	з захисним екраном
1	Втрати шляхом випромінювання у зазорі між вітками	3.85	3.85
2	Втрати шляхом випромінювання з поверхні нагрівника	11.9	1.25
3	Втрати шляхом випромінювання з поверхні пластини	3.96	0.42

Продовження таблиці №1

4	Втрати шляхом випромінювання з поверхні модуля	1.56	0.16
5	Втрати по притиску	2.77	0.28
6	Втрати по провідниках нагрівника	0.04	<0.01
7	Втрати по провідниках термопари	<0.01	<0.01
Всього:		24.08	5.96

Таким чином, найбільшими є втрати, спричинені випромінюванням з поверхні нагрівника, модуля та тепловирівнюючої пластини, а також випромінюванням у зазорі між вітками всередині термоелектричного модуля. Загалом, втрати випромінюванням складають майже 90% від усіх теплових втрат. Однак, вони можуть бути радикально зменшені при застосуванні захисного екрана. Для випадку, коли з температура екрану відрізняється від температури нагрівника не більше ніж на 1 К, загальні втрати тепла, а, отже, похибка визначення теплового потоку через вітки модуля, не перевищуватиме 6 %. З врахуванням похибок при визначенні перепаду температур на вітках (без введення поправок ~ 1.35 %) похибка при визначенні теплопровідності термоелектричного матеріалу, з якого виготовлено вітки модуля, складатиме до 7.4 %.

Отримані результати є основою для модернізації обладнання для вимірювання параметрів термоелектричних модулів охолодження.

Висновки

1. Запропоновано методику визначення термоелектричних параметрів матеріалу віток термоелектричного модуля охолодження при вимірюванні його параметрів абсолютним методом. Розглянуто детальну фізичну модель цієї методики та наведено результати оцінки можливих величин похибок на прикладі термоелектричного модуля типу Altec-СМ-1-S-SQ-127-1.8x1.8-2.0.
2. Показано, що при визначенні електропровідності визначальним фактором, що призводитиме до похибок до ~ 4.7%, є неврахування контактної електричної опору. Вплив комутаційного опору складатиме ~ 0.7 %, опору струмових провідників ~ 0.5 %. Для зменшення величини цих похибок потрібно вносити відповідні поправки, розраховані для заданої конструкції модуля або визначені експериментально.
3. При визначенні термоЕРС найбільший вклад у похибку вносять похибки визначення перепаду температур на вітках, викликані контактним тепловим опором (0.82 %) та тепловим опором керамічних пластин (0.45 %). Ці похибки також можуть бути значно зменшені шляхом введення відповідних поправок.
4. При визначенні теплопровідності, крім похибок при визначенні перепаду температур на вітках, додатковим фактором є наявність теплових втрат, загальна величина яких при застосуванні теплових ключів та захисного екрану складатиме до 7.4 %. Найбільшою

складовою при цьому (до 4%) є втрати тепла шляхом випромінювання у зазорі між вітками. Однак, ці втрати для відомої конструкції модуля можуть бути визначені та враховані у вигляді поправок.

Література

1. T.C. Harman. Special Techniques for Measurement of Thermoelectric Properties // J. Appl. Phys. 29, 1373, 1958.
2. R.J. Buist. A New Method For Testing Thermoelectric Materials and Devices // XI International Conference on Thermoelectrics, October 7-9, 1992, Arlington, Texas, USA.
3. G. Gromov, D. Kondratiev, A. Rogov, L. Yershova. Z-meter: Easy-to-use Application and Theory // Proceedings. Sixth European Workshop on Thermoelectricity of the European Thermoelectric Society, September 20-21, 2001, Freiburg im Breisgau, Germany.
4. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. Modified Harman's Method // AIP Conf. Proc. – 2012, №1449, p. 373-376.
5. P. Kolodner. High-precision thermal and electrical characterization of thermoelectric modules // Review of Scientific Instruments. – Vol. 85, Iss. 5. – 2014. – pp. 054901/1-054901/11.
6. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials // Journal of Electronic Materials, 2014, Volume 43, Issue 10, pp 3863-3869.

Надійшли до редакції: 09.06.2021

Анатичук Л.І. *акад. НАН України*^{1,2}

Лысько В.В. *канд. физ.-мат. наук*^{1,2}

¹Інститут термоелектричності НАН і МОН України, ул. Науки, 1,
Черновці, 58029, Україна, e-mail: anatysh@gmail.com ;

²Черновицький національний університет ім. Юрія Федьковича,
ул. Коцюбинського, 2, Черновці, 58012, Україна

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Предложена методика определения термоэлектрических параметров материалов в составе термоэлектрических модулей охлаждения. Рассмотрена подробная физическая модель этой

методики и приведены результаты оценки возможных величин погрешностей. Исследована эффективность применения различных методов снижения погрешностей. Библ. 7, рис. 2, табл. 1.

Ключевые слова: измерение, электропроводность, термоЭДС, теплопроводность, добротность, термоэлектрический модуль.

Anatychuk L.I., *acad. National Academy
of Sciences of Ukraine*^{1,2}
Lysko V.V., *cand. phys.-math. sciences*^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatych@gmail.com;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

METHOD FOR DETERMINING THE THERMOELECTRIC PARAMETERS OF MATERIALS FORMING PART OF THERMOELECTRIC COOLING MODULES

A method for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules is proposed. A detailed physical model of this method is considered and the results of estimation of possible error values are given. The efficiency of application of various methods of error reduction is investigated. Bibl. 7, Figs. 2, Table 1.

Key words: measurement, electrical conductivity, thermoEMF, thermal conductivity, figure of merit, thermoelectric module.

