

УДК 537



Горський П.В.

Горський П. В.,<sup>1,2</sup> докт. фіз.-мат. наук

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

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,  
Чернівці, 58012, Україна e-mail: anatysh@gmail.com

## ОЦІНКА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ТЕПЛОВОГО КОНТАКТНИХ ОПОРІВ ТА ТЕРМОЕРС ПЕРЕХІДНОГО КОНТАКТНОГО ШАРУ «ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МАТЕРІАЛ-МЕТАЛ» НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ КОМПОЗИТІВ

*Теоретично досліджено електричний та тепловий контактні опори, термоЕРС, фактор потужності та термоелектричну добротність перехідного контактного шару «термоелектричний матеріал-метал», зумовленого дифузією частинок металу у напівпровідник без утворення нових фаз. Дослідження виконано на основі теорії композитів на прикладі пари «телурид вісмуту – нікель». Встановлено, що термоелектричні характеристики перехідного контактного шару залежать як від його товщини, так і від режиму створення, за основну характеристику якого взято інтенсивність дифузії металу у напівпровідник. При цьому як від товщини так і від режиму створення істотно залежать електричний і тепловий контактні опори, фактор потужності та добротність перехідного шару, в той час, як термоЕРС не залежить від товщини шару і мало залежить від режиму створення. В інтервалі товщин перехідного шару від 20 до 150 мкм за розглянутих режимів створення електричний контактний опір змінюється в інтервалі від  $1.16 \cdot 10^{-5}$  до  $4.41 \cdot 10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>, тепловий контактний опір змінюється в інтервалі від 0.674 до 0.032 (К·см<sup>2</sup>)/Вт, термоЕРС – в інтервалі від 199.5 до 198.5 мкВ/К, фактор потужності – в інтервалі від  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $1.8 \cdot 10^{-4}$  Вт/(м·К<sup>2</sup>), термоелектрична добротність – в інтервалі від  $2.35 \cdot 10^{-3}$  до  $2.9 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** електричний контактний опір, тепловий контактний опір, термоЕРС, перехідний шар, композит, дифузія, інтенсивність дифузії.

### Вступ

Відомо, що створення контактів термоелектричний матеріал (ТЕМ) – метал у процесі виготовлення термоелектричних перетворювачів енергії може відбуватись в основному двома шляхами: прямого припаювання контактного металу до напівпровідника і зі створенням андидифузійного шару з металу, попередньо гальванічно осадженого на поверхню ТЕМ. У першому випадку припій, який сполучається з ТЕМ, утворює нові фази, питомий опір, теплопровідність, термоЕРС і товщина шару яких в основному і визначають термоелектричні параметри та характеристики перехідного шару [1]. У другому випадку метал андидифузійного шару, дифундує у ТЕМ, в залежності від технології та режимів створення може як

утворювати нові фази з ТЕМ, так і не утворювати їх [2 – 5]. Зазвичай при створенні антидифузійного шару шляхом гальванічного осадження з наступним припаюванням контактного металу метал антидифузійного шару частково дифундує у ТЕМ, а припій може проникати у нього лише внаслідок утворення тріщин у ТЕМ. При цьому метал антидифузійного шару не утворює нових фаз з ТЕМ [5]. Тому для оцінки термоелектричних параметрів перехідного шару у цьому випадку придатна теорія композитів [6]. Така оцінка і є метою даної статті.

### Розрахунок електричного контактного опору та термоЕРС перехідного контактного шару «ТЕМ-метал», зумовлених дифузією металу у ТЕМ, та обговорення отриманих результатів.

