

УДК 53.08

Анатичук Л.І., акад. НАН України^{1,2}
Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

¹Інститут термоелектрики НАН та 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

ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОНТАКТНОГО ОПОРУ СТРУКТУРИ «МЕТАЛ – ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТЕРІАЛ» З ВИКОРИСТАННЯМ ЕФЕКТУ ПЕЛЬТЬЄ

У роботі описано методику визначення контактної опору «метал – термоелектричний матеріал» з використанням компенсації охолоджуючої дії ефекту Пельтьє, що виникає при проходженні постійного електричного струму через контакт двох різномірних матеріалів, теплом Джоуля, що виділяється на контактному опорі. Наведено фізичну модель такого процесу та результати комп'ютерного моделювання, що підтверджують можливість його реалізації на практиці. Бібл. 30, рис. 9.

Ключові слова: електричний контактний опір, вимірювання, ефект Пельтьє, комп'ютерне моделювання, термоелектричні перетворювачі енергії.

Вступ

Розробка методів і обладнання для аналізу якості контактних структур у термоелектричних перетворювачах енергії є надзвичайно важливим і актуальним завданням. Це зумовлено потребою зменшення розмірів термоелектричних перетворювачів енергії, що дозволить значно знизити вартість і зробити їх доступними для широкого практичного застосування. Як відомо, основною перешкодою на цьому шляху є саме великі значення контактних опорів, оскільки їх вплив на ефективність термоелектричних перетворювачів енергії зростає при зменшенні висоти віток термоелементів, з яких вони виготовлені [1–14].

Для розробки технологій виготовлення контактних структур з оптимальними значеннями контактної опору необхідно провести низку експериментальних досліджень, що можливі лише за наявності точних методів та сучасного обладнання для вимірювання контактних опорів. При цьому, як показує аналіз літератури [15, 16], такого обладнання на сьогодні ще не створено. Розроблені методи вимірювання електричного контактної опору у термоелектриці можна розділити на такі, що ґрунтуються на вимірюванні характеристик «пачкових» контактних структур, що представляють собою ряд послідовно з'єднаних термоелементів з контактними опорами; зондові та мікроелектронні методи, що потребують виготовлення тестових структур.

Зокрема, у роботі [17] розглянуто зондовий метод вимірювання електричного контактної опору «метал – термоелектричний матеріал» та наведено результати аналізу можливих похибок вимірювань та комп'ютерної оптимізації такого методу для досягнення їх мінімальних значень.

Цікавою можливістю визначення контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» є використання ефекту Пельтьє, що виникає при проходженні постійного електричного струму через контакт двох різнорідних матеріалів. При цьому контакт охолоджується або нагрівається в залежності від напрямку струму. Зміна температури контакту залежить від співвідношення тепла Пельтьє і тепла Джоуля та визначається величиною амплітуди струму, що пройшов через контакт. Для термоелектричних матеріалів, що мають високі значення коефіцієнту термоЕРС, охолоджуюча дія ефекту Пельтьє при невеликих струмах переважає тепло Джоуля. Однак, по мірі зростання струму, у силу квадратичної залежності тепла Джоуля від величини струму і лінійної залежності від неї тепла Пельтьє, при деякому значенні струму ці теплоти зрівнюються. Тоді величина контактного опору може бути знайдена з рівняння теплового балансу. Індикатором зміни температури контакту може служити термоЕРС, що виникає у зразку після проходження імпульсу струму (рис. 1). Криві I_1 , I_2 на рис. 1 відповідають випадку, коли тепло Пельтьє переважає тепло Джоуля, криві I_4 , I_5 – випадкам, коли переважає тепло Джоуля, а крива I_3 – коли ці теплоти приблизно рівні.

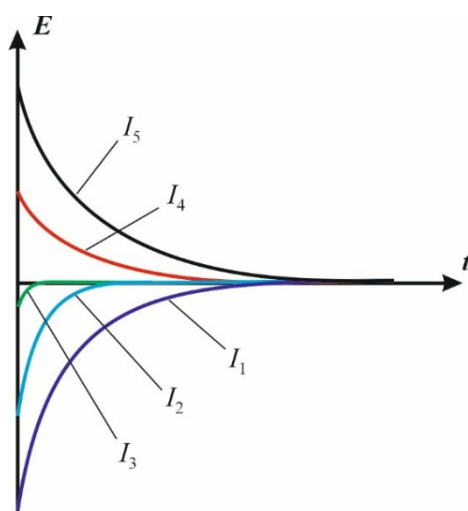


Рис. 1. Типовий вигляд імпульсів термоЕРС для різних значень амплітуди струму через досліджуваний контакт.

На можливість реалізації цього методу впливають різні фактори, такі як тепло Джоуля, що виникає у об'ємі зразка, теплообмін з оточуючим середовищем тощо.

