

УДК 53.08

**Лисько В.В.**, канд. фіз.-мат. наук<sup>1,2</sup>  
**Разіньков В.В.**, канд. фіз.-мат. наук<sup>1</sup>  
**Гаврилюк М.В.**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;  
*e-mail: anatyach@gmail.com*

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58000, Україна

## УСТАНОВКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОНТАКТНОГО ОПОРУ СТРУКТУРИ “МЕТАЛ – ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТЕРІАЛ”

---

*У роботі наведено методика визначення електричного контактного опору “метал – термоелектричний матеріал” на основі зондового методу з термостатуванням однієї зі сторін досліджуваної контактної структури. Описано конструкцію експериментальної установки для реалізації такої методики вимірювань. Наведено приклад результатів досліджень контактної опору структури “нікель – екструдований термоелектричний матеріал на основі Ві-Те”. Бібл. 27, рис. 8, табл. 1.*

**Ключові слова:** електричний контактний опір, зондовий метод, вимірювання, ефект Пельтьє, термоелектричні перетворювачі енергії.

### Вступ

Вартість термоелектричних перетворювачів енергії може бути зменшена у десятки разів і наближатись до необхідної для широких практичних застосувань термоелектрики завдяки їх мініатюризації. Однак, спроби створити мініатюрні модулі наштовхуються на зростаючий вплив контактних опорів, які зумовлюють значне зниження якості модулів [1–5].

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 [6, 7], 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.

У роботі [8] 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. Показано, що відхилення від ізотермічних умов у зразку, викликані впливом ефектів Джоуля та Пельтьє, можуть призводити до дуже значних (понад 100 %) похибок при вимірюваннях та

запропоновано використовувати для їх зменшення зразки з прямокутним перерізом та термостатування їх ширшої сторони.

Мета цієї роботи – на основі аналізу особливостей фізичних процесів, що мають місце при вимірюванні електричного контактного опору «метал-термоелектричний матеріал» зондовим методом, розробити конструкцію установки для реалізації цього методу вимірювань з використанням термостатування досліджуваної контактної структури.

## 1. Опис методики вимірювання електричного контактного опору та конструкція вимірювальної установки

Фізична модель зондового методу вимірювання електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» наведена на рис. 1. Досліджувана структура складається зі зразка термоелектричного матеріалу 1 з нанесеним на його торцях металевим (наприклад, нікелевим) покриттям 3, перехідного контактний шару 2, шару припою 4 та металевих (наприклад, мідних) контактних пластин 5. На бічній поверхні зразка розташовано зонд у формі загостреної пластини або голки, яким вимірюється розподіл потенціалу вздовж зразка при пропусканні через нього постійного електричного струму величиною  $I$ . Для мінімізації впливу ефектів Пельтьє та Джоуля зразок однією зі сторін приклеїно до електричного ізолятора з високою теплопровідністю (наприклад, кераміки з окису берилію) та розміщено на термостатованій поверхні.

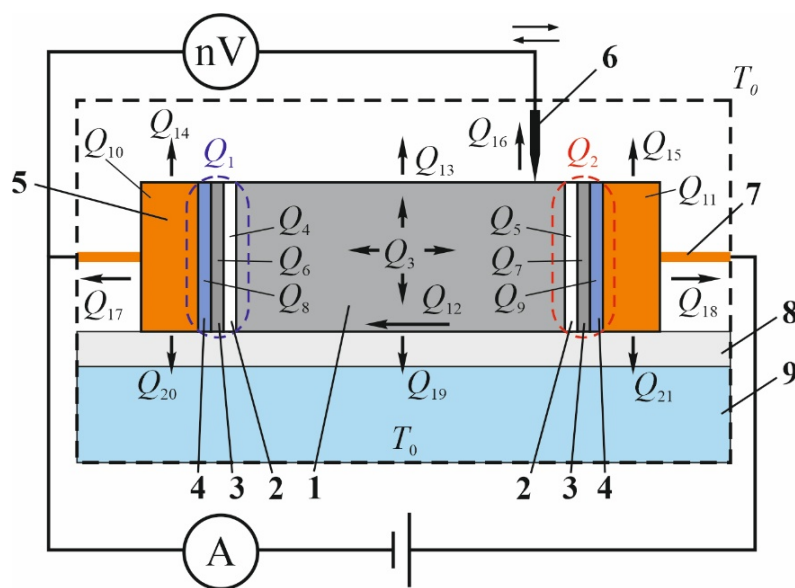


Рис. 1. Фізична модель вимірювання електричного контактного опору «метал-термоелектричний матеріал» зондовим методом з термостатуванням зразка: 1 – зразок термоелектричного матеріалу; 2 – перехідний контактний шар; 3 – металеве антидифузійне покриття; 4 – припій; 5 – металеві контактні пластини; 6 – рухомий потенціальний зонд; 7 – струмопідводи; 8 – електричний ізолятор; 9 – термостат