Даний розрахунок почнемо з побудови моделі розподілу частинок металу у ТЕМ. Для цього запишемо рівняння одновимірної стаціонарної дифузії за наявності джерела:

$$D \frac{d^2 n}{dx^2} = -Q, \quad (1)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії металу у ТЕМ,  $n$  – концентрація частинок металу на глибині  $x$ ,  $Q$  – інтенсивність джерела, яким слугує шар металу. За кімнатної температури правомірно вважати, що  $Q$  дорівнює нулеві або є малою додатною величиною. Але у процесі паяння як  $D$  так і  $Q$  внаслідок підвищення температури істотно збільшуються. Якщо товщина шару дорівнює  $d_0$ , то рівняння (1) повинно бути розв'язане за граничних умов  $n(0) = n_0, n(d_0) = 0$ . При переході до безрозмірної змінної  $y = x/d_0$  розв'язок рівняння (1) за вказаних граничних умов матиме вигляд:

$$n(y) = n_0 [1 - (1 - A)y - Ay^2], \quad (2)$$

де безрозмірний параметр  $A = Qd_0^2 / 2Dn_0$  характеризує режим і умови створення контакту.

Перейдемо тепер до розрахунків електричного та теплового контактних опорів, термоЕРС, фактору потужності та термоелектричної добротності перехідного контактного шару. Для цього спочатку, використовуючи співвідношення (2), визначимо об'ємні частки фаз (компонентів), тобто металу  $v_m$  та напівпровідника  $v_s$  у перехідному контактному шарі:

$$v_m = \int_0^1 \frac{(A_m / \rho_m) [1 - (1 - A)y - Ay^2]}{(A_m / \rho_m) [1 - (1 - A)y - Ay^2] + (A_s / \rho_s) [(1 - A)y + Ay^2]} dy. \quad (3)$$

$$v_s = 1 - v_m$$

У цих співвідношеннях  $A_m, A_s, \rho_m, \rho_s$  атомні (молекулярні) маси та густини металу та ТЕМ відповідно.

Подальші розрахунки виконуємо з використанням теорії композитів у наступному порядку. Електропровідність  $\sigma$  та теплопровідність  $k$  перехідного шару знаходимо за формулами:

$$\sigma = 0.25 \left\{ \sigma_s (2 - 3v_m) + \sigma_m (3v_m - 1) + \sqrt{[\sigma_s (2 - 3v_m) + \sigma_m (3v_m - 1)]^2 + 8\sigma_m \sigma_s} \right\}, \quad (4)$$

$$\kappa = 0.25 \left\{ \kappa_s (2 - 3v_m) + \kappa_m (3v_m - 1) + \sqrt{[\kappa_s (2 - 3v_m) + \kappa_m (3v_m - 1)]^2 + 8\kappa_m \kappa_s} \right\}. \quad (5)$$

Електричний  $r_c$  та тепловий  $r_{ct}$  контактні опори знаходимо за формулами:

$$r_c = d_0 / \sigma, \quad (6)$$

$$r_{ct} = d_0 / \kappa. \quad (7)$$

ТермоЕРС перехідного шару визначимо за формулою:

$$\alpha = \frac{\alpha_m \kappa_s v_m + \alpha_s \kappa_m (1 - v_m)}{\kappa_s v_m + \kappa_m (1 - v_m)}. \quad (8)$$

Після цього визначаємо фактор потужності  $P = \alpha^2 \sigma$  та термоелектричну добротність  $z = \alpha^2 \sigma / \kappa$ . Результати розрахунків перелічених характеристик перехідного контактного шару за температури 300 К в залежності від  $A$  наведено на рис. 1 – 5.

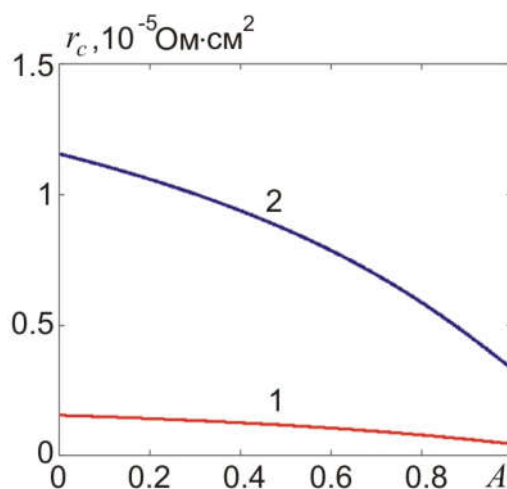


Рис. 1. Залежність електричного контактного опору за 300К від параметру  $A$  за товщини перехідного шару: 1) 20мкм; 2) 150мкм.

