

УДК 539.2

## СТАЦІОНАРНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Д. М. Фрейк<sup>1</sup>, М. О. Галушак<sup>2</sup>, А. І. Терлецький<sup>1</sup>, Р. І. Запужляк<sup>1</sup>, Н. І. Дикун<sup>1</sup>,  
А. І. Ткачук<sup>2</sup>

- 1) Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, тел. (0342) 59-60-82, e-mail: freik@pu.if.ua
- 2) Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (03422) 4-24-53

Розглянуто фізичні основи нового підходу до вимірювання теплопровідності, який можна віднести до стаціонарних методів. Детально описано розподіл теплових потоків у вимірювальній комірці, оцінено похибку даного методу та вказано шляхи її мінімізації.

Ключові слова: напівпровідниковий матеріал, теплопровідність, тепловий потік, вимірювальна комірка, питома електропровідність, термоелектрорушійна сила, термоелектричні параметри.

Рассмотрено физические основы нового подхода к измерению теплопроводности, который можно отнести к стационарным методам. Подробно описано распределение тепловых потоков в измерительной ячейке, сделано оценку погрешностей этого метода и определены пути ее минимизации.

Ключевые слова: полупроводниковый материал, теплопроводность, тепловой поток, измерительная ячейка, удельная электропроводность, термоэлектродвижущая сила, термоэлектрические параметры.

A physical basis of a new approach to measurement of thermal conductivity was considered. It has been attributed to stationary methods. The heat flows distribution inside the measuring cell was described in detail, an error of this method was estimated and some ways to minimize it were found.

Key words: semiconductor materials, thermal conductivity, heat flow, measuring Pomirko, specific conductivity, thermal electromotive force thermoelectricity options.

Сучасний розвиток науково-технічного прогресу у значній мірі спрямований на пошук альтернативних джерел енергії, які б мали задовільний коефіцієнт корисної дії (ККД) та були простими і дешевими в технологічному значенні. Значну нішу в цьому процесі займають термоелектричні генератори енергії, що на даний час ефективно використовуються в космосі, автомобілебудуванні і інших галузях народного господарства.

Основними параметрами напівпровідникових матеріалів, на основі яких формуються термоелектричні пристрої і системи, є термо-

Е.Р.С.  $\left(\alpha, \frac{\text{мкВ}}{\text{К}}\right)$ , питома електропровідність  $(\sigma, \text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1})$ , тепло-провідність  $(\chi, \text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1})$  та термоелектрична добротність  $(Z, \text{К}^{-1})$  або безрозмірна термоелектрична добротність  $(ZT)$ . Від цих параметрів на пряму залежить ККД

термоелектричних пристроїв.

Вивчення властивостей напівпровідникових матеріалів вимагає адекватних методик вимірювання їх термоелектричних параметрів. У літературі описано різноманітні методи їх вимірювання, однак більшість із них дозволяють визначити тільки окремі параметри зразків. Особливої уваги заслуговують такі методики, які в єдиному експеримент надають можливість отримати весь спектр термоелектричних параметрів матеріалу. Найбільш складною задачею є визначення теплопровідності напівпровідникового матеріалу, що вимагає врахування багатьох фізичних і технологічних чинників.

Методи визначення теплопровідності поділяються на стаціонарні і динамічні. У першому випадку вимірювання проводяться після встановлення теплової рівноваги, що забезпечує досягнення високого ступеня точності, однак вимагає великих затрат часу, особливо для поганих провідників тепла. При

використанні динамічних методів можна набагато швидше і детальніше провести вимірювання в широкому інтервалі температур, проте точність при їх використанні є невисокою [1].

Крім того, розрізняють також абсолютні і порівняльні методи [1]. В абсолютному методі безпосередньо вимірюється тепло, яке проходить через зразок. У порівняльному – одна і та ж кількість тепла проходить через досліджуваний зразок і через зразок з відомою теплопровідністю, що розташований послідовно з першим. Потік тепла обчислюється за градієнтом температури на еталонному зразку. При цьому теплопровідності еталонного і досліджуваного матеріалів повинні бути величинами одного порядку [1].