На рис. 1:  $T_0$  – температура оточуючого середовища;  $Q_1$  – тепло Пельтьє, що поглинається на контакті «метал – термоелектричний матеріал»;  $Q_2$  – тепло Пельтьє, що виділяється на контакті «термоелектричний матеріал – метал»;  $Q_3$  – тепло Джоуля, що виділяється у об’ємі зразка термоелектричного матеріалу;  $Q_4, Q_5$  – тепло Джоуля, що виділяється на перехідних контактних шарах;  $Q_6, Q_7$  – тепло Джоуля, що виділяється у об’ємі металевих антидифузійних покриттів;  $Q_8, Q_9$  – тепло Джоуля, що виділяється у об’ємі шарів припою;  $Q_{10}, Q_{11}$  – тепло

Джоуля, що виділяється у об'ємі металевих контактних пластин;  $Q_{12}$  – тепловий потік від гарячого до холодного контакту «метал – термоелектричний матеріал»;  $Q_{13}$ ,  $Q_{14}$ ,  $Q_{15}$  – теплопередача від бічної поверхні зразка та металевих контактних пластин до оточуючого середовища шляхом випромінювання та конвекції;  $Q_{16}$ ,  $Q_{17}$ ,  $Q_{18}$  – теплопередача від бічної поверхні зразка та металевих контактних пластин до оточуючого середовища шляхом теплопровідності через потенціальний зонд та струмопідводи;  $Q_{19}$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{21}$  – теплопередача від бічної поверхні зразка та металевих контактних пластин до термостату.

Значення електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» визначається за формулою

$$\rho_c = \frac{S}{I} \cdot \Delta U, \quad (1)$$

де  $\rho_c$  – питомий електричний контактний опір «метал – термоелектричний матеріал»,  $\Delta U$  – спад напруги на контакті,  $S$  – площа контакту.

Як показало комп'ютерне об'єктно-орієнтоване моделювання за допомогою пакету прикладних програм Comsol Multiphysics [9, 10], при використанні термостатування навіть тільки однієї зі сторін зразка, неізотермічність у ньому значно зменшується (рис. 2). Похибка визначення контактної опору, викликана такою неізотермічністю, не перевищуватиме 2 % [8].

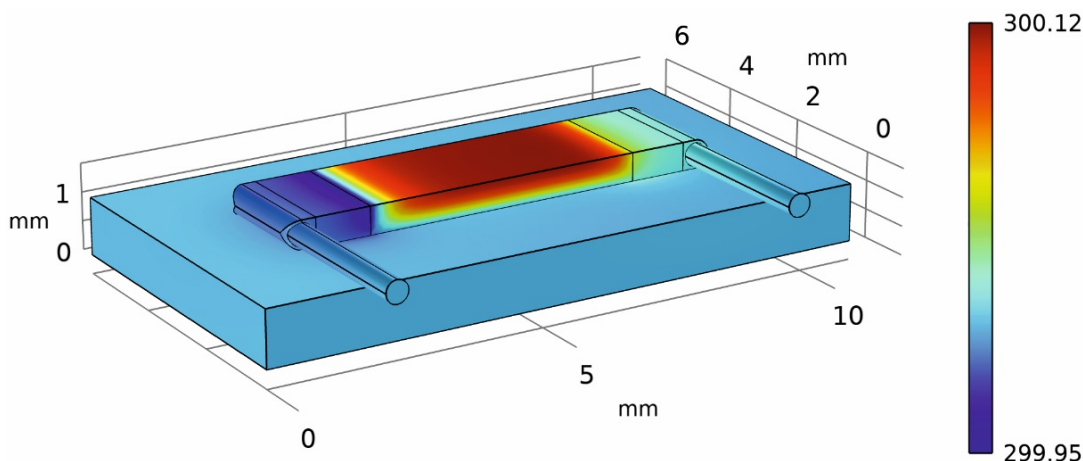


Рис. 2. Розподіл температури у досліджуваній контактній структурі при термостатуванні однієї з її поверхонь (для випадку зразка довжиною 5 мм та перерізом 0.5 мм на 2 мм, при струмі величиною 0.5А; контактний опір –  $10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>)

Конструкцію вимірювального блоку установки, розробленої в Інституті термоелектрики (Україна) для реалізації зондового методу вимірювання електричного контактної опору «метал-термоелектричний матеріал» з термостатуванням зразка, наведено на рис. 3.

На рухомому координатному столі мікроскопу, в круглій ніші встановлено базову металеву (з Д16Т) пластину 6. До неї гвинтами прикріплені мідний постамент 5, для встановлення берилієвої пластини з наклеєними на ній зразками 4 досліджуваних контактних структур. Для збільшення продуктивності на пластині може бути наклеєно декілька зразків (зазвичай 2–4 штуки). Струмопідводи від зразків припаяні до окремого малого клемника (на рисунку не показаний), який закріплені на мідному постаменті в безпосередній близькості від кристалів. Малий клемник, в свою чергу з'єднаний провідниками із загальним клемником, до

якого підключається решта елементів вимірювальної схеми.

Пластина з берилієвої кераміки 4 притискається до мідного постаменту 5 за допомогою двох накладних пластинок чотирма гвинтами. Для покращення теплового контакту пластини з постаментом використовується теплопровідна змазка, а зразки до кераміки приклеюються теплопровідним клеєм на спеціальній оснастці – для забезпечення точності і ідентичності їх встановлення.

