

УДК 53.08

Вихор Л.М., докторфіз.-мат. наук¹
Горський П.В., докторфіз.-мат. наук^{1,2}
Лисько В.В., канд. фіз.-мат. наук^{1,2}

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

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна
e-mail: anatykh@gmail.com

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ КОНТАКТНИХ ОПОРІВ СТРУКТУР «МЕТАЛ – ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТЕРІАЛ» (ЧАСТИНА 2)

Наведено огляд існуючих методів вимірювання теплового контактного опору, а також методів, що дозволяють одночасно визначати величини і теплового, і електричного контактних опорів. Проведено аналіз їх точності, переваг та недоліків, а також можливостей використання у термоелектриці для дослідження та оптимізації структур «метал – термоелектричний матеріал». Бібл. 16, рис .8.

Ключові слова: тепловий контактний опір, електричний контактний опір, вимірювання, точність, термоелектричні перетворювачі енергії.

Вступ

Однією з основних перешкод для широкого практичного використання термоелектрики є висока вартість термоелектричних перетворювачів енергії, найбільшу частку якої займає вартість термоелектричного матеріалу. Спроби створити мініатюрні модулі, і таким чином значно зменшити їх вартість, нашоюхуються на зростаючий вплив контактних опорів, які зумовлюють катастрофічне зниження якості модулів.

Розробка та оптимізація технологій створення контактних опорів, необхідних для задоволення практичних потреб, здійснюється експериментально шляхом вивчення впливу різноманітних технологічних факторів на величину контактного опору. Останнє є можливим тільки при наявності надійних методів та обладнання для вимірювання контактних опорів.

У першій частині цієї роботи було наведено аналіз існуючих методів та обладнання для визначення величин електричних контактних опорів та можливостей їх використання для дослідження та оптимізації структур «метал – термоелектричний матеріал». Не менш важливими є методи вимірювання теплового контактного опору, аналізу яких присвячено продовження цієї роботи.

1. Особливості методів вимірювання теплового контактного опору

Існує цілий ряд методів вимірювання теплового контактного опору і відповідних установок для їх реалізації. Стандартні методи ґрунтуються на вимірюванні стаціонарного теплового потоку, що проходить через зразок в певному напрямку. Основи методу викладені в міжнародному стандарті ASTM D5470-06 [1].

В роботі [2] описується стандартний метод, який ґрунтується на використанні в якості

вимірювача теплового потоку «еталонного» зразка із заздалегідь відомою теплопровідністю. Схему вимірювальної установки зображено на рис. 1.

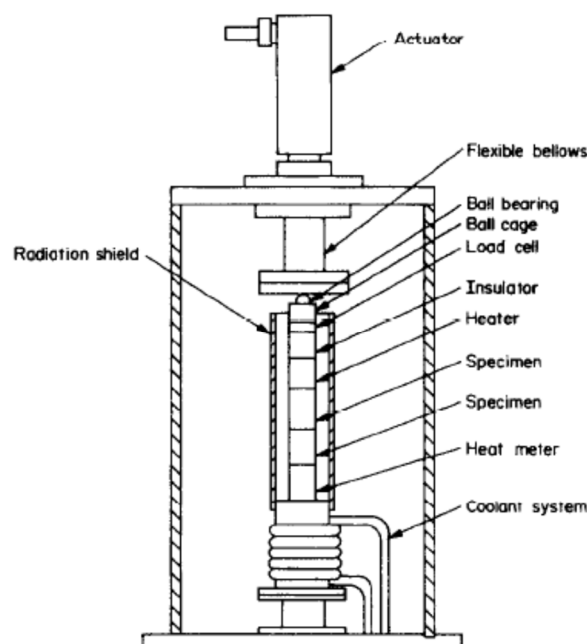


Рис.1. Схема вимірювальної установки для вимірювання теплового контактного опору з використанням еталонних зразків в якості тепломірів [2].

Контактуючі зразки розмішуються між нагрівачем і вимірювачем теплового потоку. Тепловий потік визначається розрахунковим шляхом за відомою різницею температур та теплопровідністю на підставі закону Фур'є. Обчислена потужність прирівнюється до потужності нагрівача. Температура вимірюється трьома термопарами, вмонтованими у тепломір на певних відстанях від вісі. Для вимірювання розподілу температури у зразках використовувалось 36 термопар діаметром 0.13мм і довжиною 76 см. Термопари вміщувались в отвори, просвердлені перпендикулярно до вісі зразка і закріплювались у них епоксидною смолою. Малий діаметр термопар брався з метою запобігання значному збуренню теплового потоку та якомога точнішої фіксації положення термопар. Бралась епоксидна смола з порівняно високою теплопровідністю, щоб у зв'язуючих шарах не існувало значного температурного градієнту. Термопари частково «огинали» тепломір або зразок, чим забезпечувалось використання малого шматка так званої «смуги Кептона» (Kapton tape). Смуги Кептона притаманна дуже мала теплопровідність. Отже, використання цієї смуги для релаксації напруг у термопарах не справляє впливу на розподіл температури у зразку або тепломірі. Теплові втрати в такій установці складають не більше 2 %.