При використанні будь-яких методик виникає проблема теплових втрат через середовище, яке оточує досліджуваний зразок. Одним із способів зменшення бокових втрат тепла є використання зразків малої висоти з великою площею поперечного перерізу. Однак у цьому випадку виникають труднощі точного визначення градієнта температури у зв'язку із нерівномірним температурним розподілом при використанні термопар, які приєднуються безпосередньо до зразка, а також із вимірюванням відстані між ними. Виходом із цього є вимірювання різниці температур блоків, між якими закладається зразок досліджуваного матеріалу. Проте і при цьому істотними стають температурні градієнти на контактах. Тому, з цієї точки зору, більш вигідними є зразки значної висоти [2, 3]. Враховуючи вищевказане, необхідно знаходити компроміс між двома взаємно протилежними вимогами. На практиці використовують високі зразки, якщо досліджуваний матеріал є добрим провідником тепла, і короткі диски або пластини з нього, якщо цей матеріал є поганим провідником тепла [3].

Нами запропоновано теорію стаціонарної абсолютної методики вимірювання теплопровідності  $\chi$  твердого матеріалу, яка також дає можливість в єдиному експерименті додатково отримати дані з термо-Е.Р.С.  $\alpha$  та електропровідності  $\sigma$ . Ця методика була розроблена у зв'язку із необхідністю вимірювання коефіцієнта теплопровідності невеликих зразків матеріалу, що погано проводить тепло.

Розглянемо зразок матеріалу 1, що розміщений між основою 2 і внутрішнім нагрівником 3, навколо якого розташований зовнішній нагрівник 4. Простір між нагрівниками заповнено теплоізолятором 5 з

низькою теплопровідністю (рис. 1).

Зовнішній нагрівник забезпечує підтримувння температури на верхньому кінці зразка досліджуваного матеріалу та слугує охоронною оболонкою внутрішнього нагрівника.

Внутрішній нагрівник призначений для введення в систему додаткового потоку тепла, величину якого можна виміряти, якщо контролювати його електричну потужність.

Теплоємність основи та зовнішнього нагрівника значно перевищують теплоємність внутрішнього нагрівника та зразка матеріалу, що забезпечує квазіізотермічний режим роботи основи і зовнішнього нагрівника.

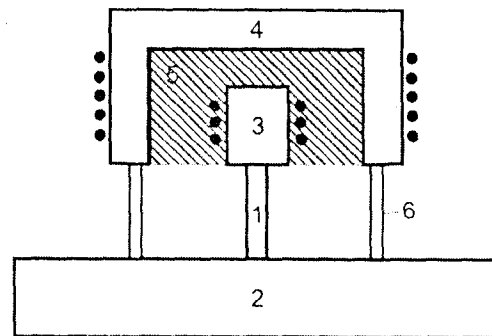


Рисунок 1 – Блок-схема вимірювальної комірки

Ізоляційним екраном слугує охоронне теплове кільце 6. Коефіцієнти теплопровідності матеріалу кільця та досліджуваного зразка повинні бути величинами одного порядку, тоді градієнт температури в кільці та зразку буде приблизно однаковий, а тепловим випромінюванням з поверхні зразка можна нехтувати. Кільце також забезпечує електроізоляцію між зовнішнім нагрівником і основою та механічно утримує дану конструкцію.

Після включення зовнішнього нагрівника і встановлення теплової рівноваги матимемо, що

$$T_y > T_{ин} > T_o > T_{клин}, \quad (1)$$

де  $T_y$  – температура зовнішнього нагрівника,  $T_{ин}$  – температура внутрішнього нагрівника,  $T_o$  – температура основи,  $T_{клин}$  – температура навколишнього середовища.

Тепло, яке виділяється зовнішнім нагрівником, витрачається на теплове випромінювання з поверхні всього нагрівника, теплопередачу через ізоляційний екран і зразок основи 2 та іншим конструктивним елементам, і, в кінцевому результаті, на теплове

випромінювання з поверхні цих елементів вимірювальної комірки (рис. 1).