Тому метою цієї роботи був аналіз можливостей визначення контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» з використанням компенсації охолоджуючої дії ефекту Пельтьє теплом Джоуля, що виділяється на контактному опорі, шляхом детального аналізу його фізичної моделі такого процесу та комп'ютерного моделювання.

Для досягнення поставленої мети використано підхід, який полягає у аналізі детальної фізичної моделі процесу вимірювань та комп'ютерному моделюванні розподілів фізичних полів у досліджуваних зразках і елементах конструкції вимірювального пристрою. Такий підхід раніше був успішно застосований в Інституті термоелектрики (Україна) для створення високоточного обладнання для вимірювання термоелектричних параметрів матеріалів [18–27].

1. Опис процесу вимірювань та його фізична модель

Фізична модель процесу вимірювання електричного контактного опору з використанням ефекту Пельтьє наведена на рис. 2. Вона містить два зразки різнорідних матеріалів, між якими

знаходиться перехідний контактний шар, регульоване джерело імпульсів струму, струмопідводи, осцилограф для реєстрації термоЕРС, що виникає у зразку після проходження імпульсу струму, та потенціальні зонди.

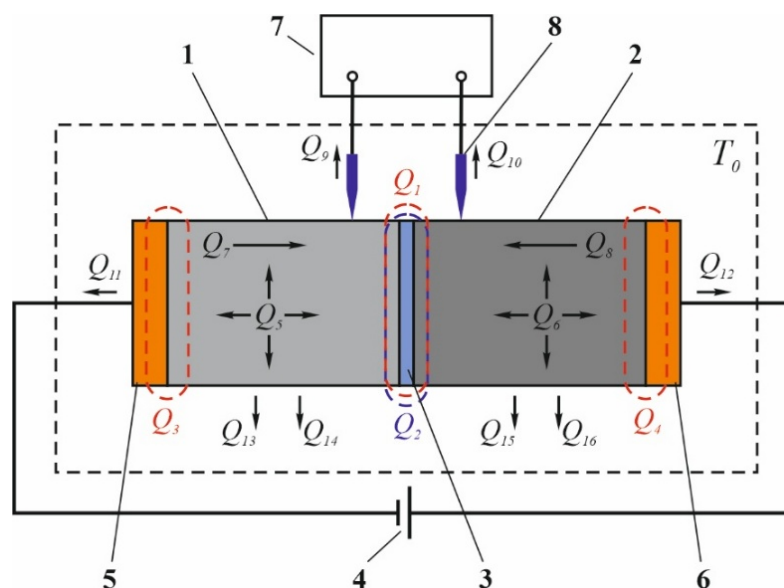


Рис. 2. Фізична модель процесу вимірювання електричного контактного опору з використанням ефекту Пельтьє: 1, 2 – досліджувані зразки різнорідних матеріалів; 3 – перехідний контактний шар; 4 – регульоване джерело імпульсів струму; 5, 6 – металеві контактні пластини; 7 – осцилограф; 8 – потенціальні зонди.

На рис. 2 також позначено теплові потоки Q_i , що виникають у досліджуваній структурі: Q_1 – тепло Джоуля, що виділяється на досліджуваному контактному опорі між зразками; Q_2 – тепло Пельтьє, що поглинається на контакті між зразками; Q_3, Q_4 – тепло Пельтьє, що виділяється на контактах зразків з струмопідводами; Q_5, Q_6 – тепло Джоуля, що виділяється у об’ємі зразків; Q_7, Q_8 – теплові потоки теплопровідністю у зразках; $Q_9 – Q_{12}$ – теплові потоки від досліджуваної контактної структури до оточуючого середовища по струмових провідниках та потенціальних зондах; Q_{13}, Q_{15} – теплові потоки від досліджуваної контактної структури до оточуючого середовища шляхом конвекції; Q_{14}, Q_{16} – теплові потоки від досліджуваної контактної структури до оточуючого середовища шляхом випромінювання.

За ідеєю методики вимірювань величина контактний опору знаходиться з балансу теплот Пельтьє та Джоуля на контакті

$$Q_1 = Q_2 \quad (1)$$

або

$$I_0^2 R_{cont.} = (\alpha_1 - \alpha_2) I_0 T, \quad (2)$$

де I_0 – струм при якому відбувається компенсація охолоджуючої дії ефекту Пельтьє теплом Джоуля (тобто при нульовому значенні термоЕРС після пропускання імпульсу струму); $R_{cont.}$ – опір контакту; α_1, α_2 – коефіцієнти термоЕРС матеріалу зразків (визначені окремо).

Відповідно, питомий контактний опір $\rho_{cont.}$ можна визначити за формулою

$$\rho_{cont.} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) T}{I_0} S, \quad (3)$$

де S – площа контакту.