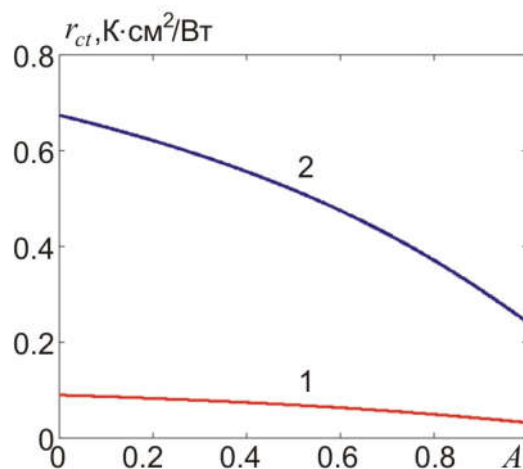


Рис. 2. Залежність теплового контактного опору за 300К від параметру  $A$  за товщини перехідного шару: 1) 20мкм; 2) 150мкм.

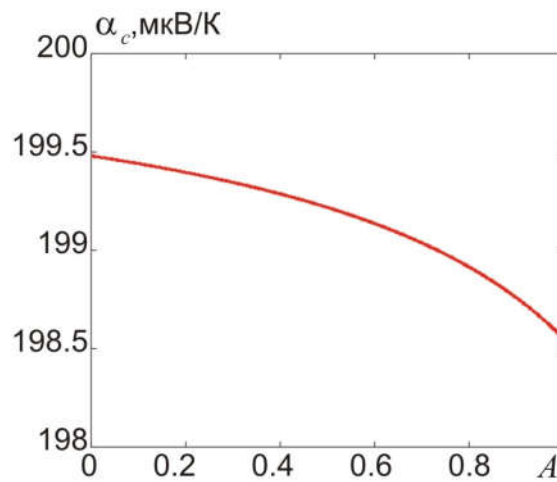


Рис.3. Залежність термоЕРС перехідного шару за 300К від параметру  $A$

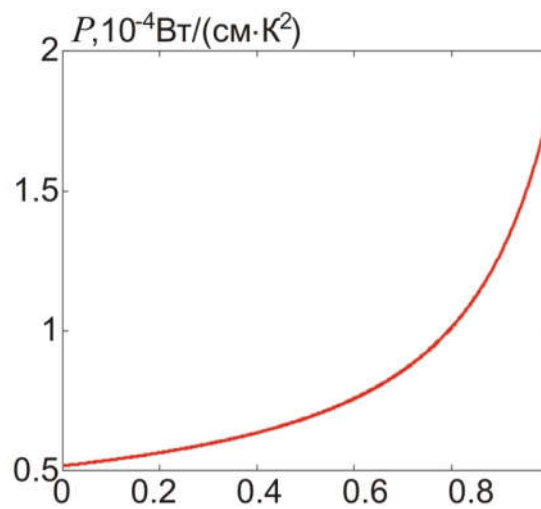


Рис.4. Залежність фактору потужності перехідного шару за 300К від параметру  $A$

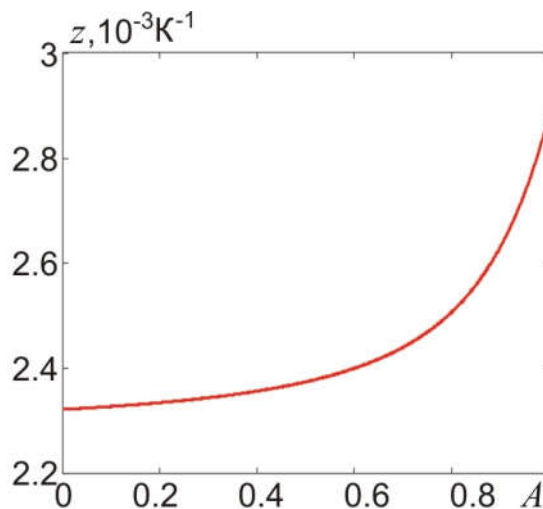


Рис.5. Залежність термоелектричної добротності перехідного шару за 300К від параметру  $A$

Оскільки в якості прикладу розглядалась контактна пара «телурид вісмуту – нікель», то у процесі розрахунків використовувались такі параметри матеріалів:  $\sigma_s = 800$  См/см,  $\sigma_m = 1.667 \cdot 10^5$  См/см,  $\kappa_s = 1.4 \cdot 10^{-2}$  Вт/(см·К),  $\kappa_m = 9.2$  Вт/(см·К),  $A_s = 801$ ,  $A_m = 58$ ,  $\rho_s = 7700$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_m = 8900$  кг/м<sup>3</sup>.

З рис. 1 видно, що за товщини перехідного шару, рівної 150 мкм електричний контактний опір при зростанні параметру  $A$  від 0 до 1 зменшується від  $1.16 \cdot 10^{-5}$  до  $3.31 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>, а за товщини перехідного шару 20 мкм – від  $1.55 \cdot 10^{-6}$  до  $4.41 \cdot 10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>. Таке зменшення електричного контактного опору відбувається тому, що при зростанні швидкості надходження частинок металу у напівпровідник електропровідність композиту повинна зростати. Так само з рисунка 2 видно, що за товщини перехідного шару, рівної 150 мкм тепловий контактний опір при зростанні параметру  $A$  від 0 до 1 зменшується від 0.674 до 0.24 (К·см<sup>2</sup>)/Вт, а за товщини перехідного шару 20 мкм – від 0.090 до 0.032 (К·см<sup>2</sup>)/Вт. Таке зменшення теплового контактного опору відбувається тому, що при зростанні швидкості надходження частинок металу у напівпровідник теплопровідність композиту також повинна зростати. З рисунка 3 видно, що термоЕРС перехідного контактного шару при зростанні параметру  $A$  від 0 до 1 зменшується від 199.5 до 198.5 мкВ/К. Це відбувається тому, що при зростанні швидкості надходження частинок металу у напівпровідник термоЕРС композиту