На рис. 2 представлено загальний бюджет тепла, де  $Q_3$  – кількість тепла, що витрачається на теплове випромінювання та теплопередачу через ізоляційний екран;  $Q_1$  – кількість тепла, що передається внутрішньому нагрівнику;  $Q_2$  – кількість тепла, що передається від внутрішнього нагрівника через зразок основи 2;  $Q_1 + Q_2 = Q$  – загальна кількість тепла, що виділяється зовнішнім нагрівником.

За одиницю часу маємо, що:

$$Q_1 = (T_3 - T_{\text{вн}}) a \chi_{\text{із}}, \quad (2)$$

$$Q_2 = (T_{\text{вн}} - T_o) \frac{S}{l} \chi, \quad (3)$$

де  $a$  – інтегральний приведений коефіцієнт,  $\chi_{\text{із}}$  – коефіцієнт теплопровідності внутрішньої теплоізоляції,  $\chi$  – коефіцієнт теплопровідності зразка,  $S$  і  $l$  – геометричні розміри досліджуваного зразка.

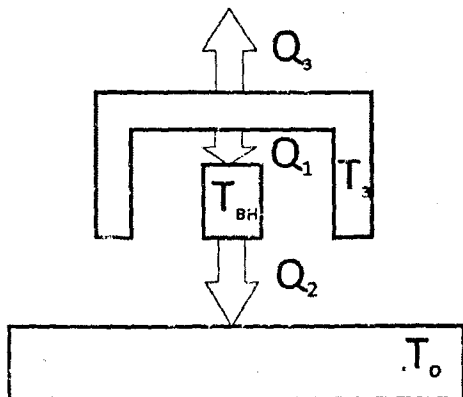


Рисунок 2 – Розподіл потоків тепла вимірювальної комірки

За умов теплової рівноваги

$$Q_1 = Q_2. \quad (4)$$

Після вмикання внутрішнього нагрівника через деякий час встановиться нова теплова рівновага з такими параметрами:

$$T'_3 > T'_{\text{вн}} > T'_o > T_{\text{кімн}}. \quad (5)$$

Температура зовнішнього нагрівника  $T'_3$  та основи  $T'_o$  майже не відрізняються від  $T_3$  та  $T_o$ , відповідно, за умови, що  $Q \gg Q_{\text{вн}}$ , де

$$Q_{\text{вн}} = I_{\text{вн}} U_{\text{вн}}, \quad (6)$$

$Q_{\text{вн}}$  – додаткова кількість тепла, яке виділяється внутрішнім нагрівником;  $I_{\text{вн}}$  та  $U_{\text{вн}}$  – струм та напруга на внутрішньому нагрівнику, відповідно.

Температура внутрішнього нагрівника зросте на величину  $T'_{\text{вн}} - T_{\text{вн}}$ , що призведе до збільшення кількості тепла, яке передається через зразок основи на величину  $\Delta Q_2$  та зменшення кількості тепла, яке передається внутрішньому нагрівнику від зовнішнього на величину  $\Delta Q_1$ .

На рис. 3 приведено бюджет тепла після ввімкнення внутрішнього нагрівника. Згідно нового розподілу температур сумарні потоки тепла будуть описуватися наступним чином:

$$Q_1 - \Delta Q_1 = a \chi_{\text{із}} (T_3 - T'_{\text{вн}}), \quad (7)$$

$$Q_2 + \Delta Q_2 = \frac{S}{l} \chi (T'_{\text{вн}} - T_o). \quad (8)$$

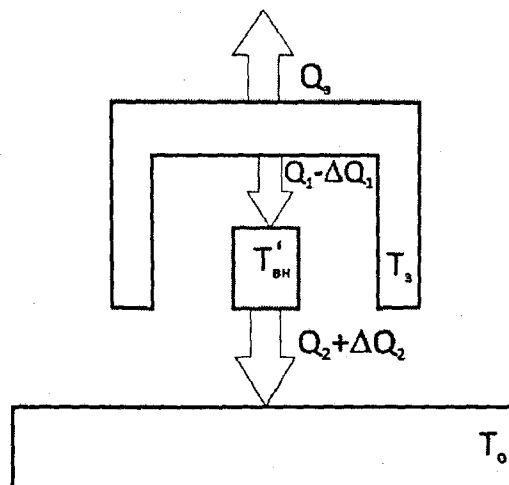


Рисунок 3 – Розподіл потоків тепла після включення внутрішнього нагрівника

Ці потоки тепла відрізняються між собою на величину  $Q_{\text{вн}}$ , тому

$$Q_{\text{вн}} = Q_2 + \Delta Q_2 - (Q_1 - \Delta Q_1) = \Delta Q_1 + \Delta Q_2. \quad (9)$$

Враховуючи рівняння (2) і (7) та (3) і (8), матимемо:

$$\Delta Q_1 = a \chi_{\text{із}} (T'_{\text{вн}} - T_{\text{вн}}), \quad (10)$$

$$\Delta Q_2 = \frac{S}{l} \chi (T'_{\text{вн}} - T_{\text{вн}}). \quad (11)$$

Беручи до уваги (6) і (9), отримаємо наступне рівняння:

$$\chi = \left( \frac{I_{\text{вн}} U_{\text{вн}}}{T'_{\text{вн}} - T_{\text{вн}}} - \alpha \chi_{\text{із}} \right) \frac{l}{S}. \quad (12)$$

Оскільки коефіцієнт  $\alpha \chi_{\text{із}}$  залежить тільки від конструктивних параметрів установки, його можна визначити, використовуючи зразок з відомим коефіцієнтом теплопровідності.

Згідно (12) маємо, що

$$\chi \frac{S}{l} = \frac{I_{\text{вн}} U_{\text{вн}}}{T'_{\text{вн}} - T_{\text{вн}}} - \alpha \chi_{\text{із}}. \quad (13)$$

Позначимо

$$\chi \frac{S}{l} = c, \quad \frac{I_{\text{вн}} U_{\text{вн}}}{T'_{\text{вн}} - T_{\text{вн}}} = b, \quad \alpha \chi_{\text{із}} = d. \quad (14)$$

Тоді

$$c = b - d, \quad (15)$$

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{|\Delta b| + |\Delta d|}{b - d} = \frac{|\Delta b|}{b} \frac{b}{b - d} + \frac{|\Delta d|}{d} \frac{d}{b - d}, \quad (16)$$

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{|\Delta \chi|}{\chi} + \frac{|\Delta S|}{S} + \frac{|\Delta l|}{l} = \frac{|\Delta \chi|}{\chi} + \frac{|\Delta D|}{D} + \frac{|\Delta l|}{l}, \quad (17)$$

звідки

$$\frac{|\Delta \chi|}{\chi} = \frac{|\Delta D|}{D} + \frac{|\Delta l|}{l} + \frac{|\Delta c|}{c}, \quad (18)$$

$$\frac{\Delta b}{b} = \frac{|\Delta I_{\text{вн}}|}{I_{\text{вн}}} + \frac{|\Delta U_{\text{вн}}|}{U_{\text{вн}}} + \frac{|\Delta T'_{\text{вн}}| + |\Delta T_{\text{вн}}|}{T'_{\text{вн}} - T_{\text{вн}}}, \quad (19)$$

де  $D$  – діаметр зразка.

