

УДК 539.2

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ ДОБРОТНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

М. О. Галуцак¹⁾, Д. М. Фреїк²⁾, М. О. Карнаш¹⁾, А. І. Ткачук¹⁾

1) – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (0342) 50-46-12

2) – Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка,
57, м. Івано-Франківськ, 76025, тел. (0342) 59-60-82

Проведено аналіз різноманітних методів вимірювання термоелектричних параметрів напівпровідників. Запропоновано новий підхід для визначення термоелектричної добротності напівпровідникового матеріалу в широкому інтервалі температур (300÷1000)К шляхом безпосереднього вимірювання ряду параметрів електричного кола, до складу якого входить спеціальна вимірювальна комірка. Детально описано теорію методу, застосування її у методиці вимірювань та зроблено оцінку похибки експерименту.

Ключові слова: термоелектричні параметри, питома електропровідність, температура, електричне коло, напівпровідниковий матеріал, добротність, вимірювання.

Проведен анализ различных методов измерения термоэлектрических параметров полупроводников. Предложен новый подход к определению термоэлектрической добротности полупроводникового материала в широком интервале температур (300 ÷ 1000) К путем непосредственного измерения ряда параметров электрической цепи, в состав которого входит специальная измерительная ячейка. Подробно описано теорию метода, применение ее в методике измерений и произведена оценка погрешности эксперимента.

Ключевые слова: термоэлектрические параметры, удельная электропроводность, температура, электрическая цепь, полупроводниковый материал, добротность, измерение.

Analysis of various methods for measurement of semiconductors' thermo-electrical properties is done. New approach for determination of thermoelectrical figure of merit of semiconductor materials in wide range of temperatures (from 300 to 1000 K) is proposed using direct measurement of electrical circuit parameters which includes special measurement cell. The theoretical background of the method, its application in measurement technique is described in detail as well as experimental accuracy assessment is done.

Key words: thermo-electrical properties, specific electric conductivity, temperature, electrical circuit, semiconductor materials, good quality, measurement.

В літературі описано різноманітні методи вимірювання термоелектричних параметрів напівпровідників. Більшість із них присвячені вимірюванню теплопровідності [1, 2], тоді як ефективність практичного використання термоелектричних матеріалів визначається: питомою електропровідністю ($[\delta] = \text{Om}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), коефіцієнтом термо-Е.Р.С. ($[\alpha] = \text{B} \cdot \text{K}^{-1}$), коефіцієнтом теплопровідності ($[\chi] = \text{Bt} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), термоелектричною добротністю ($[Z] = \text{K}^{-1}$), безрозмірною термоелектричною добротністю (ZT). Вважають, що напівпровідники можна використовувати як термоелектричний матеріал, коли для них $Z \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ або $ZT \approx 1$.

Вивчення властивостей напівпровідникового матеріалу вимагає відповідних методик вимірювання його термоелектричних

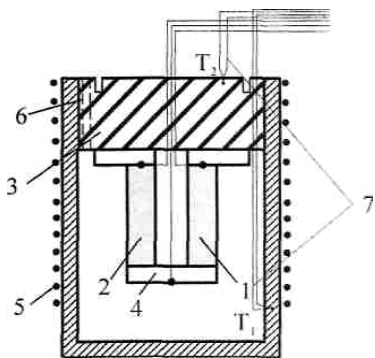
параметрів. Особливої уваги заслуговують такі методики, які в одному експерименті дають можливість отримати весь спектр термоелектричних параметрів матеріалу. Найбільш складною задачею є визначення теплопровідності, яка вимагає врахування багатьох фізичних і технологічних факторів. Розрізняють абсолютні і порівняльні методи та стаціонарні і динамічні методи визначення теплопровідності, але при використанні будь-яких методів виникає проблема теплових втрат через середовище, яке оточує досліджуваний зразок, що впливає на точність при їх використанні. Проте для практичних цілей найбільш важливим параметром матеріалу є його термоелектрична добротність, а тому питання пошуку методу вимірювання

термоелектричної добротності, а звідси і всіх інших параметрів в одному експерименті, залишається відкритим.