Для аналізу впливу теплових потоків Q_i на можливість застосування формули (3) було проведено комп'ютерне моделювання процесу вимірювань, що відповідає фізичній моделі, показаній на рис. 2.

2. Комп'ютерна модель

Розподіли температури $T(x, y, z, t)$ та електричного потенціалу $\varphi(x, y, z, t)$ у досліджуваній структурі можна отримати, виходячи із законів збереження електричного заряду і енергії.

Для цього необхідно для кожного елемента фізичної моделі, наведеної на рис. 2, розв'язати систему диференціальних рівнянь з відповідними граничними умовами, записану у вигляді

$$\begin{cases} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot ((\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha \varphi \sigma) \nabla T) - \nabla \cdot ((\alpha \sigma T + \varphi \sigma) \nabla \varphi) = 0, \\ \nabla \cdot \left(\varepsilon \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) - \nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) - \nabla \cdot (\sigma \alpha \nabla T) = 0. \end{cases}, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт термоЕРС, σ – електропровідність, κ – теплопровідність, ρ – густина, C – теплоємність, ε – діелектрична проникність.

Комп'ютерна модель побудована за допомогою пакету прикладних програм COMSOL Multiphysics [28], що використовує для розрахунків метод скінчених елементів [29, 30]. Граничні умови для такої моделі:

– бічні поверхні зразків, контактних пластин, струмопідводів і потенціальних зондів електрично ізольовані

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{j} = 0 ;$$

– через струмопідводи протікає прямокутний імпульс струму $I(t)$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{j} = I(t) / S_{cm} ;$$

– кінці струмопідводів підтримуються при температурі навколишнього середовища T_0

$$T = T_0 ;$$

– бічні поверхні зразків, контактних пластин, струмопідводів і потенціальних зондів знаходяться в стані теплообміну з навколишнім середовищем

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = h(T_0 - T),$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі.

Як приклад, на рис. 3, 4 показано результати комп'ютерних розрахунків часових залежностей температури та електричного потенціалу у досліджуваній контактній структурі у випадку контакту між двома зразками термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te* різного типу провідності ($\alpha_1 = 200$ мкВ/К; $\alpha_2 = -200$ мкВ/К; $\kappa_1 = \kappa_2 = 2$ Вт/(м²·К); $\sigma_1 = \sigma_2 = 1000$ Ом⁻¹·см⁻¹) з довжиною 2 мм і площею поперечного перерізу 1×1 мм². Температура оточуючого середовища $T_0 = 300$ К, величина контактного опору $1 \cdot 10^{-6}$ Ом·см², амплітуда прямокутного імпульсу струму 400 А, його тривалість – $1 \cdot 10^{-6}$ с.

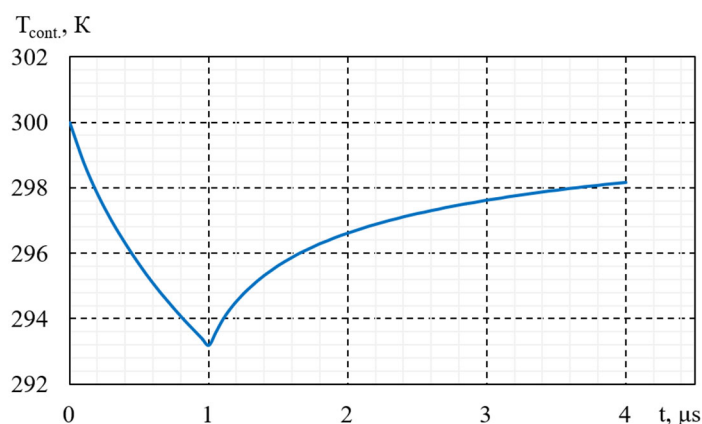


Рис. 3. Приклад часової залежності температури у місці контакту двох зразків термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te* різного типу провідності при пропусканні через нього прямокутного імпульсу струму.