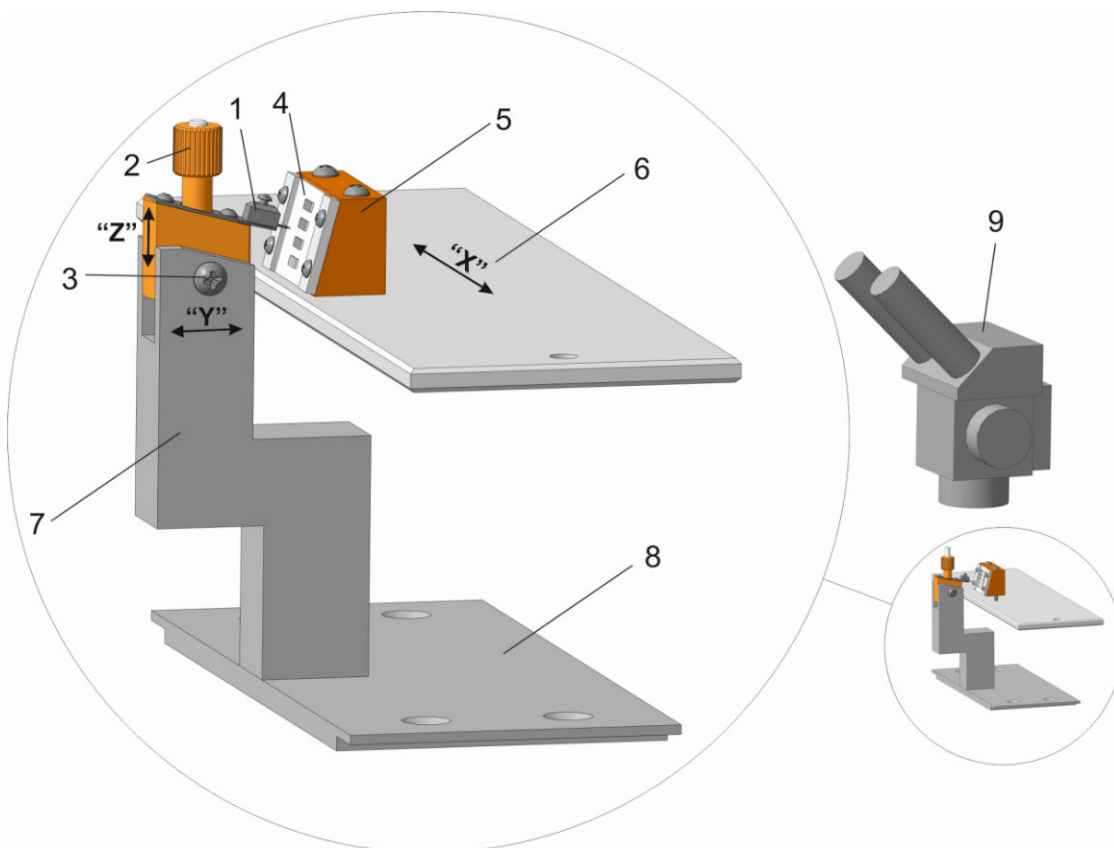


Рис. 3. Конструкція вимірювального блоку установки для вимірювання електричного контактного опору «метал-термоелектричний матеріал»: 1 – вимірювальний зонд; 2 – гвинт для вертикального переміщення зонду; 3 – боковий гвинт для жорсткої фіксації зонду; 4 – пластина з берилієвої кераміки, до якої приклеєно досліджувані зразки; 5 – мідний постамент; 6 – металева основа, що кріпиться до координатного стола мікроскопу; 7 – кронштейн; 8 – металева основа, що кріпиться до нижньої нерухомої чавунної станини мікроскопу; 9 – мікроскоп

До нижньої нерухомої чавунної станини мікроскопа прикріплена пластина 8, а до неї проміжний кронштейн 7 – для виносу в робочу зону стенду вузла зонду 1 (нерухомого по координатам X і Y). В цьому кронштейні 7 зроблений механізм вертикального переміщення (вісь Z) вузла зонду. Переміщення «вверх – вниз» здійснюється за допомогою гвинта 2, а його жорстка фіксація - боковим гвинтом 3. Сам зонд – це змінна, гостро заточена сталевий голка, діаметром до 0.3 мм, яка тримається за допомогою гвинта. Також зонд має пружинний демпфер по осі голки зонда, убезпечуючи від руйнування поверхні кристалу при здійсненні контакту.

Для зручності при спостереженні за переміщенням зонду та підведення його до зразка площадка постаменту зі зразками має нахил до вісь зору оглядового мікроскопа 9 на кут  $15^\circ$ . На такий же кут має нахил вісь зонда по горизонталі, так що вона перпендикулярна до площини зразка.

Вимірювання спаду напруги при проходженні через зразок стабілізованого за величиною постійного струму проводять, переміщуючи зонд і доторкаючись до поверхні зразка в точках вздовж його середньої лінії по висоті.

Надійний контакт з поверхнею зразка, при мінімізації заглиблення вістря голки зонду в його поверхню, забезпечується за допомогою схема електронної звукової сигналізації, яка спрацьовує в момент торкання вістрям голки до поверхні. При досягненні надійного контакту схему звукового сигналізатора відключають за допомогою тумблера «звук», щоб електричні потенціали зі схеми не спотворювали вимірювальні напруги.

Електричну схему з'єднань вимірювального блоку наведено на рис. 4.