повинна зменшуватись. З рисунка 4 видно, що фактор потужності перехідного контактного шару при зростанні параметру  $A$  від 0 до 1 зростає від  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $1.8 \cdot 10^{-4}$  Вт/(м·К<sup>2</sup>), а з рисунка 5 видно, що термоелектрична добротність перехідного контактного шару при зростанні параметру  $A$  від 0 до 1 зростає від  $2.35 \cdot 10^{-3}$  до  $2.9 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>. Зростання фактору потужності відбувається завдяки зростанню електропровідності, а зростання термоелектричної добротності – завдяки тому, що у даному інтервалі параметру  $A$  електропровідність зростає швидше за теплопровідність. З характеру отриманих залежностей і того факту, що за великої концентрації частинок металу термоЕРС повинна істотно зменшуватись, впливає, що, принаймні формально, існує таке значення безрозмірного параметру  $A$ , за якого фактор потужності та термоелектрична добротність перехідного шару досягають максимуму. З цієї точки зору такі перехідні шари можна було б вважати оптимізованими, але питання про досяжність цього значення параметру  $A$  у реальному технологічному процесі потребує окремого дослідження. Однак зміст цього параметру можливо деталізувати. Для цього будемо вважати, що товщина  $d_0$  перехідного контактного шару визначається дифузією, і, отже, у відповідності з результатами розв'язання нестационарного рівняння дифузії для напівобмеженого середовища [7]  $d_0 = 6\sqrt{D\tau}$ , де  $\tau$  – час, протягом якого відбувається найбільш інтенсивна дифузія металу у напівпровідник. Отже,  $A = 18Q\tau/n_0$ . Отже, якщо час  $\tau$  фіксований, то параметр  $A$  тим більший, чим більше швидкість  $Q$  надходження частинок металу у напівпровідник у процесі стаціонарної дифузії, і вона повинна бути досить великою, оскільки  $n_0$  досить значна величина. Для нікелю вона дорівнює  $9.14 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup> [8]. Тоді виходить, що при фіксованому часі товщина перехідного шару залежить від коефіцієнта дифузії, що цілком зрозуміло, оскільки цей коефіцієнт залежить, зокрема, від наявності у матеріалі дефектів та порушень, які сприяють дифузії, і, отже, збільшенню товщини перехідного шару.