Заслугує уваги метод Хармана [3], який дає можливість здійснювати вимірювання термоелектричних параметрів в інтервалі температур від 100К до 350К та запропонована на основі модифікації даного методу методика [4] для вимірювання основних термоелектричних параметрів напівпровідникових матеріалів в інтервалі температур від 77 К до 1000 К. Для забезпечення вимірювань у широкому інтервалі температур авторами використано спеціальні конструкції вимірювальних комірок і додаткові криогенна система та фонові печі.

Нами запропоновано метод вимірювань, що дозволяє визначити термоелектричну добротність напівпровідникового матеріалу через безпосередньо вимірювані параметри електричного кола.

Для визначення термоелектричної добротності використовується вимірювальна комірка (рис.1), що складається із двох зразків 1 і 2 одного типу провідності з однаковими розмірами і властивостями, термостатичної основи 3, з якою зразки мають надійний тепловий контакт, металічної пластини 4, яка з'єднує кінці зразків та фонові печі 5 для плавного нагріву від 300 К до 1000 К.



1, 2 – два зразки одного типу провідності з ідентичними розмірами і властивостями; 3 – термостатична основа; 4 – комутуюча металічна пластинка; 5 – фонові печі; 6 – наскрізний отвір; 7 – термопари хромель-алюмель

Рисунок 1 – Вимірювальна комірка для визначення термоелектричної добротності напівпровідникових матеріалів

В термостатичній основі 3 зроблений отвір, що забезпечує вакуум при проведенні вимірювань (комірка розміщується під ковпак вакуумного універсального поста типу ВУП-4).

Для контролю температури фонові печі і зразків використовуються термопари хромель-алюмель 7.

Електрична схема вимірювань представлена на рис. 2.

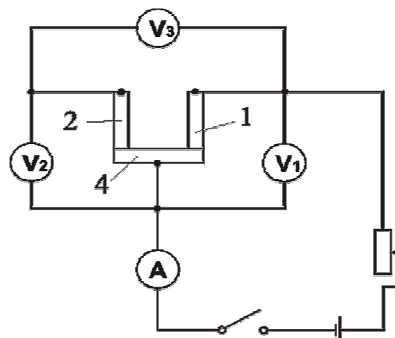


Рисунок 2 – Електрична схема для вимірювання електричних параметрів напівпровідників (позначення 1, 2, 4 відповідають позначенням на рис. 1)

Вимірювання проводять наступним чином. Пропускають постійний струм густиною $0,5 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ через зразок 1. На зразку встановлюють деякий перепад температур ΔT . Спад напруг вимірюють за допомогою вольтметрів V_1, V_2, V_3 (рис. 2). Параметри кіл пов'язані такими співвідношеннями:

$$U_1 = IR + \alpha \Delta T, \quad (1)$$

$$U_2 = \alpha \Delta T,$$

$$U_3 = U_1 - U_2 = IR,$$

де U_1, U_2, U_3 – спади напруг у В; I – сила постійного струму в А; R – електричний опір зразка в Ом; α – коефіцієнт термо-Е.Р.С. у В/К.

Рівняння теплового балансу на холодному кінці зразка має вигляд

$$I \alpha T = 2 \frac{\chi S}{l} \Delta T, \quad (2)$$

де χ – коефіцієнт теплопровідності (Вт/см·К); l – висота зразка (см); S – площа поперечного перерізу (см²).

Із (1) маємо, що

$$\begin{aligned} \alpha \Delta T &= U_1 - IR, \\ \Delta T &= (U_1 - IR) / \alpha, \\ R &= U_3 / I. \end{aligned} \quad (3)$$

Із (2) з урахуванням (3) отримаємо, що

$$\alpha^2 IT / \chi = 2(U_1 - IR)S / l. \quad (4)$$

Враховуючи, що $\sigma = 1/\rho$ і $\rho = RS/l$,
 $\sigma = l/RS$.