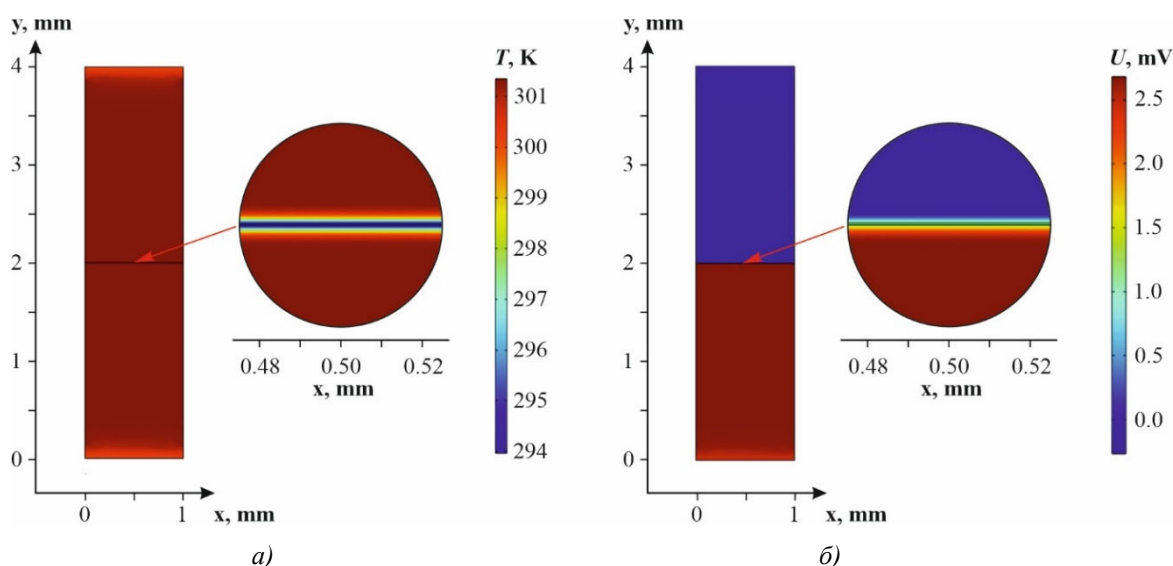


Рис. 4. Типовий вигляд розподілів температури (а) і електричного потенціалу (б) у двох контактуючих між собою зразках термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te* різного типу провідності при пропусканні через них прямокутного імпульсу струму.

3. Результати комп'ютерного моделювання

Для аналізу можливостей визначення контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» з використанням ефекту Пельтьє було розглянуто випадок контакту між зразком термоелектричного матеріалу на основі *Bi-Te* ($\alpha = 200$ мкВ/К; $\sigma = 1000$ Ом⁻¹·см⁻¹; $\kappa = 2$ Вт/(м²·К)) та зразком з нікелю. Довжина зразків – 2 мм, площа поперечного перерізу – 1×1 мм². Температура оточуючого середовища $T_0 = 300$ К.

На рис. 5 наведено, отримані за допомогою комп'ютерного моделювання, часові залежності термоЕРС для різних значень амплітуди імпульсів струму через досліджуваний контакт з величиною електричного контактного опору $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см²; тривалість імпульсів струму – 1 мкс.

Як видно з рисунка, тепло Пельтьє, яке поглинається на контакті двох зразків, повністю компенсується теплом Джоуля, яке виділяється на контактному опорі, при імпульсі струму амплітудою 120 А, що відповідає заданому значенню контактного опору.

На рис. 6 наведено аналогічні часові залежності термоЕРС для випадку контактного електричного опору $1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Тривалість імпульсів струму – $1 \cdot \mu\text{с}$, величина амплітуди імпульсу струму, при якому ні нагріву, ні охолодження контакту не спостерігається – 1200 А .

Як видно з порівняння залежностей, наведених на рис. 5 та 6, значення сигналів термоЕРС після пропускання імпульсів струму підвищилось, а, отже, чутливість вимірювань зростає при зниженні контактного опору, на відміну від зондового методу вимірювання контактного опору.

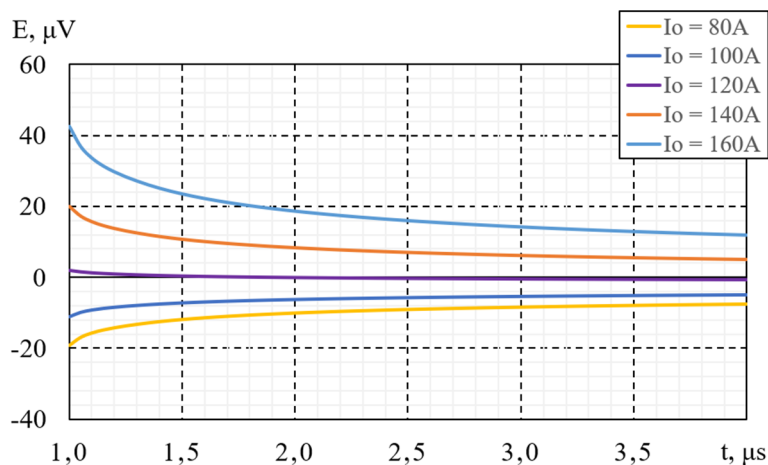


Рис. 5. Часові залежності термоЕРС для різних значень амплітуди імпульсів струму через досліджуваний контакт «матеріал на основі Ві-Те – нікель» (величина контактного опору $5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, тривалість імпульсу $1 \cdot \mu\text{с}$)