У відповідності до роботи [3] деяким контактам притаманний так званий «ефект спрямованості», котрий полягає в тому, що контактні опори, виміряні у двох протилежних напрямках до площини контакту, відрізняються між собою. Одна з гіпотез, залучених до пояснення цього явища, полягає в зміні геометрії контакту в залежності від напрямку розповсюдження тепла внаслідок різних механічних властивостей матеріалів. У більшості випадків цей ефект справді спостерігається у контакті між різними матеріалами. Однак він може спостерігатись і у контакті між однаковими матеріалами. Інше пояснення полягає в тому, що потенціальний бар'єр, створений окисними шарами поблизу межі розділу послаблює

перенесення тепла вільними носіями заряду, наприклад електронами. Припустимо, що ε_1 та ε_2 – відповідно роботи виходу електронів з металів 1 та 2. Тоді, якщо $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, то електрони можуть переходити з металу 2 у метал 1, оскільки електрони в зоні провідності металу 2 енергетично ближчі до вершини потенціального бар'єру. Відношення провідностей у протилежних напрямках тоді дорівнює:

$$\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{21}} = \frac{\tau_{12}}{\tau_{21}} \frac{T_1^2}{T_2^2} \exp \left\{ \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{k} \right) \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right\}. \quad (1)$$

В цій формулі ε_0 – робота виходу електрона з окисної плівки. Якщо $\tau_{12} \approx \tau_{21}$, $\varepsilon_1 > \varepsilon_0$, $T_1 > T_2$ то $\sigma_{12} > \sigma_{21}$. Роботи виходу є чутливими до стану і підготовки поверхні, отже немає причини для відсутності «ефекту спрямованості» навіть в контакті між однаковими матеріалами, якщо «історії» контактуючих поверхонь різні.

Схему установки для вимірювання теплового опору зображено на рис. 2.

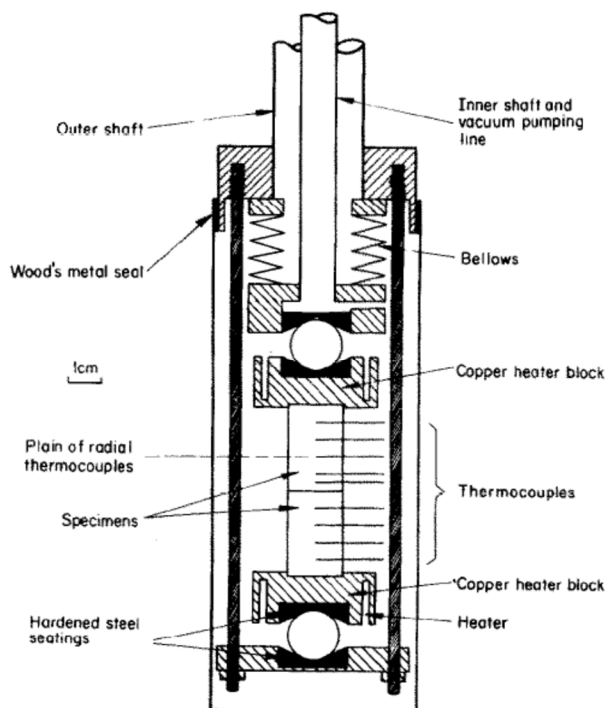


Рис. 2. Схема установки для вимірювання теплового опору [3].

Установка призначена для вимірювання контактного опору в залежності від навантаження. Навантаження до 100 кГ прикладається до контактуючих зразків кінетично, і тепловий потік до 3 Вт «прокачується» через них. Нагрівач живиться від стабілізованого джерела сталого струму. Розподіл температури в зразках вимірюється рядом радіально розмішених в них мідь-константанових термопар. Вимірювання термоЕРС здійснюється з точністю до 10^{-7} В. В якості «тепломірів» використовуються самі зразки. Тепловий потік через них обчислюється на основі закону Фур'є, виходячи з виміряного розподілу температур. За цих умов теплопровідність зразків в досліджуваному інтервалі температур відома з достатнім ступенем точності. Температура поблизу межі розділу для кожного з контактуючих зразків, а отже, і стрибок температури на контакті, знаходиться шляхом екстраполяції виміряних розподілів температури

по довжині кожного з контактуючих зразків. Конструкція установки забезпечує мінімальний радіальний градієнт температури. Це дозволяє виконувати вимірювання навіть в тому випадку, коли контактний опір сильно залежить від температури.

Розміри зразків і розташування отворів для термопар в них вимірюються з точністю до 1мм оптичним компаратором. Після включення нагрівача (або охолодження у випадку вимірювання за низьких температур) контактуючі зразки витримувались до досягнення стаціонарного стану. При кімнатній температурі стаціонарний стан досягався через 4 – 5 годин після зміни навантаження і приблизно через 10 – 12 годин після зміни напрямку теплового потоку. У випадку вимірювання за низьких температур вказані терміни досягнення стаціонарного стану скорочувались приблизно удвоє. Згладжування експериментально отриманих залежностей виконувалось методом найменших квадратів. Пари контактуючих зразків з неіржавіючої сталі та алюмінію досліджувались в діапазоні температур 90-300К. Вимірювались залежності теплового контактного опору від часу, навантаження, температури, величини та напрямку теплового потоку. Виявилось, що «ефект спрямованості» нівелюється в міру зростання величини теплового потоку. В той же час сама величина оберненого питомого теплового контактного опору порівняно слабо залежить від величини теплового потоку. Так, навіть за семикратного зростання величини теплового потоку питомий контактний тепловий опір змінюється не більше, ніж на 10 %. Тому питомий тепловий контактний опір вважається інваріантним відносно величини теплового потоку.

У роботі [4] притиснуті один до одного зразки матеріалів, контактний опір між якими необхідно виміряти, вміщуються в теплоізований об'єм між нагрівачем та охолоджувачем, після чого вимірюється тепловий потік через зразки та температури з обох боків контакту в безпосередній близькості до нього (рис. 3).