Торкаючись співставлення отриманих результатів з експериментальними даними, зазначимо, що з одного боку величина електричного контактного опору за 300К для термоелектричних модулів висотою близько 0.25 мм, зазначена у праці [9], отримана у поліпшеному технологічному процесі, дорівнює  $1.12 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>. А це лише у 2.5 рази більше

за нижню межу контактного опору, зазначену у даній статті. З іншого боку за товщини перехідного шару 20 мкм у найгіршому випадку, тобто за  $A = 0$ , розрахункове значення електричного контактного опору складає  $1.55 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>. А це лише в 1.38 рази більше за значення електричного контактного опору за 300 К, отримане у поліпшеному технологічному процесі створення контактів.

З іншого боку, у працях [3] та [5] наводяться і такі значення електричних контактних опорів для термоелектричних гілок з антидифузійним шаром нікелю, які досить істотно перевищують верхню межу електричного контактного опору, зазначену у даній статті, тобто  $1.16 \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>. Таким чином ми бачимо, що існують досить значні технологічні резерви зниження величин електричного та теплового контактних опорів.

## Висновки

1. Шляхом розв'язання одновимірного рівняння дифузії знайдено стаціонарний розподіл концентрації частинок нікелю в телуриді вісмуту по глибині перехідного шару.
2. З використанням теорії композитів розраховано електричний та тепловий контактні опори, термоЕРС, фактор потужності та добротність перехідного контактного шару в залежності від інтенсивності надходження частинок нікелю при стаціонарній дифузії.
3. Встановлено, що при зростанні інтенсивності надходження частинок нікелю електричний та тепловий контактні опори та термоЕРС перехідного контактного шару зменшуються, а фактор потужності та термоелектрична добротність – зростають.
4. У розглянутому інтервалі інтенсивностей надходження частинок нікелю за стаціонарної дифузії за товщин перехідного шару 20 – 150 мкм електричний контактний опір може змінюватись в інтервалі від  $1.16 \cdot 10^{-5}$  до  $4.41 \cdot 10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>, тепловий контактний опір – в інтервалі від 0.674 до 0.032 (К·см<sup>2</sup>)/Вт, термоЕРС – в інтервалі від 199.5 до 198.5 мкВ/К, фактор потужності – в інтервалі від  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $1.8 \cdot 10^{-4}$  Вт/(м·К<sup>2</sup>), а термоелектрична добротність – в інтервалі від  $2.35 \cdot 10^{-3}$  до  $2.9 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>. Інтервали зміни електричного та теплового контактних опорів можуть змінитись і розширитись з одного боку з-за наявності потенціальних бар'єрів між ТЕМ та металом, які долаються шляхом тунелювання або емісії, з іншого – за рахунок наявності тонкої оксидної плівки на поверхні ТЕМ, але ці чинники у даній статті не розглядаються.