References

1. Harman T.C. (1958). Special techniques for measurement of thermoelectric properties. *J. Appl. Phys.*, 29, 1373.
2. Buist R.J. (1992). A new method for testing thermoelectric materials and devices. *XI International Conference on Thermoelectrics* (October 7-9, 1992, Arlington, Texas, USA).
3. Gromov G., Kondratiev D., Rogov A., Yershova L. (2001). Z-meter: easy-to-use application and theory. *Proc. of Sixth European Workshop on Thermoelectricity of the European Thermoelectric Society* (September 20-21, 2001, Freiburg im Breisgau, Germany).

4. Anatyчук L.I., Lysko V.V. (2012). Modified Harman's method (2012). *AIP Conf. Proc.*, 449, 373-376.
5. Kolodner P. (2014). High-precision thermal and electrical characterization of thermoelectric modules. *Review of Scientific Instruments*, 85(5), 054901/1-054901/11.
6. Anatyчук L.I., Lysko V.V. (2014). On improvement of the accuracy and speed in the process of measuring characteristics of thermoelectric materials. *J. Electronic Materials*, 43(10), 3863-3869.

Submitted:09.06.2021

УДК 53.082

Гаврилюк М.В., Руснак О.С.



Гаврилюк М.В.

Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна
email: anatyuch@gmail.com



Руснак О.С.

**СТЕНД ДЛЯ ГРАДУЮВАННЯ ТЕПЛОМІРІВ
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ**

ГЕНЕРАТОРНИХ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

Представлено результати розробки стенду для градуювання тепломірів для визначення теплового потоку через генераторний термоелектричний модуль при вимірюваннях його параметрів абсолютним методом. Стенд дає можливість досліджувати метрологічні характеристики тепломірів у необхідному інтервалі температур та у реальному часі передавати результати вимірювань на персональний комп'ютер. Бібл. 6, рис. 6.

Ключові слова: термоелектричний модуль, тепломір, градуювання, точність.

Вступ

Загальна характеристика проблеми.

Підвищення якості та зниження собівартості термоелектричних генераторних модулів вимагає застосування при їх розробці та виготовленні передових технологій та високоефективних матеріалів. При цьому підвищення точності при визначенні теплових та електричних параметрів модулів дає можливість більш прогнозовано корегувати технологію виробництва модулів, а також оптимально підходити до безпосереднього створення кінцевих пристроїв, основою яких є ці генераторні модулі. Точність визначення параметрів модулів має бути такою, щоб надійно фіксувати вплив нових технологій та конструкцій на якість модулів. Не менш важливим є метрологічне забезпечення при створенні термоелектричних генераторів. Тотожність і надійність вимірювань параметрів модулів у постачальників і споживачів модулів, що використовують їх у термоелектричних виробках, дозволяє виключити проблеми, що виникають при цьому.

Найбільш надійним і точним серед існуючих методів визначення параметрів термоелектричних генераторних модулів є абсолютний метод [1 – 3], який дозволяє проводити вимірювання параметрів модулів у реальних умовах їх експлуатації та дає можливість інструментальної мінімізації основних джерел похибок вимірювань [4]. Крім того, абсолютний метод дозволяє додатково отримати інформацію про властивості матеріалу у складі модуля – термоЕРС, електропровідності та теплопровідності пари термоелектричних віток [5, 6]. Ця інформація є корисною як для оптимізації термоелектричного матеріалу для конкретних його застосувань, так і для вдосконалення конструкції модулів. При застосуванні абсолютного методу

одним з основних джерел похибок є неточність визначення теплового потоку, що проходить через модуль, пов'язана з наявністю теплових втрат шляхом конвекції та випромінювання з поверхні еталонного нагрівника та модуля, а також теплових втрат по провідниках та елементах конструкції вимірювального обладнання. Ефективним методом зменшення цих похибок є використання тепломірів для визначення теплового потоку, що відводиться від холодної сторони модуля до термостату [3]. Очевидно, що при цьому точність градування тепломіра відіграватиме вирішальну роль.

Мета цієї роботи – створення стенду для градування тепломірів для високоточного визначення теплового потоку через досліджуваний генераторний термоелектричний модуль при вимірюванні його параметрів абсолютним методом.

Опис абсолютного методу вимірювань параметрів термоелектричних генераторних модулів

Для вимірювання параметрів генераторних термоелектричних модулів абсолютним методом використовується вимірювальна комірка, яка включає в себе гарячий і холодний теплообмінники, між якими розміщується досліджуваний модуль. В якості гарячого теплообмінника зазвичай використовують електричний нагрівальний резистивний елемент. Холодний теплообмінник може бути з рідинним або з повітряним охолодженням. Теплообмінники мають вмонтовані датчі температури, які, для зменшення похибок вимірювання, розміщені в теплоізолюючих пластинах. Між собою теплообмінники і модуль притискаються з заданим зусиллям. Теплова модель такої вимірювальної комірки наведена на рис. 1

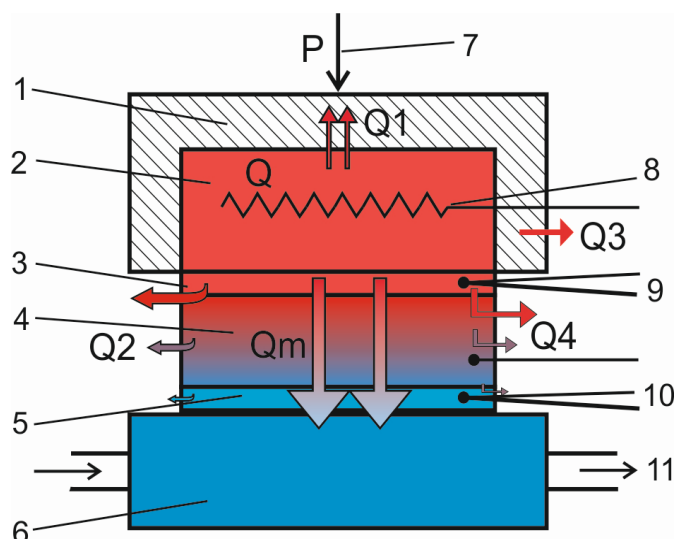


Рис. 1. Теплова модель вимірювальної комірки для визначення параметрів генераторних термоелектричних модулів абсолютним методом: 1 – гарячий теплообмінник; 2 – еталонний нагрівник; 3 – «гаряча» теплоізолююча пластинка; 4 – генераторний термоелектричний модуль; 5 – «холодна» теплоізолююча пластинка; 6 – холодний рідинний теплообмінник; 7 – вузол притиску; 8 – електричні виводи еталонного нагрівника; 9 – термоміри «гарячого» теплообмінника; 10 – термоміри «холодного» теплообмінника; 11 – теплоносій (рідина)