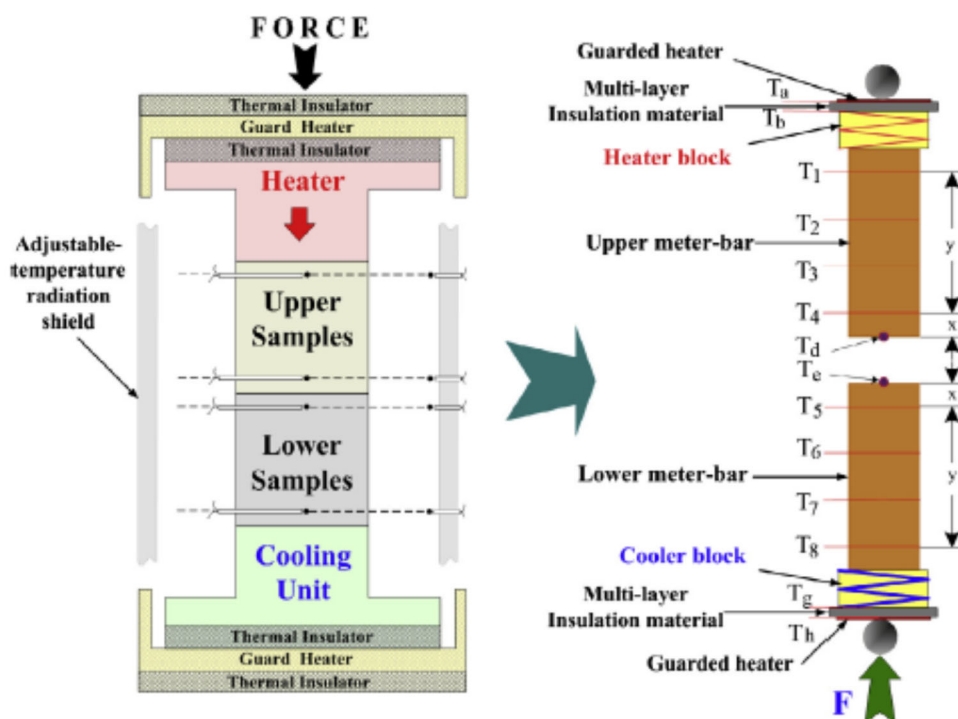


Рис. 3. Схема стандартного методу вимірювання контактного теплового опору [4].

Одновимірний тепловий потік протікає від верхнього до нижнього зразка і температура розподіляється лінійно, а на контакті відбувається стрибок. Отже тепловий контактний опір визначається як:

$$R = \frac{T_d - T_e}{Q}, \quad (2)$$

де Q – середній тепловий потік через контактуючі зразки. При цьому температури T_d та T_e визначаються шляхом екстраполяції температур, які реєструються локальними датчиками, розміщеними в контактуючих зразках поблизу межі розділу, на саму цю межу.

Однак автори праці [4] вважають, що такий стандартний метод дає надто велику похибку і пропонують метод вимірювання, що ґрунтується на зміні напрямку теплового потоку. Схема методу наведена на рис. 4. Даний метод ґрунтується на використанні середнього значення теплових контактних опорів по двох напрямках теплового потоку і властивостях симетрії вимірювальної системи. Нехай екстрапольовані температури з обох боків за «прямого» напрямку теплового потоку дорівнюють T'_d та T'_e , а за оберненого напрямку – T''_d та T''_e . Тоді тепловий контактний опір дорівнює:

$$R_T = \left[0.5Q \left(|T'_d - T'_e|^{-1} + |T''_d - T''_e|^{-1} \right) \right]^{-1}. \quad (3)$$