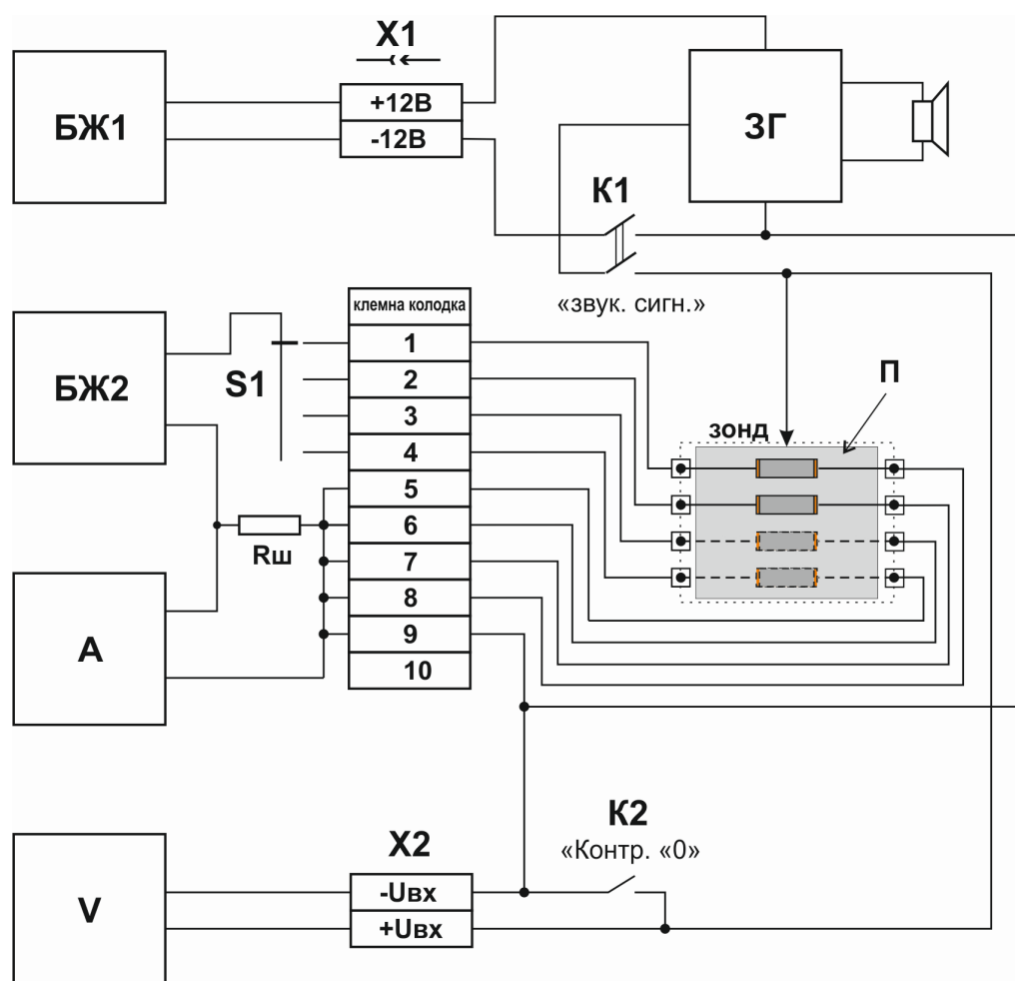


Рис. 4. Схема електричних з'єднань установки для вимірювання електричного контактного опору «метал-термоелектричний матеріал»: БЖ1 – блок живлення звукового сигналізатора; ЗГ – плата звукового генератора; БЖ2 – Джерело постійного струму для кристалів (прилад IT5962A); П – перемикач подачі струму на кристали; Rш – котушка опору P-321 для вимірювання величини струму; А – прилад для вимірювання струму через кристал (мультиметр M3500A); П – плата з наклеєними кристалами; V – вольтметр для вимірювання падіння напруги по кристалі; К1 – тумблер відключення звукового сигналізатора; К2 – тумблер закорочування входу вольтметра; X1-X4 – клеми, клемні колодки

Зовнішній вигляд розробленої установки для вимірювання електричного контактного опору «метал-термоелектричний матеріал» показано на рис. 5.