Для оцінки  $\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta(\alpha \chi_{\text{із}})}{\alpha \chi_{\text{із}}}$  скористаємося тим, що  $\alpha \chi_{\text{із}}$  можна визначити за допомогою еталонного зразка з відомою теплопровідністю, тобто

$$\alpha \chi_{\text{із}} = \frac{I_{\text{ет}} \cdot U_{\text{ет}}}{T'_{\text{ет}} - T_{\text{ет}}} - \chi_{\text{ет}} \frac{S}{l} = b - \chi_{\text{ет}} \frac{S}{l}. \quad (20)$$

Тоді

$$\begin{aligned} \frac{\Delta d}{d} &= \frac{\Delta b}{b} \frac{b}{b - \chi_{\text{ет}} \frac{S}{l}} + \frac{\left| \Delta \left( \chi_{\text{ет}} \frac{S}{l} \right) \right|}{\chi_{\text{ет}} \frac{S}{l}} \frac{\chi_{\text{ет}} \frac{S}{l}}{b - \chi_{\text{ет}} \frac{S}{l}} = \\ &= \frac{\Delta b}{b} \frac{b}{d} + \left( \frac{2|\Delta D|}{D} + \frac{|\Delta l|}{l} \right) \frac{\chi_{\text{ет}} \frac{S}{l}}{d}. \end{aligned} \quad (21)$$

Враховуючи (16), (18), (19) та (21), маємо, що:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \chi}{\chi} &= \frac{2|\Delta D|}{D} + \frac{|\Delta l|}{l} + \frac{\Delta b}{b} \frac{b}{b - d} + \\ &+ \left( \frac{\Delta b}{b} \frac{b}{d} + \left( \frac{2|\Delta D|}{D} + \frac{|\Delta l|}{l} \right) \frac{\chi_{\text{ет}} \frac{S}{l}}{d} \right) \frac{d}{b - d} = \\ &= \left( \frac{2|\Delta D|}{D} + \frac{|\Delta l|}{l} \right) \left( 1 + \frac{\chi_{\text{ет}} \frac{S}{l}}{b - d} \right) + 2 \frac{\Delta b}{b} \frac{b}{b - d}. \end{aligned} \quad (22)$$

Отже, беручи до уваги те, що  $b - d = \chi \frac{S}{l}$ ,

знаходимо, що

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \chi}{\chi} &= \left( \frac{2|\Delta D|}{D} + \frac{|\Delta l|}{l} \right) \left( 1 + \frac{\chi_{\text{ет}}}{\chi} \right) + \\ &+ 2 \left( \frac{|\Delta I_{\text{ет}}|}{I_{\text{ет}}} + \frac{|\Delta U_{\text{ет}}|}{U_{\text{ет}}} + \frac{|\Delta T'_{\text{ет}}| + |\Delta T_{\text{ет}}|}{T'_{\text{ет}} - T_{\text{ет}}} \right) \left( 1 + \frac{\alpha \chi_{\text{із}}}{\chi \frac{S}{l}} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Таким чином точність вимірювання  $\chi$  залежить від таких факторів: точності вимірювань геометричних розмірів зразка та еталону, точності вимірювання потужності внутрішнього нагрівача та температури на кінцях досліджуваного зразка, а, особливо, від співвідношення  $\alpha \chi_{\text{із}} / \chi \frac{S}{l}$  – повних теплопровідностей ізоляції і досліджуваного зразка матеріалу.

Можна відмітити, що для зразків, коефіцієнт теплопровідності яких є значним, похибка вимірювання, фактично, зводиться до суми похибок вимірювання геометричних розмірів, потужності внутрішнього нагрівача та температури на кінцях зразка, досліджуваного матеріалу.

## ВИСНОВКИ

Розроблені теоретичні основи нової стаціонарної абсолютної методики вимірювання теплопровідності твердих матеріалів, яка в подальшому може бути використана для визначення цілого комплексу інших термоелектричних параметрів: теплопровідності  $\chi$ , коефіцієнта термо-Е.Р.С.  $\alpha$  та

електропровідності  $\sigma$ . Описана теорія похибок наведеної методики.

1. Фреїк Д. М. Методи вимірювання теплопровідності напівпровідникових матеріалів / Д. М. Фреїк, Р. Я. Михайльонка, В. М. Кланічка // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – Т. 5, – № 1 – С. 173–191. 2. Анатичук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник.

/ Л. И. Анатичук. – К.: Наук. думка, 1979. – 768 с. 3. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы / Иоффе А. Ф. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. – 346 с.

Поступила в редакцію 24.11.2010 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Карпаш О.М.