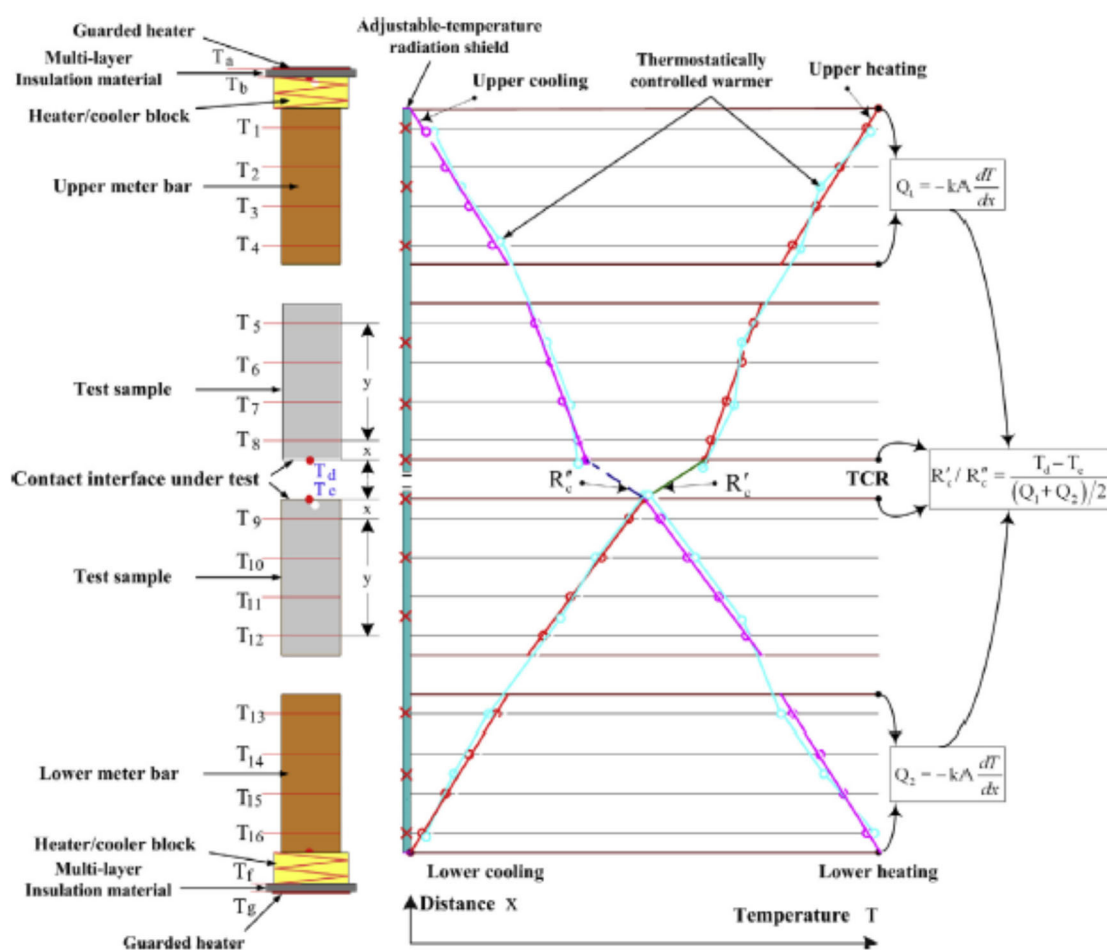


Рис. 4. Схема реалізації методу змінного теплового потоку [4].

В роботі [4] доведено, що даний метод різко знижує похибку, в результаті чого контактний опір перестає залежати від прикладеного теплового потоку, в той час, як при застосуванні стандартного методу в багатьох випадках має місце сильна залежність результатів вимірювання теплового контактного опору від прикладеного теплового потоку. Температура в рамках цього методу вимірюється термістором.

Загалом, для вимірювання теплового контактного опору застосовуються методи, пов'язані з вимірюванням теплових характеристик у стаціонарному стані. Недоліком цих методів є великий час очікування досягнення стаціонарного стану. На противагу їм запропоновано ряд динамічних методів, наприклад, метод інфрачервоної термографії [5], метод спалаху [6], термо-метод відбиття [7], фототермічний метод [8], та ін. [9, 10].

Як приклад, розглянемо більш детально описаний в [5] безконтактний термографічний метод, який називається методом інфрачервоної термографії [5]. Згідно цього методу два контактуючих зразки окремо нагріваються до різних початкових температур. Одразу після досягнення зразками цих температур вони приводяться у контакт. Зміни температури і тепловий потік від гарячого зразка до холодного контролюються високошвидкісною інфрачервоною (ІЧ) камерою. Ця камера фіксує ІЧ випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 7.7 до 9.5 мкм. Така смуга пропускання підходить для вимірювання температур, вищих за 20 °С. Для запобігання впливу оточуючого випромінювання зразки мають високу випромінюючу здатність, або ступінь чорноти ($\varepsilon = 0.95$), яка досягається за рахунок тонкого шару чорної фарби, яким покриті зразки. Для мінімізації похибок важливим є визначення температури поблизу контактної лінії. З цієї метою використовувалась оптична система з роздільною здатністю 13 мкм/пкс, що є дифракційною границею для вказаного діапазону довжин хвиль. За розміру кадру 60×80 пкс, тобто 780×1040 мкм, частота кадрів складала 2500 Гц. Результатом цих експериментів стала часова залежність розподілу температур поблизу контакту.

Коефіцієнт теплопередачі поблизу контакту не може бути виміряний безпосередньо. Він повинен визначатись на підставі розв'язання оберненої задачі з використанням інформації про температуру в певній точці просторової області. Таким чином, «причина» (тепловий потік) розраховується на підставі «дії» (температурного поля). Математична процедура веде до єдиного, але нестійкого розв'язку. Отже, мала «зашумленість» результатів вимірювання температури веде до істотних помилок у значенні теплового потоку.

У випадку одновимірної задачі відповідне рівняння в частинних похідних з початковими та граничними умовами має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad T(x, t=0) = T_0, \quad q_c = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (4)$$

де α_T – температуропровідність. Тоді шуканий коефіцієнт теплопередачі визначається як:

$$h_c = \frac{q_c}{\Delta T}. \quad (5)$$

Хоча контактуючі тіла обмежені, час контакту надто малий для того, щоб тепловий потік досяг віддалених меж тіл, отже тіла можна розглядати як напівобмежені.

Для розрахунку коефіцієнта теплопередачі необхідно визначити тепловий потік через площу контакту. Він визначається з використанням покрокової процедури включення ряду «майбутніх моментів часу». Алгоритм розрахунку теплового потоку ілюструється таким рівнянням:

$$q_c(x=0, t_m) = \frac{\sum_{i=1}^r (T_{\text{meas}, m+i-1} - T_{m+i-1}) \Phi_i(x=x_1, t_i)}{\sum_{i=1}^r \Phi_i^2(x=x_1, t_i)}, \quad (6)$$

де крок відповідає одиничному стрибкові теплового потоку для напівобмеженого тіла, який визначається як

$$\Phi_i(x, t) = \frac{x}{k} \sqrt{\frac{4\alpha_r t}{\pi}} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{1}{\sqrt{Fo}}\right) - \frac{1}{2\sqrt{Fo}} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right) \right], \quad (7)$$

де $F_0 = \alpha_r t / x^2$ – число Фур'є. Рівняння (7) містить лише фізичні сталі матеріалу та координату і час. Отже, відповідний розрахунок виконується один раз, а саме на початку процедури. Рівняння (6) отримано з міркувань мінімізації середньоквадратичного відхилення між виміряною ($T_{\text{meas}, m}$) і розрахунковою (T_m) температурою.