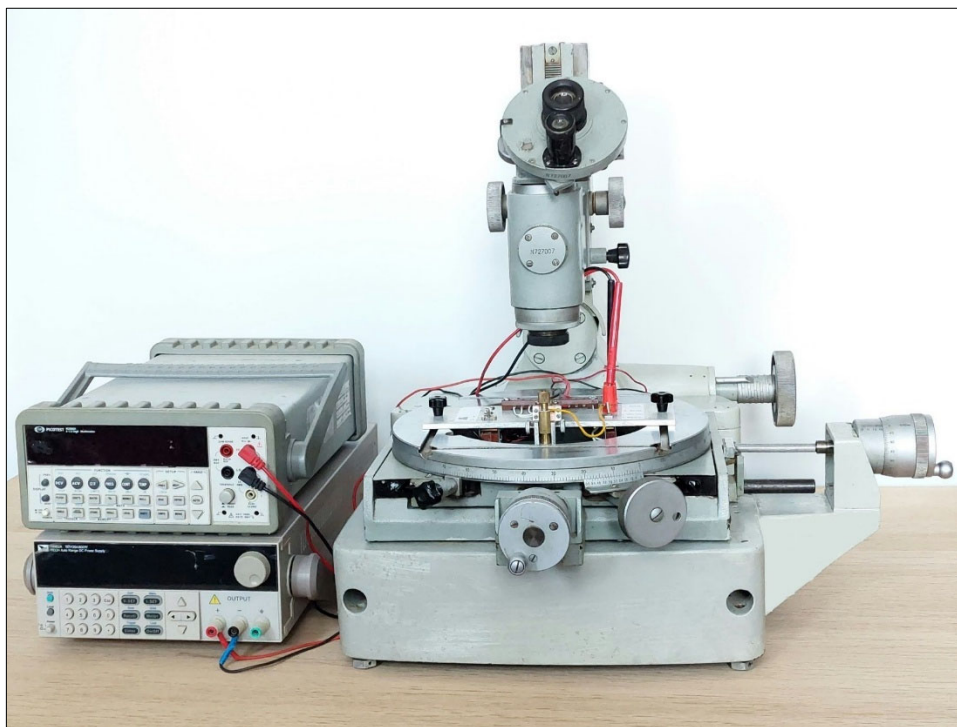


Рис. 5. Зовнішній вигляд установки для вимірювання електричного контактного опору «метал-термоелектричний матеріал»

## 2. Результати експериментальних досліджень

У приконтактній зоні зразка при проходженні струму має місце падіння напруги на: мідній шині товщиною 0.25 мм, яка припаяна на торців зразка; шарі припою між мідною шиною та нікелевим шаром товщиною 3 - 5 мкм; антидифузійному контактному шарі нікелю товщиною 2 - 2.5 мкм; контактному опорі між поверхнею антидифузійного шару нікелю та поверхнею термоелектричного матеріалу; шарі термоелектричного матеріалу між поверхнею нікелевого контактного шару та вістрям пересувного зонду. Сумарне падіння напруги на шарах припою та нікелю при вказаних товщинах шарів і величині струму 0.5 А не перевищує 0.1 мкВ, тому при визначенні контактного опору таким падінням напруги можна знехтувати. Падіння напруги на мідній шині товщиною 0.25 мм враховується у вигляді поправки.

Загальне падіння напруги між мідною шиною та місцем контакту точкового зонду до поверхні зразка термоелектричного матеріалу дорівнює сумі падіння напруги на контактному опорі та падінню напруги на ділянці зразка термоелектричного матеріалу від місця контактного шару та місця точкового зонду. Відповідно загальна величина контактний опору визначається як різниця між загальним опором (між мідною шиною та місцем контакту точкового зонду з поверхнею зразка, з врахуванням поправки) і омичним опором відповідної ділянки термоелектричного матеріалу. Тому формулу (1) для визначення питомого контактний опору можна переписати у вигляді

$$\rho_c = \frac{S}{I} \cdot \left[ (U - U_M) - \frac{l_{Ni} - l_1}{l_2 - l_1} (U_2 - U_1) \right], \quad (2)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу зразка,  $I$  – струм через зразок,  $U_M$  – поправка на падіння напруги на міді,  $l_{Ni}$  – координата шару нікелю,  $l_1$  – координата зонду на матеріал (позиція 1),  $l_2$  –

координата зонду на матеріалі для визначення електропровідності (позиція 2).

Таким чином, визначення питомого контактного опору зводиться до геометричних вимірів точного положення нікелевого шару, точного положення наконечника зонду в позиції 1 (на відстані приблизно 100 – 150 мкм від нікелевого шару), точного положення наконечника зонду в позиції 2 (на відстані приблизно 400 мкм від положення 1), товщини та ширини зразка та електричним вимірам струму та напруги на зонді в положеннях 1 та 2.

Для зменшення похибки вимірювання питомого контактного опору для електричних вимірювань використовувався прецизійний нановольтметр. Сумарна похибка електричних вимірювань при визначенні контактного опору на установці не перевищує 0.5%.

У Інституті термоелектрики проведено серію експериментальних досліджень контактного опору структури «нікель – екструдований термоелектричний матеріал на основі Ві-Те» з допомогою розробленої вимірювальної установки.

Вихідні заготовки екструдованих термоелектричних матеріалів мали циліндричну форму. З було вирізано зразки у вигляді дисків товщиною 5.0 мм, які, після нанесення на них шару нікелю, розрізались на верстаті струнного різання «Алтек-13009» на пластини шириною 2.0 мм. На торці таких пластин з нікелевим шаром припаювалися мідні шини шириною 2.0 мм та товщиною 0,25 мм. Після чого пластини з припаяними мідними шинами знову розрізались на станку струнної різки на зразки товщиною 0.5 мм. В результаті отримані зразки мають форму паралелепіпедів довжиною 5 мм з перерізом 0.5x2.0 мм і з напаяними на торцях мідними контактними шинами.