## Література

1. Алиева Т.Д. Структура и электрические свойства границ раздела кристаллов  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_3$  с некоторыми сплавами / Т.Д. Алиева, Б.Ш. Бархалов, Д.Ш. Абдинов // Неорганические материалы. – 1995. – Т.31. – №2. – С.194-198.
2. Chuang C.-H., Lin Y.-C., Lin C.-W. Intermetallic reactions during the solid-liquid interdiffusion bonding of  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$  thermoelectric materials with Cu electrodes using a Sn interlayer / C.-H. Chuang, Y.-C. Lin, C.-W. Lin//Metals. – 2016. – Vol.6. – Is.92. – P.1 – 10. (doi: 103390/met.6040092).
3. Сабо Є.П. Технологія халькогенних термоелементів. Фізичні основи. Розділ 3. Технологія комутації віток термоелемента. Продовження. 3.5. Електрохімічна металізація / Сабо Є.П. // Термоелектрика. – 2011. – №1. – С.26-35.
4. Kuznetsov G.D. The metallization of the thermoelement branches by ionic sputtering of the nickel and cobalt / G.D. Kuznetsov, Y.G. Polystanskiy, V.A. Evseev // XIV international

- conference on thermoelectrics. Proceedings. June 27-30, 1995. – St. Petersburg-1995. – P.166-167.
5. Бублик В.Т. Изменение структуры приконтактной области термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута при повышенных температурах/ В.Т. Бублик, А.И. Воронин, В.Ф. Пономарев, Н.Ю. Табачкова // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2012. – №2. – С.17-20.
  6. Снарський А.О. Про закон Відемана-Франца в термоелектричних композитах / А.О. Снарський, М.І. Женіровський, І.В. Безсуднов // Термоелектрика – 2006. – №3. – С.59-65.
  7. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1972. – 736с.
  8. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 792с.
  9. Gupta R.P. Practical contact resistance measurement method for bulk Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based thermoelectric devices / Gupta R.P., McCarty R., Sharp J. // J. of electron. mat. – 2013. – P.1-5 (doi: 10.1007/s11664-013-2806-6).
  10. Драбкин И.А. Контактные сопротивления в составных термоэлектрических ветвях/ И.А. Драбкин, В.Б. Освенский, А.И. Сорокин и др. // ФТП. – 2017. – Т.51. – Вып.8. – С. 1038-1040.

Надійшла до редакції 12.04.2018

**Горський П. В.,<sup>1,2</sup> докт. физ.-мат. наук**

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,  
Черновцы, 58029, Украина, e-mail: anatysh@gmail.com;

<sup>2</sup>Черновицкий национальный университет  
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,  
Черновцы, 58000, Украина, e-mail: anatysh@gmail.com

## **ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ТЕПЛООВОГО КОНТАКТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ТЕРМОЭДС ПЕРЕХОДНОГО КОНТАКТНОГО СЛОЯ «ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ-МЕТАЛЛ» НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ КОМПОЗИТОВ**

*Теоретически исследованы электрический и тепловой контактные сопротивления, термоЭДС, фактор мощности и термоэлектрическая добротность переходного контактного слоя «термоэлектрический материал-металл», обусловленного диффузией частиц металла в полупроводник без образования новых фаз. Исследование выполнено на основе теории композитов на примере пары «теллурид висмута – никель». Установлено, что термоэлектрические характеристики переходного контактного слоя зависят как от его толщины, так и от режима создания, в качестве основной характеристики которого взята интенсивность диффузии металла в полупроводник. При этом как от толщины, так и от режима создания существенно зависят электрическое и тепловое контактные сопротивления, фактор мощности и добротность переходного слоя, в то время, как термоЭДС не зависит от толщины слоя и мало зависит от режима создания. В интервале*

тощини переходного слоя от 20 до 150 мкм при рассмотренных режимах создания электрическое контактное сопротивление изменяется в интервале от  $1.16 \cdot 10^{-5}$  до  $4.41 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ , тепловое контактное сопротивление изменяется в интервале от 0.674 до  $0.032 (\text{К} \cdot \text{см}^2) / \text{Вт}$ , термоЭДС – в интервале от 199.5 до 198.5 мкВ/К, фактор мощности – в интервале от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $1.8 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}^2)$ , термоэлектрическая добротность – в интервале от  $2.35 \cdot 10^{-3}$  до  $2.9 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ . Библ. 10, рис. 5.