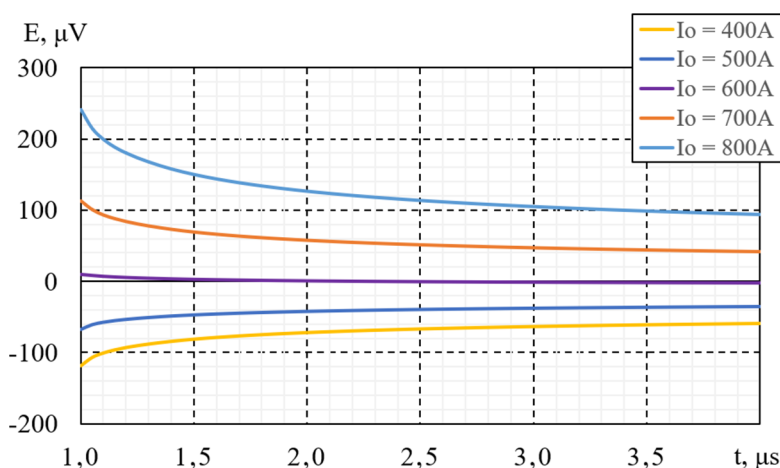


Рис. 6. Часові залежності термоЕРС для різних значень амплітуди імпульсів струму через досліджуваний контакт «матеріал на основі Ві-Те – нікель» (величина контактного опору $1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, тривалість імпульсу $1 \cdot \mu\text{с}$)

При подальшому зменшенні контактного опору необхідні імпульси струму більшої амплітуди. Це призводить до значного нагріву зразків теплом Джоуля, що виділяється у їх об'ємі, і підвищенню впливу цього тепла на температуру в області контакту зразків. Ця проблема вирішується зменшенням тривалості імпульсу струму.

На рис. 7–9 наведено часові залежності термоЕРС для величин контактних опорів $5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, $1 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ та $5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ відповідно (тривалість імпульсів струму – $0,2$, $0,1$ та $0,05 \cdot \mu\text{с}$).

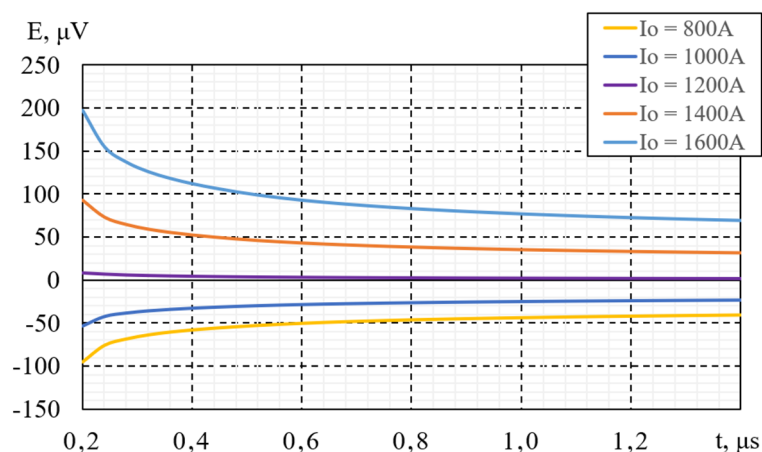


Рис. 7. Часові залежності термоЕРС для різних значень амплітуди імпульсів струму через досліджуваний контакт «матеріал на основі Bi-Te – нікель» (величина контактної опору $5 \cdot 10^{-7}$ Ом·см², тривалість імпульсу 0.2·мкс)

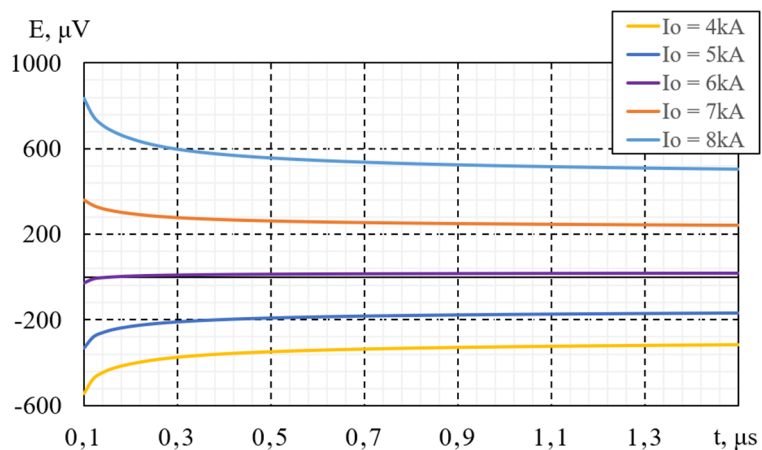


Рис. 8. Часові залежності термоЕРС для різних значень амплітуди імпульсів струму через досліджуваний контакт «матеріал на основі Bi-Te – нікель» (величина контактної опору $1 \cdot 10^{-7}$ Ом·см², тривалість імпульсу 0.1·мкс)