Таким чином, остаточно контактний опір розраховується виходячи з виміряного розподілу температури і розрахованого теплового потоку. Перепад температур вимірюється не безпосередньо на контакті, а на віддалі 50 – 100 мкм від нього, оскільки в іншому випадку дані виявляються занадто «зашумленими» за рахунок деформації тіл. За цих умов різницею між істинним стрибком температури і даними вимірювань нехтується. Схему визначення теплового потоку через контакт методом суперпозиції зображено на рис. 5. Істинним коефіцієнтом теплопередачі вважається його усталене в часі значення. Шуканий тепловий контактний опір дорівнює оберненому коефіцієнту теплопередачі.

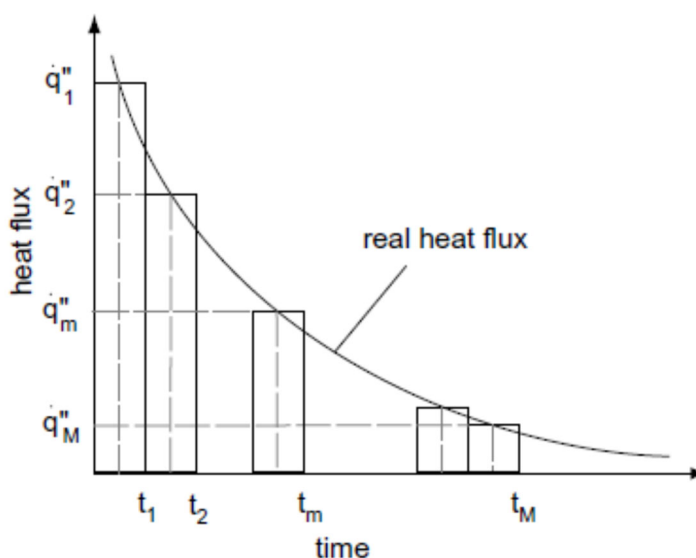


Рис. 5. Схема визначення теплового потоку через контакт методом суперпозиції [5].

У [11] запропоновано метод вимірювання теплового опору між провідною плівкою і підкладкою, який придатний для вимірювання теплового опору контактів, які створюються в термоелектричних виробках у «мікроелектронному» виконанні, коли металевий контактний шар напилюється або осаджується на тонкий шар напівпровідника. Схему вимірювальної установки для реалізації цього методу зображено на рис. 6.

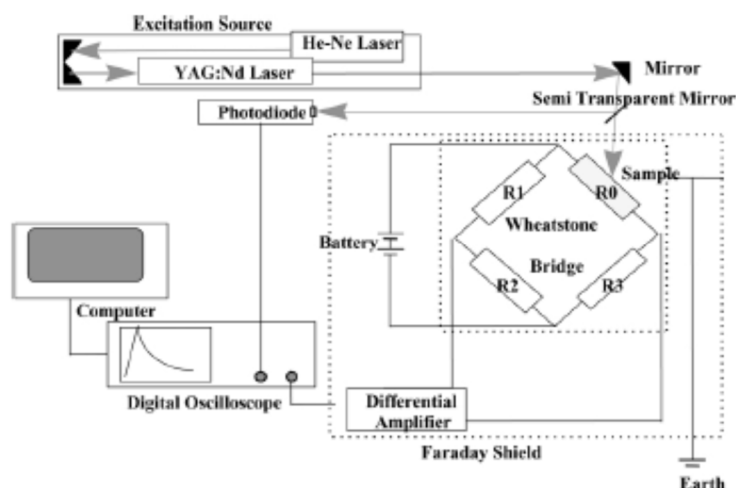


Рис. 6. Схема вимірювання теплового опору зразка у вигляді тонкої плівки на підкладці [11].

У цій схемі зразок (плівка на підкладці) нагрівався лазерними імпульсами з енергією 4 Дж і тривалістю 20 нс від неодимового лазера з довжиною хвилі випромінювання 1.06 мкм. Накачка неодимового лазера здійснювалась від гелій-неонового лазера. З метою вимірювання температури зразок включався у міст Уїтстона. На одну з діагоналей моста подавалась стала напруга. Напруга, що знімалась з іншої діагоналі моста, внаслідок нагріву і подальшого охолодження зразка залежала від часу. Ця напруга через диференціальний підсилювач подавалась на вхід цифрового осцилоскопа. Міст Уїтстона разом з диференціальним підсилювачем був вміщений у клітку Фарадея. На другий вхід подавалась опорна напруга від фотодіода, який через напівпрозоре дзеркало освітлювався тим самим лазером, який нагрівав зразок. Комп'ютером оброблялась часова залежність цієї напруги після піку, оскільки саме вона характеризувала охолодження зразка. Тепловий опір визначається одночасно з температуропровідністю шляхом підгонки експериментальних термограм під теоретичні в часовому інтервалі від 10^{-7} до 10^{-6} с. Тепловий контактний опір розраховується методом найменших квадратів.

2. Методи одночасного вимірювання теплового та електричного контактних опорів

Способи вимірювання одночасно теплового R_t і електричного R_c контактних опорів описані в роботах [12 – 14].