На рис. 1 стрілками показано шляхи проходження тепла, яка виділяється в еталонному нагрівнику. Воно проходить через модуль і розсіюється теплоносієм в холодному теплообміннику. Схематично величина стрілок пропорційна величинам теплових потоків.

В ідеальних умовах вся теплова потужність еталонного нагрівника повинна перейти через модуль. Але в реальних умовах, частина теплової потужності розсіюється в навколишнє середовище. Так, на рис. 1: Q – тепло, що виділяється еталонним нагрівником; Q_1 – втрати тепла по елементах конструкції корпусу гарячого теплообмінника; Q_2 – втрати тепла з поверхні модуля та тепловирівнюючих пластин шляхом конвекції та випромінювання; Q_3 – втрати тепла по електричних виводах живлення нагрівника; Q_4 – втрати тепла по електричних виводах модуля та датчиків температури; Q_m – корисна теплова потужність, яка пройшла через модуль і створила на ньому робочий перепад температур.

Очевидно, що

$$Q_m = Q - Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4.$$

Величини теплових втрат залежать від багатьох факторів і зазвичай їх важко врахувати, тому необхідно використовувати спеціальні методи для точного визначення теплових потоків.

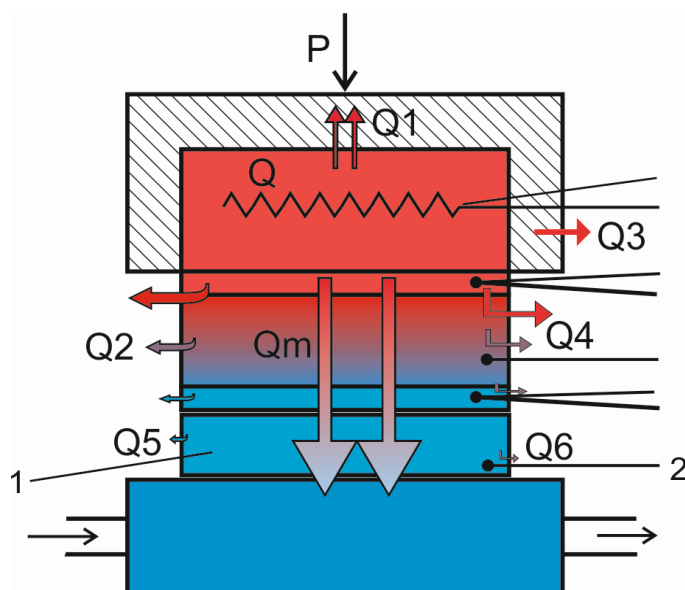


Рис. 2. Схема вимірювальної комірки з тепломіром:

1 – тепломір; 2 – потенціальні виводи тепломіра

Використання тепломірів значно спрощує процес вимірювань та підвищує точність визначення параметрів генераторних модулів. Реальна теплова модель вимірювальної комірки з тепломіром наведена на рис. 2. Так як тепломір послідовно додається у теплове коло вимірювальної комірки, то на ньому теж створюється перепад температур і при цьому з бокової поверхні тепломіра і по електричним виводам теж буде втрачатись тепло (Q_5 і Q_6), однак величини

цих теплових втрат будуть не великими, оскільки температура тепломіра є близькою до температури оточуючого середовища.

Опис стенду для градування тепломірів

При використанні у обладнанні для визначення параметрів генераторних модулів під кожний з типорозмірів модулів, які можуть вимірюватись на цьому обладнанні, виготовляється окремий тепломір. Зовнішній вигляд тепломірів різних типорозмірів наведено на рис. 3.

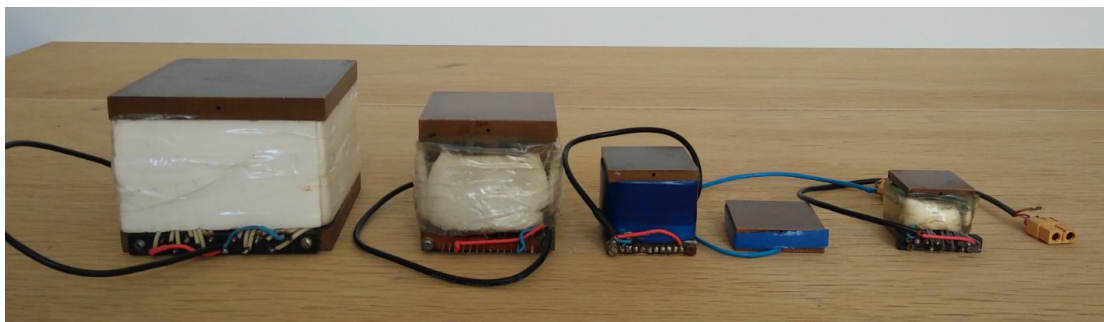


Рис. 3 – Тепломірів різних типорозмірів для обладнання для визначення параметрів термоелектричних генераторних модулів абсолютним методом

Тепломір складається з монолітного тіла з матеріалу з високою теплопровідністю, в якому на боковій поверхні розміщена термобатарея (рис. 4). Торцеві поверхні тіла тепломіра – це його робочі поверхні, вони паралельні між собою і виконані з високою чистотою обробки поверхонь – для якісного теплового контакту з модулем та холодним теплообмінником. Спаї термопар термобатареї розміщені на боковій поверхні в два ряди по висоті, причому кожний ряд знаходиться на своїй спільній площині, паралельній основі. Спаї розміщені на спеціальних штирьках, які мають добрий тепловий контакт з тілом тепломіра, але електрично від нього ізолювані.