Для створення на поверхні зразків термоелектричних матеріалів контактного антидифузійного шару з нікелю використовувався електрохімічний метод осадження з електроліту. Товщина нікелевого шару складала 2.5 мкм. Для досягнення правильної геометричної форми зразків та зняття шорсткості з їх поверхні, перед нанесенням нікелю зразки шліфувалися на абразиві після чого вимірювалася їх товщина та ширина. Перед нанесенням шару нікелю контактна поверхня зразків стравлювалася для зняття дефектів, які виникли у процесі розмірної обробки поверхонь. На рис. 6 наведено збільшене зображення поверхні одного зі зразків після травлення поверхні (збільшення мікроскопа x400).

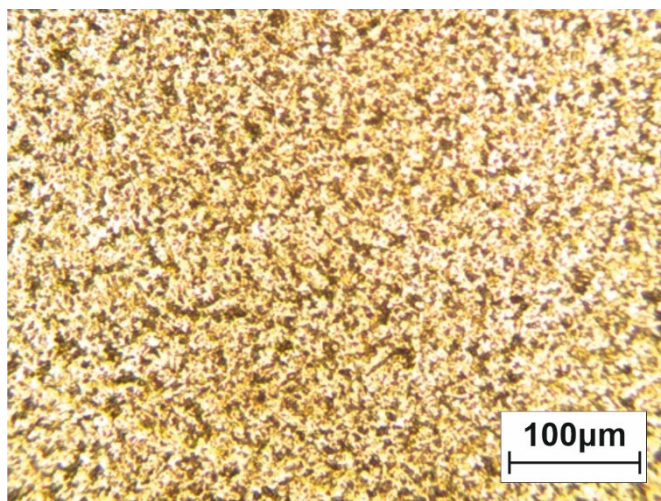


Рис. 6. Поверхня зразка екструдованого термоелектричного матеріалу n-типу після шліфування на мікропорошку з зерном менше 1 мкм та травлення

Оброблені таким чином зразки наклеювалися за допомогою теплопровідного клею широкою стороною на поверхню пластини з теплопровідної кераміки з окису берилію (рис. 7).

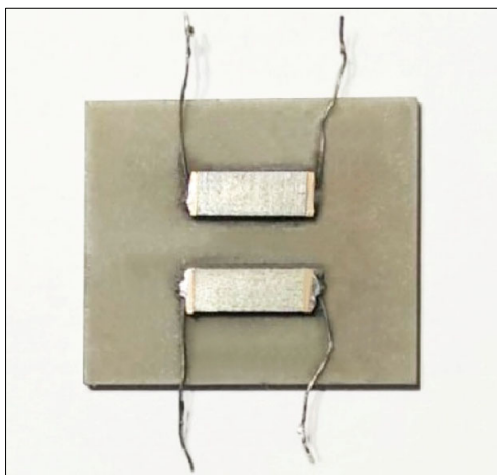


Рис. 7. Підкладка з окису берилію зі зразками для вимірювання контактної опору

Керамічна підкладка із зразками вставлялася та фіксувалася в вимірювальну комірку установки для вимірювання контактної опору (рис. 8).

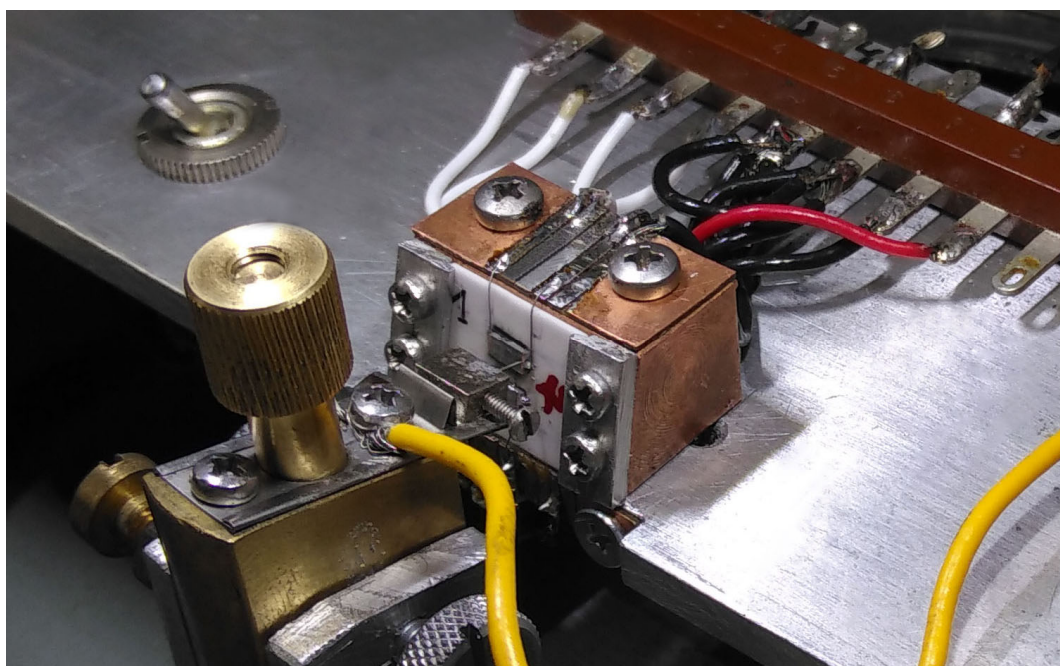


Рис. 8. Вимірювальна комірка з досліджуваними зразками, розміщеними на керамічній підкладці

Результати вимірювань контактної опору на 8 зразках з екструдованого термоелектричного матеріалу, поверхня яких перед електрохімічними осадженнями нікелевого шару оброблялась алмазними мікропорошками різної фракції, наведено в таблиці 1.