Тоді вираз (4) переписемо у такому вигляді:

$$\frac{\alpha^2 IT}{\chi} = 2 \frac{(U_1 - IR)}{Rl/(RS)},$$

або

$$\frac{\alpha^2 T l / (RS)}{\chi} = 2 \frac{(U_1 - IR)}{IR}. \quad (5)$$

Оскільки термоелектрична добротність
 $Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi}$, то

$$ZT = 2 \frac{(U_1 - IR)}{IR},$$

або з урахуванням (1)

$$ZT = 2 \left(\frac{U_1}{U_3} - 1 \right), \quad (6)$$

звідки

$$Z = \frac{2}{T} \left(\frac{U_1}{U_3} - 1 \right). \quad (7)$$

Отже, за формулами (6) і (7) спади напруг на зразках 1 і 2, можна обчислити як безрозмірну термоелектричну добротність матеріалу, так і його термоелектричну добротність за умови певної температури.

Зауважимо, що при необхідності можна обчислити й інші термоелектричні параметри напівпровідникового матеріалу. Так, з формули (1) визначимо коефіцієнт термо – Е.Р.С.:

$$\alpha = U_2 / \Delta T. \quad (8)$$

Враховуючи, що $\sigma = l/(RS)$ та $R = U_3/I$, маємо, що

$$\sigma = Il / (U_3 S). \quad (9)$$

Коефіцієнт теплопровідності визначають із співвідношення

$$\chi = \alpha^2 \sigma / Z. \quad (10)$$

Щоб виконати оцінку похибок вимірювань, необхідно виразити основні термоелектричні

параметри через величини, що вимірюються.

З (7) видно, що для оцінки похибки термоелектричної добротності Z необхідно оцінити точність деякої величини $\varepsilon = (U_1/U_3 - 1)$. Аналіз показує, що

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \leq 2 \frac{\Delta U_3}{\alpha \Delta T}. \quad (11)$$

Оцінимо величину ΔT із рівняння теплового балансу (2). Для цього врахуємо, що середнє значення коефіцієнта термо – Е.Р.С. для термоелектричних напівпровідників становить (200-400) мкВ/К, середнє значення теплопровідності – 0,02 Вт/см²К⁻¹, геометричні розміри вимірювальних зразків, як правило, складають $l \approx 1$ см, $S \approx 0,2$ см², а сила струму $I \approx 0,1$ А. Тоді, при $T=900$ К $\Delta T \approx 2,5$ К.

Підставивши значення для ΔT і похибку вимірювання спаду напруги $U_3 \approx 1$ мкВ у вираз (11), дістанемо, що

$$\Delta \varepsilon / \varepsilon \approx (0,5 \div 5,0)\%,$$

тобто термоелектрична добротність може бути визначена з точністю до 5,5%.

ВИСНОВКИ

Запропоновано метод для визначення термоелектричної добротності напівпровідникових матеріалів за безпосередньо вимірними параметрами електричного кола.

Представлена теорія методу та зроблено оцінку похибок вимірювань.

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. Goldsmid H.J. Introduction to Thermoelectricity / H.J.Goldsmid. - Springer Heidelberg Dordrecht London New York. - 2009. - P.250. 3. Harman C. Measurement of Thermal Conductivity by Utilization of the Peltier Effect / C.Harman, J.H.Cahn and M.J.Logan. // Journal of Applied Physics. - 1959. - № 30(9) - P. 1351-1359. 4. Harman C. Методика вимірювання термоелектричних параметрів напівпровідникових матеріалів у широкому інтервалі температур / С.Нарман, J.H.Cahn and M.J.Logan // Фізика і хімія твердого тіла. - 2010. - Т.11. - № 2. - С.121-128.

Поступила в редакцію 24.03.2011 р.

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