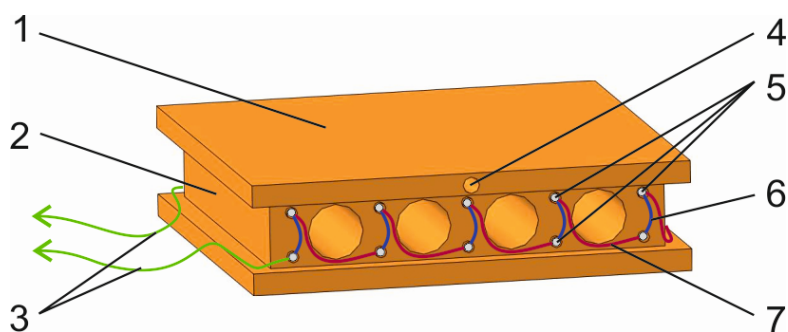


Рис. 4. Конструкція тепломіра: 1 – робоча площадка тепломіра; 2 – тіло тепломіра; 3 – електричні виводи тепломіра; 4 – отвір для вимірювальної термопари; 5 – спаї диференціальних термопар; 6 – n-вітки термопар; 7 – p-вітки термопар

Загальні вимоги до тепломірів: розміри робочої площадки тепломіра повинні бути близькими до розмірів робочих поверхонь генераторного модуля; висота тепломіра має бути оптимальною для створення мінімального перепаду температур на тепломірі, але достатньою для забезпечення його високої чутливості. Коефіцієнт перетворення тепломіра, його вольт-ватна чутливість, повинен бути стабільним в робочому діапазоні температур.

Для оптимізації тепломіра вздовж проходження теплового потоку в його тілі можуть бути зроблені технологічні виборки (наприклад, на рис. 4 видно, що в тілі тепломіра зроблені отвори).

Тепловий потік який проходить по тепломіру створює між робочими поверхнями невеликий перепад температури. Диференціальні термопари об'єднані в термобатарей – для підвищення чутливості тепломіру, яка залежить від матеріалу термопар, теплопровідності матеріалу тіла тепломіру та його конструкції, відстані між спаями, а також точності у визначенні відстані та якості теплового контакту між спаєм термопари та тілом. Очевидно, що такі похибки важко врахувати, тому тепломіри потрібно калібрувати.

Калібрування тепломіра проводиться методом прямого вимірювання сигналу термобатарей від дії перепаду температур, викликаного тепловим потоком, створюваним електричним нагрівачем. Одночасно визначається електрична потужність цього нагрівача. Вольт-ватна чутливість тепломіра буде визначатися відношенням:

$$k = \frac{E}{Q} \quad \text{так як} \quad Q = W = I_h \cdot U_h, \quad \text{то} \quad k = \frac{E}{I_h \cdot U_h}$$

де k - вольт-ватна чутливість тепломіра, E - сигнал тепломіра; Q - тепловий потік; пройшов через тепломір, W - електрична потужність основного нагрівача; I_h - струм основного нагрівача, U_h - напруга на основному нагрівачі.

Тепловий потік направляється тільки через тепломір, а втрати тепла з нагрівача в навколишнє середовище усуваються за допомогою захисних та радіаційних екранів.

Зовнішній вигляд розробленого стенду наведено на рис. 5.

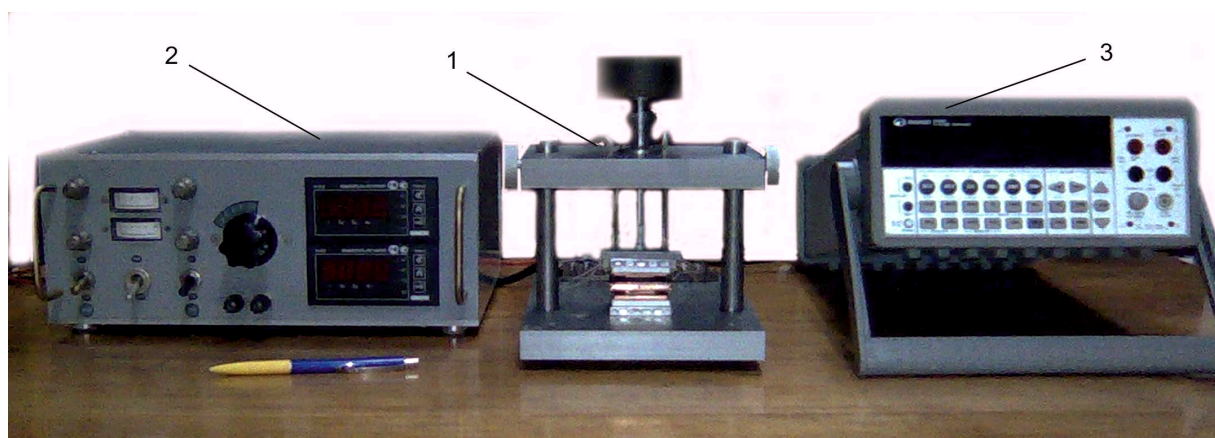


Рис. 5 – Зовнішній вигляд стенду для градування тепломірів: 1 – вимірювальний блок; 2 – блок керування; 3 – високоточний цифровий мультиметр

Стенд складається з вимірювального блоку, блоку керування та вимірювального приладу (високоточного цифрового мультиметра). У свою чергу, вимірювальний блок містить алюмінієву платформу, на якій розміщено рідинні теплообмінники, пристрій притиску і комутаційну колодку. Між гарячим і холодними теплообмінниками розміщується досліджуваний тепломір. Схема стенду наведена на рис. 6.