У [12] представлено методи вимірювання температурних залежностей теплового і електричного контактних опорів. Методи розроблені для дослідження властивостей граничного шару між термоелектричним оксидним матеріалом р-типу провідності $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_3$ і сплавом Fe-Cr , який може використовуватись в якості матеріалу для комутаційної пластини при виготовленні генераторних термоелектричних модулів з матеріалів на основі оксидів. Досліджувані двошарові зразки $\text{Fe-Cr} / \text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_3$ отримувалися за технологією SPS спікання. У [13] аналогічними методами досліджені тепловий та електричний контактні опори двошарових зразків $\text{Ni} / \text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_3$.

Тепловий контактний опір R_t визначався шляхом вимірювання температуропровідності методом лазерного спалаху із використанням для цього спеціального пристрою "Netzch LFA-457 Laser Flash Apparatus". Спочатку визначається температуропровідність окремо кожного з матеріалів Fe-Cr і $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_3$. Потім вимірювання проводяться на двошарових шайбах. Для цього

використовуються тонкі шайби (1 – 2 мм). Вимірюється час t_i , за який потужний енергетичний імпульс, створений на поверхні шайби, викликає половину максимального відхилення температури на протилежній поверхні шайби. Температуропровідність α обчислюється за простою формулою [15]

$$\alpha_i = 1.37 a^2 / \pi^2 t_i, \quad (8)$$

де a – товщина шайби. Поправки до формули (12) для більш точного способу обрахунку температуропровідності описані в роботі [16].

Дані вимірювань для одно- і двошарових шайб автоматично використовуються як вхідні дані для спеціальних комп'ютерних програм, якими оснащена установка "Netzch LFA-457". Це програмне забезпечення розроблене і налаштоване на визначення теплового контактного опору двошарової моделі.

Електричний контактний опір вимірювався в інтервалі температур від 30 °С до 800 °С на двошарових зразках у формі стовпчиків. Схема для вимірювань показана на рис. 7 [12].

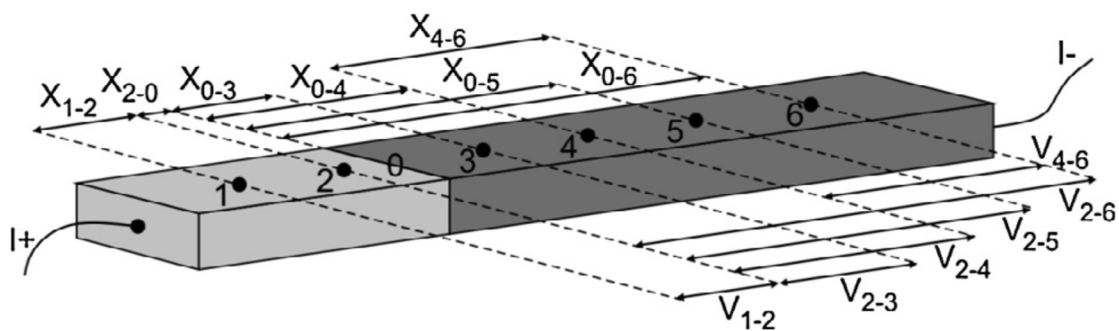


Рис. 7. Схема для вимірювання електричного контактного опору [12].

Ця модель дозволяє вимірювати як питомий опір кожної компоненти зразка, так і контактний опір границі, який визначається шляхом лінійної екстраполяції залежності опору R від відстані x до границі (x_n to 0) за формулою

$$R_c = \text{екстраполяція}(R \text{ від } x_{6-3} \text{ до } 0) - R_{1-2} \frac{x_{1-2}}{x_{2-0}} \quad (9)$$

Останній член у формулі (9) враховує вклад від впливу опору сплаву $Fe-Cr$ між зондом і границею.

Напруга в різних точках вимірюється 4-х зондовим мікро-омметром Keithley Micro-ohmmeter. Віддаля від зондів до границі вимірювалась з допомогою мікроскопу Olympus SZX9 Stereomicroscope.

Використовуючи мікро-омметр, на зразок подавався струм і вимірювалась напруга в різних точках вздовж поверхні зразка зондом з платинового дроту діаметром 0.1 мм, що прикріплювався срібною пастою. Мікро-омметр працював в імпульсному режимі за умов пропускання струму і виміру напруги на протязі 150 мс. Потім струм відключався і вимірювалась напруга, яка зумовлена градієнтом температури (внаслідок термоЕРС) і враховувалась у визначенні опору. Виміри проводилися для прямого і оберненого напрямків струму і результати усереднювалися. Значення теплового і електричного опорів границі домножались на площу поперечного перерізу вимірюваних зразків, що давало значення питомих контактних опорів.

У [14] описується установка, розроблена для вимірювання як електричного, так і теплового

контактного опору. Одночасне вимірювання R_c і R_t спаю є важливим для розуміння взаємозв'язку між величинами і можливого впливу одної на іншу. Такі дані можуть бути корисними для розробки покращених електричних і теплових контактів між матеріалами.

Електричний контактний опір R_c вимірюється за допомогою 4-х зондового методу (метод Кельвіна) на постійному струмі. Для вимірювання теплового контактного опору R_t потужність потоку тепла Q через границю контакту в стаціонарному режимі визначається за допомогою даних по матеріалу з відомою теплопровідністю і температурного градієнта в досліджуваному блоці, а ΔT на границі розраховується за вимірами і екстраполяцією градієнта температур в зразках. Теплова провідність контакту визначається за формулою

$$h_t = \frac{Q}{A \Delta T}, \quad (10)$$

де A – площа контакту.