**Ключевые слова:** электрическое контактное сопротивление, тепловое контактное сопротивление, термоЭДС, переходной слой, композит, диффузия, интенсивность диффузии.

**P. V. Gorskiy,<sup>1,2</sup> Doctor fiz.-mat. science**

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

<sup>2</sup>Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine,  
e-mail: anatyach@gmail.com

**ESTIMATION OF THE ELECTRICAL AND THERMAL CONTACT  
RESISTANCES AND THERMOEMF OF TRANSIENT CONTACT LAYER  
“THERMOELECTRIC MATERIAL-METAL” BASED ON THE  
THEORY OF COMPOSITES**

**References**

1. Alieva T.D., Barkhalov B.Sh., Abdinov D.Sh. (1995). Struktura i elektricheskie svoystva granits razdela kristallov  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  i  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_3$  s nekotorymi splavami [Structure and electrical properties of interfaces of  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  and  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_3$  crystals with some alloys]. Neorganicheskie materialy – Inorganic Materials, 31(2), 194-198 [in Russian].
2. Chuang C.-H., Lin Y.-C., Lin C.-W. (2016). Intermetallic reactions during the solid-liquid interdiffusion bonding of  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.55}\text{Se}_{0.45}$  thermoelectric materials with Cu electrodes using a Sn interlayer. Metals, 6(92), 1-10. (doi: 103390/met.6040092).
3. Sabo E.P. (2011). Technology of chalcogen thermoelements. Physical foundations. Section 3. Technology of connection of thermoelement legs. Continuation. 3.5. Electrochemical metallization. J.Thermoelectricity, 1, 26-35.
4. Kuznetsov G.D., Polystanskiy Y.G., Evseev V.A. (1995). The metallization of the thermoelement branches by ionic sputtering of the nickel and cobalt. Proc. of XIV International Conference on Thermoelectrics (Russia, St.Petersburg, June 27-30, 1995) (pp.166-167).
5. Bublik V.T., Voronin A.I., Ponomarev V.F., Tabachkova N.Yu. (2012). Izmeneniie struktury prikontaktnoi oblasti termoelektricheskikh materialov na osnove telluride vismuta pri povyshennykh temperaturakh [Change in the structure of near-contact area of thermoelectric materials based on bismuth telluride at elevated temperatures] Izvestiia vysshykh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki - News of Higher Educational Institutions. Electronic Technique Materials, 2, 17-20 [in Russian].
6. Snarskiy A.O., Zhenirovskiy M.I., Besudnov I.V. (2006). On the law of Wiedemann-Franz in thermoelectric composites. J.Thermoelectricity, 3, 59-65.



7. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. (1972). *Uravneniia matematicheskoi fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Moscow: Nauka [in Russian].
8. Kittel Charles. *Vvedeniie v fiziku tverdogo tela* [Introduction to Solid State Physics]. Moscow: Nauka, 1978 [Russian transl].
9. Gupta R.P., McCarty R., Sharp J. (2013). Practical contact resistance measurement method for bulk Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based thermoelectric devices. *J. of Electron. Mat.*, 1-5 (doi: 10.10007/s11664-013-2806-6).
10. Drabkin I.A., Osvenskiy V.B., Sorokin A.I. et al. (2017). Kontaknyie soprotivleniia v sostavnykh termoelektricheskikh vetviakh [Contact resistances in composite thermoelectric legs]. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov – Semiconductors*, 51 (8), 1038-1040.

Submitted 12.04.2018