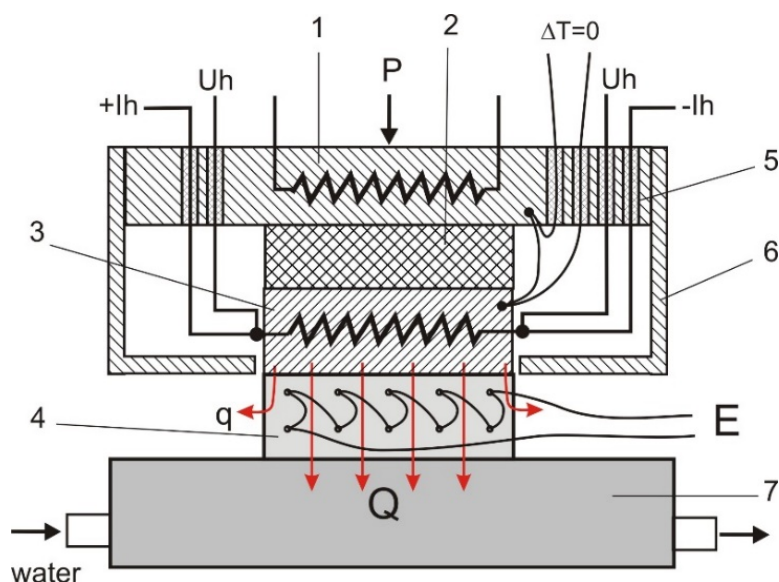


Рис. 6 – Схема калібрування тепломіра:

1 – захисний нагрівач; 2 – термоізоляція;

3 – основний нагрівач; 4 – тепломір; 5 – теплові замки;

6 – захисний екран; 7 – блок відведення тепла

На нижній основі алюмінієвої платформи та на підвісці верхньої основи вимірювального блоку закріплені два ідентичні теплообмінні вузли, які призначені для відводу тепла – холодні теплообмінники. Ці теплообмінники реверсні, оскільки створені на основі термоелектричних охолоджувачів (ТЕО) з рідинним відведенням відпрацьованого тепла і можуть працювати як у режимі охолодження, так і у режимі нагріву в залежності від напрямку пропускання електричного струму. На робочій стороні ТЕО закріплені мідні тепловирівнюючі пластини з вмонтованими датчиками температури – платиновими термометрами опору. Ці пластини в центральній своїй частині мають відшліфовану з високим класом чистоти площинну поверхню – робочу площадку. На цій площадці розміщують досліджуваний тепломір. Інша сторона тепломіра контактує з гарячим теплообмінником – плоским нагрівником, що має дві (верхню і нижню) відшліфовані робочі поверхні. Плоский нагрівник виготовлений досить тонким, щоб його бічна поверхня була якомога меншою і він добре прогрівався по всьому своєму об'єму. В корпусі цього нагрівника вмонтовано також датчик температури – платиновий термометр опору. Використання платинових датчиків температури дає можливість вимірювати та підтримувати

температури робочих площадок теплообмінників за допомогою терморегуляторів з точністю, не меншою $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Під час калібрування нагрівач живиться від окремого стабілізованого джерела постійного струму. Вимірювання напруги на нагрівачі проводиться прецизійними вольтметрами з похибкою лише на рівні 0.05% . Струм через нагрівач також визначається падінням напруги на еталонному опорі, що знаходиться в колі живлення нагрівача. Похибка у визначенні струму становить близько 0.1% . Крім того, по електричних провідниках будуть мати місце втрати тепла в навколишнє середовище. Тому повинні вживатись заходи щодо мінімізації цих втрат, зокрема, використання теплових замків. Теплові замки – це ізолятори, виготовлені з берилієвої кераміки з високою теплопровідністю, що забезпечують локальне нагрівання ділянки провідника у місці його виходу із захисного корпусу нагрівача до температури нагрівача. Таким чином, втрати тепла по підвідних провідниках максимально усуваються. Аналогічно змонтовані вимірювальні термопари.

Оскільки на тепломірі створюється перепад температури по його висоті, матеріал тіла тепломіра (зазвичай метал – мідь, алюміній, латунь тощо) має температурну залежність коефіцієнта теплопровідності, а матеріал термопар – температурну залежність коефіцієнту термоЕРС, то тепломір повинен калібруватись у всьому діапазоні робочих холодних температур досліджуваного термоелектричного модуля.

У розробленому стенді процесом термостатування всіх теплообмінників керує спеціально створений електронний блок, що містить регульовані блоки живлення для ТЕО та нагрівників, два двоканальні мікропроцесорні терморегулятори РЕ-202, комутаційні елементи та контрольні клеми вимірювань. Усі виводи електричних компонентів з вимірювального блоку сходяться на клемній колодці і за допомогою кабелю підключаються до блоку керування. До блоку керування підключений також вимірювальний прилад – високоточний цифровий мультиметр М3500 з можливістю передачі результатів вимірювань на персональний комп'ютер у реальному часі. Таким чином, розроблений стенд дає можливість проводити градування тепломірів та досліджувати в динаміці їх метрологічні характеристики.

Приклад залежності вольт-ватної чутливості тепломіра розмірами 40×40 мм від температури наведено на рис. 6.