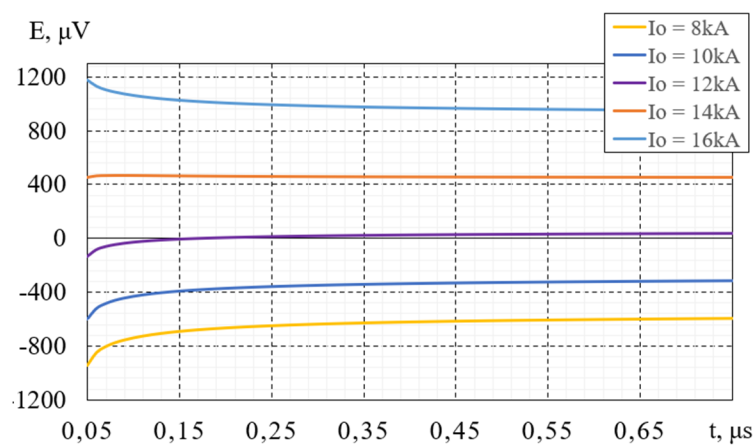


Рис. 9. Часові залежності термоЕРС для різних значень амплітуди імпульсів струму через досліджуваний контакт «матеріал на основі Bi-Te – нікель» (величина контактної опору $5 \cdot 10^{-8}$ Ом·см², тривалість імпульсу 0.05·мкс)

Визначені таким чином значення амплітуди струму, при якій відбувається компенсація тепла Пельтьє теплом Джоуля, що виділяється на контактному опорі, знаходяться в межах до 10 % від тих, що відповідають заданим у моделі значенням контактного опору.

Отримані результати комп'ютерного моделювання підтверджують можливість вимірювання електричного контактного опору за допомогою ефекту Пельтьє та є основою для створення відповідного вимірювального обладнання.

Висновки

1. Побудовано детальну фізичну модель процесу вимірювання електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» з використанням компенсації охолоджуючої дії ефекту Пельтьє, що виникає при проходженні постійного електричного струму через контакт двох різнорідних матеріалів, теплом Джоуля, що виділяється на контактному опорі. Розроблено комп'ютерну модель на її основі.
2. За допомогою комп'ютерного моделювання отримано часові залежності термоЕРС, що виникає після пропускання імпульсу струму через контакт «матеріал на основі *Bi-Te* – нікель», для різних значень величини контактного опору у діапазоні від $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² до $5 \cdot 10^{-8}$ Ом·см², а також амплітуди імпульсів струму та їх тривалості. Підтверджено можливість вимірювання електричного контактного опору з використанням ефекту Пельтьє.
3. Встановлено, що на відміну від зондового методу вимірювання контактного опору, величина термоЕРС, а, отже, і чутливість вимірювань, підвищується при зниженні контактного опору.

Література

1. T. Tritt. (2000). *Recent Trends in Thermoelectric Materials Research, Part Two (Semiconductors and Semimetals, Volume 70)*. Academic Press, 320 p. ISBN-13: 978-0127521794.
2. D.M. Rowe. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano* (1st ed.). CRC Press, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420038903>.
3. Rowe D.M. (Ed.). (2012). *Modules, Systems, and Applications in Thermoelectrics* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11892>.
4. Kania T., Schilder B., Kissel T. et al. (2013). Development of a Miniaturized Energy Converter Without Moving Parts. *Flow Turbulence Combust* 90, 741–761. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9418-8>
5. C. Yuan, D. Hohlfeld, T. Bechtold. (2021). Design optimization of a miniaturized thermoelectric generator via parametric model order reduction. *Microelectronics Reliability*. Volume 119, 114075, ISSN 0026-2714, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114075>.
6. J. Vondrak, M. Schmidt, A. Proto, M. Penhaker, J. Jargus and L. Peter. (2019). "Using Miniature Thermoelectric Generators for Wearable Energy Harvesting," 2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), Split, Croatia, pp. 1–6, doi: 10.23919/SpliTech.2019.8782997.
7. Gustavo G. Dalkiranis, João H.C. Bocchi, Osvaldo N. Oliveira Jr., and Gregório C. Faria. (2023). *ACS Omega*, 8 (10), 9364–9370 DOI: 10.1021/acsomega.2c07916.
8. Li J., Ma B., Wang R., Han L. (2011). Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs. *Microelectron. Reliab*, 51, 2210–2215.
9. Shen L., Chen H., Xiao F., Yang Y., Wang S. (2014). The step-change cooling performance of miniature thermoelectric module for pulse laser. *Energy Convers. Manag*, 80, 9–45.