З аналізу отриманих значень питомого контактної опору випливає залежність між шорсткістю поверхні термоелектричного матеріалу та значеннями питомого контактної опору. Мінімальні значення питомого контактної опору досягаються для полірованої поверхні термоелектричних матеріалів.

Таблиця 1

Результати вимірювань електричного контактного опору  
структури «нікель – екструдований термоелектричний матеріал на основі *Bi-Te*»

№ з/п	Тип провідності термоелектричного матеріалу	Фракція алмазних мікропорошків, якими оброблялась поверхня термоелектричного матеріалу, мкм	Значення питомого контактного опору, $10^{-6}$ Ом $\text{см}^2$
1	<i>n</i> -тип	40/28	8.1
2	<i>p</i> -тип	40/28	5.0
3	<i>n</i> -тип	20/14	4.0
4	<i>p</i> -тип	20/14	3.0
5	<i>n</i> -тип	5/3	1.4
6	<i>p</i> -тип	5/3	1.3
7	<i>n</i> -тип	<1.0	0.8
8	<i>p</i> -тип	<1.0	0.9

Отримані значення контактних опорів за мінімальних значень шорсткості поверхні знаходяться на рівні з відомими аналогами.

## Висновки

1. Розглянуто детальну фізичну модель процесу визначення електричного контактного опору «метал – термоелектричний матеріал» на основі зондового методу вимірювань та за допомогою комп'ютерного моделювання показано, що похибка визначення питомого електричного контактного опору, викликана неізотермічністю досліджуваної контактної структури, може бути значно зменшена за допомогою термостатування однієї з її сторін і за таких умов не перевищуватиме 2 %.
2. Описано конструкцію експериментальної установки, розробленої в Інституті термоелектрики (Україна), для реалізації такої методики вимірювань. Наведено приклад результатів досліджень контактної структури «нікель – екструдований термоелектричний матеріал на основі *Bi-Te*». Встановлено залежність між шорсткістю поверхні термоелектричного матеріалу та значеннями питомого контактного опору – мінімальні значення питомого контактного опору досягаються для полірованої поверхні термоелектричних матеріалів.

## Література

1. Tritt T. (2000). *Recent trends in thermoelectric materials research, part two (Semiconductors and Semimetals, Volume 70)*. Academic Press.
2. Rowe D.M. (2006). *Thermoelectrics handbook: Macro to nano* (1st ed.). CRC Press. <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. d'Angelo M., Galassi C., & Lecis N. (2023). Thermoelectric materials and applications: A review. *Energies*, 16(17), 6409. <https://doi.org/10.3390/en16176409>

5. Enescu D. (2022). Applications of thermoelectricity in buildings: From energy harvesting to energy management. In J. Littlewood, R.J. Howlett, & L.C. Jain (Eds.), *Sustainability in Energy and Buildings 2022* (Vol. 336). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-8769-4\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-19-8769-4_15)
6. Vondrak J., Schmidt M., Proto A., Penhaker M., Jargus J., & Peter L. (2019). Using miniature thermoelectric generators for wearable energy harvesting. In *2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.23919/SpliTech.2019.8782997>
7. Zhang W., Shen L., Yang Y., & Chen H. (2015). Thermal management for a micro semiconductor laser based on thermoelectric cooling. *Applied Thermal Engineering*, 90, 664–673.
8. Piotrowski A., Piotrowski J., Gawron W., Pawluczyk J., & Pedzinska M. (2009). Extension of usable spectral range of Peltier cooled photodetectors. *Acta Physica Polonica A*, 116, S52–S55.
9. Vikhor L., & Kotsur M. (2023). Evaluation of efficiency for miniscale thermoelectric converter under the influence of electrical and thermal resistance of contacts. *Energies*, 16(40), 4082. <https://doi.org/10.3390/en16104082>
10. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, (3–4), 43–67.
11. Vikhor L.M. (2024). Modeling of thermoelectric converter characteristics. *Journal of Thermoelectricity*, (3).
12. Vikhor L.M., Anatyshuk L.I., & Gorskyi P.V. (2019). Electrical resistance of metal contact to  $Bi_2Te_3$ -based thermoelectric legs. *Journal of Applied Physics*, 126, 164503. <https://doi.org/10.1063/1.5120144>
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. Kania T., Schilder B., Kissel T., & others. (2013). Development of a miniaturized energy converter without moving parts. *Flow, Turbulence and Combustion*, 90, 741–761. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9418-8>
15. Yuan C., Hohlfeld D., & Bechtold T. (2021). Design optimization of a miniaturized thermoelectric generator via parametric model order reduction. *Microelectronics Reliability*, 119, 114075. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114075>
16. 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.
17. Anatyshuk L.I., & Lysko V.V. (2012). Modified Harman's method. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1449, pp. 373–376). <https://doi.org/10.1063/1.4731574>
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Strusovskiy K.I. (2023). Computer research on the accuracy of probe method for measuring “metal–thermoelectric material” electrical contact resistance. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 46–57.
24. COMSOL Multiphysics, v. 6.0. [www.comsol.com](http://www.comsol.com). COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2021.
25. J.N. Reddy (2005). *An Introduction to the Finite Element Method*. 3rd Edition (McGraw-Hill Mechanical Engineering). 784 p.
26. Zaporov S.F. Thermoelectric material processing tools and their comparative analysis. *Journal of Thermoelectricity*, 2014 (5), 76–85.
27. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Zaporov S.F., Krechun M.M. (2022). Methods and equipment for the preparation of thermoelectric material samples for measuring their properties by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 3-4, 31–42.