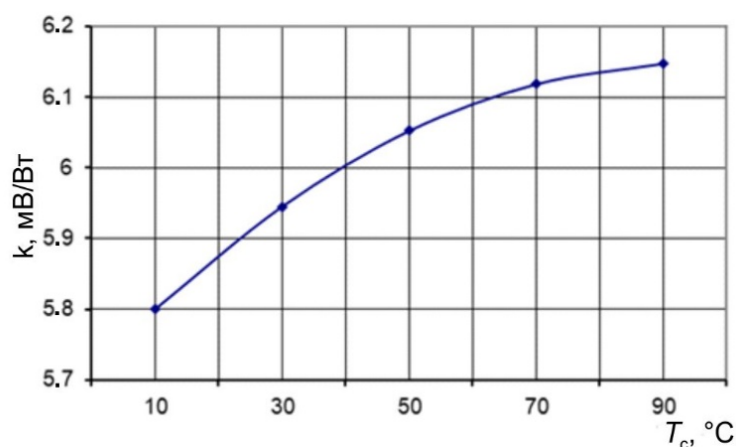


Рис. 6. Температурна залежність вольт-ватної чутливості тепломіра розмірами 40×40 мм

Висновки

1. Розроблено та виготовлено стенд для градування тепломірів для визначення теплового потоку через генераторний термоелектричний модуль при вимірюваннях його параметрів абсолютним методом. Стенд дає можливість досліджувати метрологічні характеристики тепломірів та передавати результати вимірювань на персональний комп'ютер у реальному часі.
2. Реалізовано вдосконалений метод градування тепломірів з використанням допоміжного високочутливого перетворювача теплового потоку, що дає можливість підвищити точність експериментального визначення вольт-ватної чутливості тепломірів.

Література

1. Охотин А.С., Пушкарский А.С., Боровикова Р.П., Симонов В.А. Методы измерения характеристики термоэлектрических материалов и преобразователей, М.: Наука, 167с., 1974.
2. A. Montecucco, J. Buckle, J. Siviter, A. R. Knox. A New Test Rig for Accurate Nonparametric Measurement and Characterization of Thermoelectric Devices. *Journal of Electronic Materials*, Vol. 42, No. 7, 2013.
3. L. Rauscher, S. Fujimoto, H.T. Kaibe, S. Sano, Efficiency Determination and General Characterization of Thermoelectric Generators Using an Absolute Measurement of the Heat Flow, Komatsu LTD, Technology Research Center, Research Division, 1200 Manda, Hiratsuka, Kanagawa, Japan, Institute of Physics Publishing, *Meas. Sci. Technol.* 16, 2005, 1054-1060.
4. L.I. Anatyshuk, M.V. Havrylyuk. Procedure and Equipment for Measuring Parameters of Thermoelectric Generator Modules // *Journal of Electronic Materials*. – Vol. 40. – No. 5. – 2011. – pp. 1292-1297.
5. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних термоелектричних модулів // *Термоелектрика*. – 2020, №3. – С. 70-80.
6. Анатичук Л.І., Лисько В.В. Визначення температурних залежностей термоелектричних параметрів матеріалів у складі генераторних термоелектричних модулів при зростаючому перепаді температур // *Термоелектрика*. – 2021, №2. – С. 53-57.

Надійшли до редакції: 07.07.2021

Гаврылюк Н.В., Руснак О.С.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatyach@gmail.com

СТЕНД ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ТЕРМОМЕТРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Представлены результаты разработки стенда для градуировки термопар для определения теплового потока через генераторный термоэлектрический модуль при измерениях его параметров абсолютным методом. Стенд позволяет исследовать метрологические характеристики термопар в необходимом интервале температур и в реальном времени передавать результаты измерений на персональный компьютер. Библ. 6, рис. 6.

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, термопар, градуировка, точность.

Havryliuk M.V., Rusnak O.S.

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatyach@gmail.com

A BENCH FOR CALIBRATING HEAT METERS FOR DETERMINATION OF PARAMETERS OF GENERATOR THERMOELECTRIC MODULES

The results of the development of a bench for calibrating heat meters to determine the heat flux through the generator thermoelectric module when measuring its parameters by the absolute method are presented. The bench allows one to study the metrological characteristics of heat meters in the required temperature range and transfer the measurement results to a personal computer in real time. Bibl. 6, Fig. 6.

Key words: thermoelectric module, heat meter, calibration, accuracy.

References

1. Okhotin A.S., Pushkarsky A.S., Borovikova R.P., Simonov V.A. (1974). *Metody izmereniia kharakteristik termoelektricheskikh materialov preobrazovatelei [Methods for measuring characteristics of thermoelectric materials of converters]*. Moscow: Nauka [in Russian].
2. Montecucco A., Buckle J., Siviter J., Knox A.R. (2013). A new test rig for accurate nonparametric measurement and characterization of thermoelectric devices. *J.Electronic Materials*, 42(7).

3. Rauscher L., Fujimoto S., Kaibe H.T., Sano S. (2005). Efficiency determination and general characterization of thermoelectric generators using an absolute measurement of the heat flow. Komatsu LTD, Technology Research Center, Research Division, 1200 Manda, Hiratsuka, Kanagawa, Japan, Institute of Physics Publishing, *Meas. Sci. Technol.* 16, 1054-1060.
4. Anatyshuk L.I., Havrylyuk M.V. (2011). Procedure and equipment for measuring parameters of thermoelectric generator modules. *J.Electronic Materials*, 40(5), 1292-1297.
5. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2021) Determination of the thermoelectric parameters of materials forming part of generator thermoelectric modules. *J.Thermoelectricity*, 1
6. Anatyshuk L.I.I., Lysko V.V. (2021) Determination of the temperature dependences of thermoelectric parameters of materials used in generator thermoelectric modules with a rise in temperature difference. *J.Thermoelectricity*, 2, 53-57.