10. Zhang W., Shen L., Yang Y., Chen H. (2015). Thermal management for a micro semiconductor laser based on thermoelectric cooling. *Appl. Therm. Eng.* 90, 664–673.
11. Piotrowski A., Piotrowski J., Gawron W., Pawluczyk J., Pedzinska M. (2009). Extension of usable spectral range of Peltier cooled photodetectors. *Acta Phys. Pol. A*, 116, 52–55.
12. L.M. Vikhor, L.I. Anatyshuk, and P.V. Gorskyi (2019). Electrical resistance of metal contact to Bi_2Te_3 based thermoelectric legs. *Journal of Applied Physics*, 126, 164503-1 – 164503-8.
13. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Mitskaniuk N.V. (2019). Contact resistance due to potential barrier at thermoelectric material – metal boundary. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 74–88.
14. Vikhor L., Kotsur M. (2023). Evaluation of Efficiency for Miniscale Thermoelectric Converter under the Influence of Electrical and Thermal Resistance of Contacts. *Energies*, 16, 4082-1 – 22. <https://doi.org/10.3390/en16104082>.
15. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 1). *Journal of Thermoelectricity*, 2, 5–24.
16. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 2). *Journal of Thermoelectricity*, 3-4, 5–17.
17. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Strusovskiy K.I. (2023). Computer research on the accuracy of probe method for measuring the electrical contact resistance of “metal – thermoelectric material”. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 38–48.
18. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2015). Absolute Method for Measuring of Thermoelectric Properties of Materials. *Materials Today: Proceedings*, 2(2), 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.110>.
19. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). On Improvement of the Accuracy and Speed in the Process of Measuring Characteristics of Thermoelectric Materials. *Journal of Electronic Materials*, 43(10), 3863–3869. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3300-5>.
20. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 1, 65–73.
21. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. Modified Harman's method (2012). *AIP Conference Proceedings*, 1449, 373 – 376. DOI: 10.1063/1.4731574.
22. Anatyshuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials. (2012) *Journal of Electronic Materials*, 41 (6), 1680–1685. DOI: 10.1007/s11664-012-1973-1.
23. Anatyshuk L.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. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 71–78.
24. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2021). Method for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 71–82.
25. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantinovich I.A., Lysko V.V., Puhantseva O.V., Rozver Y., Tiumentsev V.A. (2016). Calibration bench for thermoelectric converters of heat flux. *Journal of Thermoelectricity*, 5, 65–72.
26. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V. (2018). Ways for quality improvement in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 90–100.
27. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V., Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 80–88.

28. COMSOL Multiphysics, v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2021.
29. Kenneth H. Huebner, Donald L. Dewhirst, Douglas E. Smith, Ted G. Byrom. (2001). *The Finite Element Method for Engineers*, 4th Edition. ISBN: 978-0-471-37078-9. Wiley-Interscience. 744 p.
30. J.N. Reddy (2005). *An Introduction to the Finite Element Method*. 3rd Edition (McGraw-Hill Mechanical Engineering). 784 p.

Надійшла до редакції: 20.03.2024.

L.I. Anatyshuk, *Acad. NAS Ukraine*^{1,2}

V.V. Lysko, *Cand. Sc (Phys & Math)*^{1,2}

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

1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine;

e-mail: anatysh@gmail.com

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,

2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

MEASUREMENT OF ELECTRICAL CONTACT RESISTANCE OF THE “METAL – THERMOELECTRIC MATERIAL” STRUCTURE USING THE PELTIER EFFECT

The paper describes a method for determining the contact resistance of a “metal – thermoelectric material” using compensation for the cooling action of the Peltier effect, which occurs when a direct electric current passes through the contact of two dissimilar materials, by Joule heat released at the contact resistance. A physical model of such a process and the results of computer simulation are presented, confirming the possibility of its implementation in practice. 30 sources, 9 figures.

Key words: electrical contact resistance, measurement, Peltier effect, computer simulation, thermoelectric energy converters.

References

1. T. Tritt. (2000). *Recent Trends in Thermoelectric Materials Research*, Part Two (Semiconductors and Semimetals, Volume 70). Academic Press, 320 p. ISBN-13: 978-0127521794.
2. D.M. Rowe. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano* (1st ed.). CRC Press, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420038903>.
3. Rowe D.M. (Ed.). (2012). *Modules, Systems, and Applications in Thermoelectrics* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11892>.
4. Kania T., Schilder B., Kissel T. et al. (2013). Development of a Miniaturized Energy Converter Without Moving Parts. *Flow Turbulence Combust* 90, 741–761. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9418-8>
5. C. Yuan, D. Hohlfeld, T. Bechtold. (2021). Design optimization of a miniaturized thermoelectric generator via parametric model order reduction. *Microelectronics Reliability*. Volume 119, 114075, ISSN 0026-2714, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114075>.
6. J. Vondrak, M. Schmidt, A. Proto, M. Penhaker, J. Jargus and L. Peter. (2019). "Using Miniature Thermoelectric Generators for Wearable Energy Harvesting," 2019 4th International Conference on

- Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), Split, Croatia, pp. 1–6, doi: 10.23919/SpliTech.2019.8782997.
7. Gustavo G. Dalkiranis, João H.C. Bocchi, Osvaldo N. Oliveira Jr., and Gregório C. Faria. (2023). ACS Omega, 8 (10), 9364–9370 DOI: 10.1021/acsomega.2c07916.
 8. Li J., Ma B., Wang R., Han L. (2011). Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs. Microelectron. Reliab, 51, 2210–2215.
 9. Shen L., Chen H., Xiao F., Yang Y., Wang S. (2014). The step-change cooling performance of miniature thermoelectric module for pulse laser. Energy Convers. Manag, 80, 9–45.
 10. Zhang W., Shen L., Yang Y., Chen H. (2015). Thermal management for a micro semiconductor laser based on thermoelectric cooling. Appl. Therm. Eng. 90, 664–673.
 11. Piotrowski A., Piotrowski J., Gawron W., Pawluczyk J., Pedzinska M. (2009). Extension of usable spectral range of Peltier cooled photodetectors. Acta Phys. Pol. A, 116, 52–55.
 12. L.M. Vikhor, L.I. Anatyshuk, and P.V. Gorskyi (2019). Electrical resistance of metal contact to Bi_2Te_3 based thermoelectric legs. *Journal of Applied Physics*, 126, 164503-1 – 164503-8.
 13. Anatyshuk L.I., Vikhor L.M., Mitskaniuk N.V. (2019). Contact resistance due to potential barrier at thermoelectric material – metal boundary. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 74–88.
 14. Vikhor L., Kotsur M. (2023). Evaluation of Efficiency for Miniscale Thermoelectric Converter under the Influence of Electrical and Thermal Resistance of Contacts. *Energies*, 16, 4082-1 – 22. <https://doi.org/10.3390/en16104082>.
 15. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 1). *Journal of Thermoelectricity*, 2, 5–24.
 16. Vikhor L.M., Gorskyi P.V., Lysko V.V. (2022). Methods for measuring contact resistances of “metal – thermoelectric material” structures (part 2). *Journal of Thermoelectricity*, 3-4, 5–17.
 17. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Strusovskiy K.I. (2023). Computer research on the accuracy of probe method for measuring the electrical contact resistance of “metal – thermoelectric material”. *Journal of Thermoelectricity*, 4, 38–48.
 18. Anatyshuk L.I., Havryliuk M.V., Lysko V.V. (2015). Absolute Method for Measuring of Thermoelectric Properties of Materials. *Materials Today: Proceedings*, 2(2), 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.110>.
 19. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2014). On Improvement of the Accuracy and Speed in the Process of Measuring Characteristics of Thermoelectric Materials. *Journal of Electronic Materials*, 43(10), 3863–3869. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3300-5>.
 20. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2012). Investigation of the effect of radiation on the precision of thermal conductivity measurement by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 1, 65–73.
 21. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. Modified Harman's method (2012). AIP Conference Proceedings, 1449, 373 – 376. DOI: 10.1063/1.4731574.
 22. Anatyshuk L.I., Havrylyuk N.V., Lysko V.V. Methods and equipment for quality control of thermoelectric materials. (2012) *Journal of Electronic Materials*, 41 (6), 1680–1685. DOI: 10.1007/s11664-012-1973-1.
 23. Anatyshuk L.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. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 71–78.
 24. Anatyshuk L.I., Lysko V.V. (2021). Method for determining the thermoelectric parameters of materials forming part of thermoelectric cooling modules. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 71–82.
 25. Anatyshuk L.I., Kobylanskyi R.R., Konstantinovich I.A., Lysko V.V., Puhantseva O.V.,

- Rozver Y., Tiumentsev V.A. (2016). Calibration bench for thermoelectric converters of heat flux. *Journal of Thermoelectricity*, 5, 65–72.
26. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V. (2018). Ways for quality improvement in the measurement of thermoelectric material properties by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 2, 90–100.
27. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Havryliuk M.V., Tiumentsev V.A. (2018). Automation and computerization of measurements of thermoelectric parameters of materials. *Journal of Thermoelectricity*, 3, 80–88.
28. COMSOL Multiphysics, v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2021.
29. Kenneth H. Huebner, Donald L. Dewhirst, Douglas E. Smith, Ted G. Byrom. (2001). *The Finite Element Method for Engineers*, 4th Edition. ISBN: 978-0-471-37078-9. Wiley-Interscience. 744 p.
30. J.N. Reddy (2005). *An Introduction to the Finite Element Method*. 3rd Edition (McGraw-Hill Mechanical Engineering). 784 p.

Submitted: 20.03.2024.