Камера для вимірювань містить два блоки нагрівник – охолоджувач (НСВ), два вимірювача теплового потоку (HFM) і два досліджувані зразки, що стикаються один з одним, як показано на рис. 8 а. Блоки і вимірювачі розміщені симетрично до границі контакту зразків. Камера може бути вакуумована до 10^{-6} мбар або заповнена газом. Вимірювання можуть проводитися за температур від 20 до 150 °С. Нагрівником і системою охолодження створюються постійні температури. Контакт двох зразків утворюється стисканням за допомогою гідравлічної системи. Тиск може варіюватись від 0 до 500 кг. Для досліджень можуть використовуватись зразки циліндричної форми, діаметром від 10 до 30 мм і висотою 20 – 100 мм. Досліджуваний зразок під'єднується до електричних і теплових датчиків, як це показано на рис. 8 б.

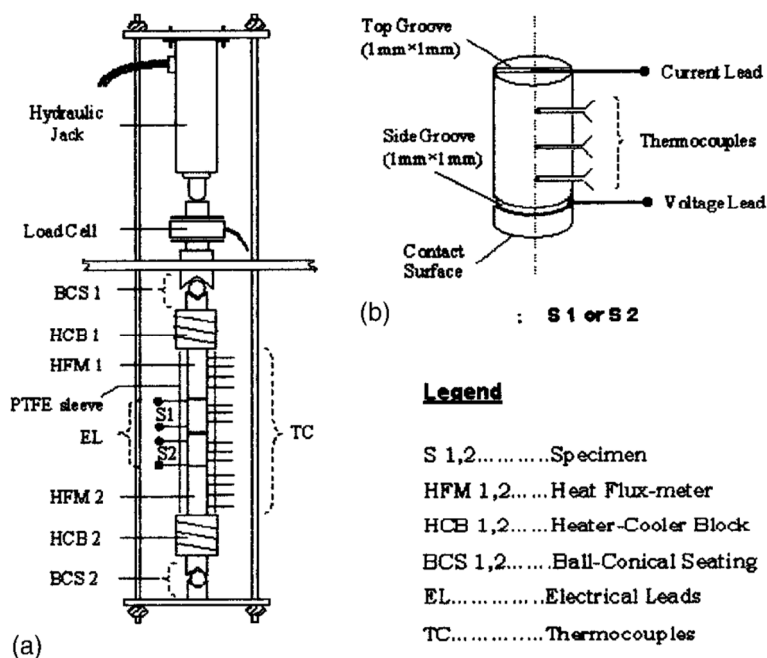


Рис. 8. Схема камери для вимірювань контактних опорів [14].

Блоки нагрівник – охолоджувач виготовляються у вигляді мідних циліндрів. Мідні трубки охолоджувача розміщуються в пазах у вигляді спіралі. Ніхромові нагрівні елементи, вставлені в керамічні шайби, кріпляться за допомогою затискувачів. Блок може працювати як нагрівник при подачі напруги до нагрівних елементів, або як охолоджувач за умови подачі холодоагента до

мідних трубок. Таким чином можна змінювати напрямок теплового потоку, не порушуючи ніяких процесів.

Вимірювачі теплового потоку – це теж циліндричні блоки, виготовлені з міді із відомим коефіцієнтом теплопровідності. Кількість тепла, що протікає через вимірювач, розраховується шляхом виміру температурних градієнтів у напрямку теплового потоку. Похибка визначення теплового потоку за допомогою цих вимірювачів складає $\pm 2.5\%$.

Цифровий мультиметр (DMM), яким вимірюється електричний опір з точністю до 0.1 мкОм використовується для визначення електричного контактного опору. DMM налаштований на 4-х зондові виміри за умов мінімізації вкладу опору проводів, включаючи паяні з'єднання. DMM під'єднаний до комп'ютеру із спеціальним програмним забезпеченням для вимірів. Електричне коло для теплових вимірів повністю відокремлене від кола для електричних вимірів, включаючи DMM і комп'ютер.

У [14] наведено приклад результатів вимірювання електричного і теплового контактних опорів для притискного контакту латунь/латунь. Було встановлено, що абсолютне максимальне відхилення при вимірюваннях на описаній установці електричного контактного опору становить $\pm 0.003\%$, а теплової провідності контакту $\pm 4.4\%$. Установка може використовуватись також для вимірів теплопровідності матеріалів.

Висновки

1. Розгляд і аналіз існуючих методів вимірювання теплового контактного опору, а також методів, що дозволяють одночасно визначати величини теплового і електричного контактних опорів, акцентує як переваги, так і недоліки окремих методів.
2. Точність та надійність методів вимірювання контактного теплового опору, як і методів вимірювання електричного контактного опору, вимагає істотного покращення для реалізації на практиці можливостей зниження контактних опорів, передбачених теоретичними дослідженнями.

Література

1. ASTM 2009, Standard test method for thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique E1225–09.
2. McWaid T., Marshall E. (1992). Thermal contact resistance across pressed metal contacts in a vacuum environment. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 35 (11), 2911 – 2920.
3. Thomas T.R., Probert S.D. (1970). Thermal contact resistance: directional effect and other problems. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 13, 789 – 807.
4. Ping Zhang, Yi Min Xuan, Qiang Li. (2014). A high-precision instrumentation of measuring thermal contact resistance using reversible heat flux. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 204 – 211.
5. Fieberg C., Kneer R. (2008). Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurement. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 51, 1017 – 1023.
6. N.D. Milošević. (2008). Determination of transient thermal interface resistance between two bonded metal bodies using the Laser-Flash method. *Int. J. Thermophys.*, 29, 2072 – 2087.
7. Smith A.N., Hosteler J.L. (2000). Thermal boundary resistance measurements using a transient thermo-reflectance technique. *Microscale Therm. Eng.*, 4, 51 – 60.