Submitted: 07.07.2021

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

До опублікування у фаховому журналі приймаються наукові праці, які ніколи не друкувалися раніше. Стаття має бути написана на актуальну тему, містити результати глибокого наукового дослідження, новизну та обґрунтування наукових висновків відповідно до мети статті (поставленого завдання).

Матеріали, що публікуються в журналі, підлягають внутрішньому та зовнішньому рецензуванню, яке здійснюють члени редакційної колегії та міжнародної редакційної ради журналу або фахівці відповідної галузі. Рецензування проводиться конфіденційно. У разі негативної рецензії чи наявності суттєвих зауважень стаття може бути відхилена або повернута авторові (авторам) на доопрацювання. У випадку, коли автор (автори) не погоджується(ються) з думкою рецензента, за рішення редакційної колегії може бути проведено додаткове незалежне рецензування. Після внесення автором змін відповідно до зауважень рецензента статті підписується до друку.

Редакційна колегія має право на відмову у публікації рукописів, що містять опубліковані раніше дані, а також матеріалів, які не відповідають профілю журналу або матеріалів досліджень, що були проведені з порушенням етичних норм (наприклад, конфлікти між авторами чи між авторами і організацією, плагіат і т. ін.). Редакційна колегія журналу залишає за собою право редагувати та скорочувати рукописи без порушення авторського змісту. Відхилені рукописи авторам не повертаються.

Подання рукопису до журналу

Рукопис статті подається до редакції журналу в паперовому варіанті у двох примірниках та в електронному вигляді на електронному носії (диск, флешка). Електронний варіант статті повинен повністю відповідати паперовому варіанту. Рукопис має бути підписаний всіма співавторами або відповідальним представником.

В окремих випадках допускається замість електронного носія (диск, флешка) направляти статтю електронною поштою.

Рукописи подаються англійською мовою для англійськомовних авторів. Для російськомовних та україномовних авторів - англійською мовою і, відповідно, російською чи українською. Формат сторінок А4. Кількість сторінок – не більше 15 (разом з літературою та розширеними анотаціями). За узгодженням з редакцією число сторінок може бути збільшено.

До рукопису додається:

1. Офіційний лист-направлення, підписаний керівником установи, де виконувалась робота.
2. Ліцензійний договір про передачу авторського права (форму договору можна отримати в редакції журналу або завантажити з сайту журналу – [Договір.pdf](#)). Ліцензійний договір набуває чинності після прийняття статті до друку. Підписання ліцензійного договору автором(ами) означає, що вони ознайомлені і згодні з умовами договору.
3. Відомості про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, вчене звання, вчена ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID (за наявності). Відомості про авторів подаються:
авторами з України трьома мовами – українською, російською та англійською;
авторами з країн СНД двома мовами – російською та англійською;
авторами з далекого зарубіжжя – англійською мовою.
4. Носій інформації з текстом статті, рисунками, таблицями, відомостями про авторів в електронному вигляді.
5. Кольорова фотографія автора(ів). Чорно-білі фотографії редакція журналу не приймає. При

числі авторів більше двох їх фотографії не наводяться.

Вимоги до оформлення статті

Стаття має бути структурована за такими розділами:

- *Вступ*. Містить постановку проблеми, актуальність обраної теми, аналіз останніх досліджень і публікацій, мета і завдання.

- *Виклад основного матеріалу* дослідження і отриманих результатів.

- *Висновки*, де підведені підсумки роботи і перспективи подальших досліджень у цьому напрямі.

- *Список використаної літератури*.

Перша сторінка статті містить інформацію:

1. у верхньому лівому куті – індекс УДК (для авторів з України та країн СНД);
2. прізвище(а) та ініціали, вчена ступінь та вчене звання автора(ів);
3. назва установи, де працює автор(и); поштова адреса, номер телефону, адреса електронної пошти автора(ів);
4. назва статті;
5. анотація до статті – не більше 1 800 знаків. Анотація повинна відображати послідовну логіку опису результатів та описувати основні цілі дослідження, підсумовувати найбільш значимі результати;
6. ключові слова – не більше 8-ми слів.

Текст статті друкується шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1.2 на папері формату А4, вирівнювання по ширині. У статті не повинно бути переносів слів.

Параметри сторінки: «дзеркальні поля» верхнє поле – 2.5 см, нижнє поле – 2.0 см, всередині – 2,0 см, ззовні – 3,0 см, від краю до колонтитула верхнього та нижнього – 1.27 см.

Графічні матеріали, фотографії подаються кольоровими, як виняток чорно – білими, у форматах .орґ чи .сdг, допускається у форматах .jрг чи .tif. За бажанням автора таблиці і частина тексту також можуть бути кольоровими.

Рисунки друкуються на окремих сторінках. Текст на рисунках повинен бути виконаний шрифтом 10 пт. На графіках одиниці виміру вказуються через кому. Рисунки нумеруються в порядку їх розташування в тексті, частини рисунків нумеруються літерами – а, б, .. На звороті рисунка олівцем пишеться назва статті, автор(автори), номер рисунка. Скановані рисунки і графіки вставляти не допускається.

Таблиці подаються на окремих сторінках та повинні бути виконані з використанням табличного редактора MSWord. Використання символів псевдографіки для оформлення таблиць недопустиме.

Формули необхідно набирати у редакторах формул Equation або MatType. Статті з формулами, вписаними від руки, до друку не приймаються. Необхідно давати визначення (дефініцію) величин, які вперше вживаються у тексті, а далі користуватись відповідним терміном.

Підписи до рисунків і таблиць друкуються в рукописі після списку літератури.

Список використаних літературних джерел наводиться у кінці статті. Посилання на літературні джерела нумеруються послідовно в порядку їх цитування у тексті статті. Посилання на неопубліковані та незавершені роботи недопустимі.