Надійшла до редакції: 10.10.2024.

**V.V. Lysko**, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*<sup>1,2</sup>  
**V.V. Razinkov**, *Cand. Sc. (Phys.-Math.)*<sup>1</sup>  
**M.V. Havryliuk**<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynsky str.,  
Chernivtsi, 58000, Ukraine

## SETUP FOR MEASURING THE ELECTRICAL CONTACT RESISTANCE OF “METAL – THERMOELECTRIC MATERIAL” STRUCTURE

*The paper presents a method for determining the electrical contact resistance of “metal – thermoelectric material” structure based on a probe method with thermostating of one side of the contact structure under study. The design of the experimental setup for implementing such a measurement method is described. An example of the results of studies on the contact resistance of “nickel – Bi-Te based extruded thermoelectric material” structure is presented. Bibl. 27, Figs. 8, Tabl. 1.*

**Key words:** electrical contact resistance, probe method, measurement, Peltier effect, thermoelectric energy converters.

### References

1. Tritt T. (2000). *Recent trends in thermoelectric materials research, part two (Semiconductors and Semimetals, Volume 70)*. Academic Press.
2. Rowe D.M. (2006). *Thermoelectrics handbook: Macro to nano* (1st ed.). CRC Press. <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. d’Angelo M., Galassi C., & Lecis N. (2023). Thermoelectric materials and applications: A review. *Energies*, 16(17), 6409. <https://doi.org/10.3390/en16176409>

5. Enescu D. (2022). Applications of thermoelectricity in buildings: From energy harvesting to energy management. In J. Littlewood, R.J. Howlett, & L.C. Jain (Eds.), *Sustainability in Energy and Buildings 2022* (Vol. 336). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-8769-4\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-19-8769-4_15)
6. Vondrak J., Schmidt M., Proto A., Penhaker M., Jargus J., & Peter L. (2019). Using miniature thermoelectric generators for wearable energy harvesting. In *2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.23919/SpliTech.2019.8782997>
7. Zhang W., Shen L., Yang Y., & Chen H. (2015). Thermal management for a micro semiconductor laser based on thermoelectric cooling. *Applied Thermal Engineering*, 90, 664–673.
8. Piotrowski A., Piotrowski J., Gawron W., Pawluczyk J., & Pedzinska M. (2009). Extension of usable spectral range of Peltier cooled photodetectors. *Acta Physica Polonica A*, 116, S52–S55.
9. Vikhor L., & Kotsur M. (2023). Evaluation of efficiency for miniscale thermoelectric converter under the influence of electrical and thermal resistance of contacts. *Energies*, 16(40), 4082. <https://doi.org/10.3390/en16104082>
10. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Prybyla A.V. (2022). Rational areas of using thermoelectric heat recuperators. *Journal of Thermoelectricity*, (3–4), 43–67.
11. Vikhor L.M. (2024). Modeling of thermoelectric converter characteristics. *Journal of Thermoelectricity*, (3).
12. Vikhor L.M., Anatyshuk L.I., & Gorskyi P.V. (2019). Electrical resistance of metal contact to  $Bi_2Te_3$ -based thermoelectric legs. *Journal of Applied Physics*, 126, 164503. <https://doi.org/10.1063/1.5120144>
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. Kania T., Schilder B., Kissel T., & others. (2013). Development of a miniaturized energy converter without moving parts. *Flow, Turbulence and Combustion*, 90, 741–761. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9418-8>
15. Yuan C., Hohlfeld D., & Bechtold T. (2021). Design optimization of a miniaturized thermoelectric generator via parametric model order reduction. *Microelectronics Reliability*, 119, 114075. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114075>
16. 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.
17. Anatyshuk L.I., & Lysko V.V. (2012). Modified Harman's method. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1449, pp. 373–376). <https://doi.org/10.1063/1.4731574>
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., & Strusovskyi K.I. (2023). Computer research on the accuracy of probe method for measuring “metal–thermoelectric material” electrical contact resistance. *Journal of Thermoelectricity*, (4), 46–57.
24. COMSOL Multiphysics, v. 6.0. www.comsol.com. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2021.
25. J.N. Reddy (2005). *An Introduction to the Finite Element Method*. 3rd Edition (McGraw-Hill Mechanical Engineering). 784 p.
26. Zaporov S.F. Thermomoelectric material processing tools and their comparative analysis. *Journal of Thermoelectricity*, 2014 (5), 76–85.
27. Anatyshuk L.I., Lysko V.V., Zaporov S.F., Krechun M.M. (2022). Methods and equipment for the preparation of thermoelectric material samples for measuring their properties by the absolute method. *Journal of Thermoelectricity*, 3-4, 31–42.

Submitted: 10.10.2024.