8. Shi L., Wang H.L. (2007). Investigation on thermal contact resistance by photothermal technique at low temperature. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 43 (11), 1179 – 1184.
9. Cong P.Z., Zhang X., Fujii M. (2006). Estimation of thermal contact resistance using ultrasonic waves, *Int. J. Thermophys.*, 27, 171 – 183.
10. Lisker I.S., Solovyev S.V. (2001). A transient technique for measuring the thermal conductivity of non-metals. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 25, 377 – 382.
11. Lahmar A., Nguen T.P., Sakami D., Orain S., Scudeller U., Danes F. (2001). Experimental investigation on the thermal contact resistance between gold coating and ceramic substrate. *Thin Solid Films*, 389, 167 – 172.
12. Holgate Tomas C., Han Li, Wu Ning Yu, Bojesen Espen D., Christensen Mogens, Iversen Bo B., Nong Ngo Van, Pryds Nini (2014). Characterization of the interface between an *Fe-Cr* alloy and the p-type thermoelectric oxide $Ca_3Co_4O_9$. *Journal of Alloys and Compounds*, 582, 827 – 833.
13. Holgate T.C., Wu N., Sondergaard M., Iversen B.B., Nong N.V., Pryds N. (2013). Kinetics, stability, and thermal contact resistance of nickel – $Ca_3Co_4O_9$ interfaces formed by spark plasma sintering. *J. of Electronic Materials*, 42(7), 1661 – 1668.
14. Misra Prashant, Nagarajua J. (2004). Test facility for simultaneous measurement of electrical and thermal contact resistance. *Review of Scientific Instruments*, 75(8), 2625-2630.
15. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P. and Abbott G.L. (1961). *J. App. Phys.* 32, 1679.
16. Cape J.A., Lehman G.W. (1963). Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity. *J. of Applied Physics*, 34 (7), 1909 – 1913.

Надійшла до редакції: 23.08.2022.

Vykhov L.M., DSc (Phys-Math)¹
Gorskyi P.V., DSc (Phys-Math)^{1,2}
Lysko V.V., Cand.Sc (Phys-Math)^{1,2}

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str.,
Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsiubynskyi str.,
Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatykh@gmail.com

METHODS FOR MEASURING CONTACT RESISTANCES OF “METAL – THERMOELECTRIC MATERIAL” STRUCTURES (PART 2)

An overview of existing methods for measuring thermal contact resistance, as well as methods that allow simultaneous determination of thermal and electrical contact resistance values, is presented. Their accuracy, advantages and disadvantages are analyzed, as well as the possibilities of using them in thermoelectricity for the study and optimization of metal – thermoelectric material structures. Bibl. 16, Figs .8.

Key words: thermal contact resistance, electrical contact resistance, measurement, accuracy, thermoelectric power converters.

References

1. ASTM 2009, Standard test method for thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique E1225–09.
2. McWaid T., Marshall E. (1992). Thermal contact resistance across pressed metal contacts in a vacuum environment. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 35 (11), 2911 – 2920.
3. Thomas T.R., Probert S.D. (1970). Thermal contact resistance: directional effect and other problems. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 13, 789 – 807.
4. Ping Zhang, Yi Min Xuan, Qiang Li. (2014). A high-precision instrumentation of measuring thermal contact resistance using reversible heat flux. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 204 – 211.
5. Fieberg C., Kneer R. (2008). Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurement. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 51, 1017 – 1023.
6. N.D. Milošević. (2008). Determination of transient thermal interface resistance between two bonded metal bodies using the Laser-Flash method. *Int. J. Thermophys.*, 29, 2072 – 2087.
7. Smith A.N., Hosteler J.L. (2000). Thermal boundary resistance measurements using a transient thermo-reflectance technique. *Microscale Therm. Eng.*, 4, 51 – 60.
8. Shi L., Wang H.L. (2007). Investigation on thermal contact resistance by photothermal technique at low temperature. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 43 (11), 1179 – 1184.
9. Cong P.Z., Zhang X., Fujii M. (2006). Estimation of thermal contact resistance using ultrasonic waves, *Int. J. Thermophys.*, 27, 171 – 183.
10. Lisker I.S., Solov'yev S.V. (2001). A transient technique for measuring the thermal conductivity of non-metals. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 25, 377 – 382.
11. Lahmar A., Nguen T.P., Sakami D., Orain S., Scudeller U., Danes F. (2001). Experimental investigation on the thermal contact resistance between gold coating and ceramic substrate. *Thin Solid Films*, 389, 167 – 172.
12. Holgate Tomas C., Han Li, Wu Ning Yu, Bojesen Espen D., Christensen Mogens, Iversen Bo B., Nong Ngo Van, Pryds Nini (2014). Characterization of the interface between an Fe-Cr alloy and the p-type thermoelectric oxide $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$. *Journal of Alloys and Compounds*, 582, 827 – 833.
13. Holgate T.C., Wu N., Sondergaard M., Iversen B.B., Nong N.V., Pryds N. (2013). Kinetics, stability, and thermal contact resistance of nickel – $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ interfaces formed by spark plasma sintering. *J. of Electronic Materials*, 42(7), 1661 – 1668.
14. Misra Prashant, Nagarajua J. (2004). Test facility for simultaneous measurement of electrical and thermal contact resistance. *Review of Scientific Instruments*, 75(8), 2625-2630.
15. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P. and Abbott G.L. (1961). *J. App. Phys.* 32, 1679.
16. Cape J.A., Lehman G.W. (1963). Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity. *J. of Applied Physics*, 34 (7), 1909 – 1913.

Submitted: 23.08.2022.