Увага! У зв'язку із включенням журналу до міжнародних бібліографічно-реферативних баз даних, список літератури має складатися з двох блоків: ЛІТЕРАТУРА і REFERENCES (ця вимога діє і для англomовних статей):

ЛІТЕРАТУРА – джерела мовою оригіналу, оформлені відповідно до українського стандарту бібліографічного опису ДСТУ 8302:2015. За допомогою VAK.in.ua (<http://vak.in.ua>) Ви можете автоматично, швидко і легко оформити Ваш «Список використаних джерел» відповідно до вимог Державної атестаційної комісії (ДАК) України та оформити посилання на наукові джерела в Україні зрозуміло та уніфіковано. У цьому порталі полегшено процедури оформлення наукових джерел при написанні Ваших публікацій, дисертацій та інших наукових робіт.

REFERENCES – той же список літератури, транслітерований в романському алфавіті (рекомендації за міжнародним бібліографічним стандартом APA-2010, правила до оформлення транслітерованого списку літератури References на сайті <http://www.dse.org.ua>, розділ для авторів).

Для пришвидшення публікації статті просимо дотримуватись наступних правил:

- У верхньому лівому куті першої сторінки статті – індекс УДК;
- ініціали та прізвище авторів;
- науковий ступінь, учене звання;

з нового рядка шрифтом Times New Roman розміром 12 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру;

- назва організації, адреса (вулиця, місто, індекс, країна), електронна адреса авторів;

з нового рядка на 1 см нижче ініціалів та прізвища авторів шрифтом Times New Roman розміром 11 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру;

○ назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, заголовними буквами напівжирним шрифтом New Roman розмір 12 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по центру. Назва статті має бути конкретно і по можливості короткою;

- анотація розміщується на 1 см нижче назви статті шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, курсивом, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по ширині українською чи російською (для україномовних та російськомовних авторів відповідно) та англійською мовами;

- ключові слова розміщуються нижче анотації шрифтом Times New Roman розміром 10 пт, міжрядковий інтервал 1.2 вирівнювання по ширині. Мова ключових слів відповідає мові анотації. Заголовок «Ключові слова» - шрифт Times New Roman, розмір 10 пт, напівжирний;

- основний текст статті розміщується на 1 см нижче анотації з абзацу 1 см, шрифт Times New Roman, розмір 11 пт, міжрядковий інтервал 1,2 вирівнювання по ширині;

формули набирають у редакторі формул шрифтами: Symbol, Times New Roman. Розмір шрифтів: «звичайний» - 12 пт, «крупний індекс» - 7 пт, «дрібний індекс» - 5 пт, «крупний символ» - 18 пт, «дрібний символ» - 12 пт). Формула розміщується по тексту, вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка, нумерація формул у круглих дужках справа;

- розмірності всіх величин, що використовуються в статті, подаються в системі СІ, використовувані символи повинні бути пояснені;

• рисунки розміщуються по тексту. Рисунки та фотографії повинні бути чіткими і контрастними; осі графіків - паралельними до країв листка, усуваючи тим самим можливість появи зрушення кутів при масштабуванні; рисунки у журнал подаються кольоровими, чорно-білі - редакція журналу не приймає;

- таблиці розміщують по тексту. Ширина таблиці повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею вказують її порядковий номер, вирівнювання по правому краю. Нумерація таблиць

по всьому тексту статті наскрізна. Назва таблиці розміщується під її номером, вирівнювання по центру;

- список літератури наводять у кінці статті. Посилання на літературу вказують за текстом в квадратних дужках. Послідовність джерел у списку літератури має відповідати порядку їх згадування в тексті. Нижче наведені приклади різних типів посилань на літературу.

Приклади оформлення посилань на літературні джерела для ЛІТЕРАТУРИ

Статті в журналах

Анатичук Л.І., Михайловський В.Я., Максимук М.В., Андрусак І.С. Експериментальні дослідження термоелектричного автомобільного передпускового нагрівача на дизельному паливі. *Термоелектрика*. 2016. №4. С.84–94.

Книги

Анатичук Л.И. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник*. Киев, Наукова думка, 1979. 768 с.

Патенти

Патент України № 85293. Анатичук Л.І., Лусте О.Я., Ніцович О.В. Термоелемент

Матеріали конференцій

Лисько В.В. *Современное состояние и ожидаемый прогресс в метрологии термоэлектрических материалов*. Матеріали XVII Международного форума по термоэлектричеству (14-18 мая 2017, г. Белфаст), Черновцы, 2017. 64 с.

Автореферати дисертацій

Кобилянський Р.Р. *Термоелектричні прилади для лікування захворювань шкіри*.: автореф. дис. фіз.-мат. наук. Чернівці, 2011. 20 с.

Приклади оформлення посилань на літературні джерела для REFERENCES

Статті в журналах

Gorskiy P.V. (2015). Ob usloviakh vysokoi dobrotnosti i metodika poiska perpektivny sverhreshetochny termoelektricheskikh materialov [On the conditions of high figure of merit and methods of search for promising superlattice thermoelectric materials]. *Termoelektrichestvo - J.Thermoelectricity*, 3, 5 – 14 [in Russian].

Книги

Anatychuk L.I. (2003). *Thermoelectricity. Vol.2. Thermoelectric power converters*. Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity.

Патенти

Patent of Ukraine № 85293. Anatychuk L. I., Luste O.Ya., Nitzovych O.V. Thermoelemens [In Ukrainian].

Матеріали конференцій

Rifert V.G.. Intensification of heat exchange at condensation and evaporation of liquid in 5 flowing-down films. In: *Proc. of the 9th International Conference Heat Transfer*. May 20-25, 1990, Israel.

Автореферати дисертацій

Mashukov A.O. *Efficiency hospital state of rehabilitation of patients with color cancer*. Phd (Med.) Odesa, 2011 [In Ukrainian].

