

УДК 537



Горський П.В.

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

<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, ЗУМОВЛЕНИХ НЕПЛОЩИНІСТЮ ПОВЕРХНІ НАПІВПРОВІДНИКА

---

*Теоретично досліджено вплив шорсткості поверхні напівпровідника на електричний та тепловий контактні опори та термоЕРС перехідного контактного шару «термоелектричний матеріал-метал». Розподіл «западин» і «горбів» на шорсткій поверхні модельовано «усіченим розподілом Гауса». Досліджено вплив параметрів розподілу на електричний контактний опір та термоЕРС контакту «термоелектричний матеріал-метал». Конкретні числові розрахунки та побудову графіків виконано для випадку контакту телуриду вісмуту з нікелем. Виявилось, що електричний та тепловий контактні опори та термоЕРС за малих середньоквадратичних відхилень висоти профілю немонотонно залежить від середньої висоти профілю, але з наближенням розподілу «западин» та «горбів» до рівномірного прямують до певних асимптотичних значень. При цьому як тепловий та електричний контактні опори, так і термоЕРС у міру наближення розподілу западин та горбів до рівномірного зростають за великих відносних значень середньої висоти профілю і зменшуються за малих його значень. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** електричний контактний опір, термоЕРС, шорсткість поверхні, перехідний шар, елементарні бруски, середнє значення, середньоквадратичне відхилення.

### Вступ

Попередніми авторами опубліковано ряд теоретичних праць, присвячених розрахункам електричних та теплових контактних опорів «ТЕМ-метал» [1 – 4]. У цих працях розглядались бар'єрні та емісійні механізми формування електричного контактного опору «ТЕМ-метал», дифузне розсіювання фононів на нерівностях поверхні, як механізм формування теплового контактного опору «ТЕМ-метал», а також вплив дифузії металу у напівпровідник та коефіцієнту збирання носіїв заряду металевим електродом на електричний контактний опір «ТЕМ-метал». З іншого боку, з експериментальних даних [5 – 8] відомо, що якість обробки поверхні напівпровідника істотним чином впливає на контактний опір «термоелектричний матеріал-метал», і, отже, на якість термоелектричного перетворення енергії. Однак, авторіві даної статті невідомі праці, де б закономірно, у тому числі з врахуванням конкретних числових

характеристик відхилення поверхні ТЕМ від ідеальної площини, розглядався її вплив на електричний опір та термоЕРС контакту «ТЕМ-метал». Саме такий розгляд і є метою пропонованого дослідження.

Слід також зазначити, що у праці [9] наведено межі глибини порушеного шару, який виникає при різанні зливку термоелектричного матеріалу на гілки. Вважається, що ця глибина може коливатись від 20 до 150 мкм.

### Розрахунок електричного контактного опору та термоЕРС перехідного контактного шару «ТЕМ-метал», зумовлених не площинністю поверхні ТЕМ, та обговорення отриманих результатів.

Попередньо опишемо фізичну модель, яка використовувалась у процесі розрахунків. Нехай у нас є ТЕМ з неплоскою поверхнею. Оскільки таку поверхню можна уявити, як сукупність випадково розташованих «западин» та «горбів» з випадковими глибинами та висотами, то проведемо уявні горизонтальні площини через «вершину» найвищої «горба» та через «дно» найглибшої «западини». Віддаль між цими паралельними площинами ми і будемо вважати відомою товщиною  $d_0$  перехідного шару. Для «конструювання» перехідного шару заповнимо всі вільні від ТЕМ проміжки між горизонтальними площинами металом. Авторіві даної статті такий статистичний підхід уявляється більш слушним, ніж моделювання нерівностей об'єктами конкретної геометричної форми, наприклад, напівсферами [10].

Опишемо тепер методи розрахунку електричного контактний опору та термоЕРС перехідного контактний шару «ТЕМ-метал» в рамках цієї фізичної моделі.

Почнемо з розрахунку контактний опору. Розбивши площу контакту на елементарні площадки величиною  $ds$ , ми тим самим розіб'ємо наш перехідний контактний шар на елементарні бруски довжиною  $d_0$ , з'єднані між собою паралельно. Кожен з них складається з «металевої» частини довжиною  $d_0x$  та «напівпровідникової» частини довжиною  $d_0(1-x)$ , де  $x$  – випадкове число з інтервалу  $[0; 1]$ . Тому сумарна провідність контакту дорівнює:

$$\Sigma = \int_S \frac{ds}{d_0 [\rho_m x + \rho_s (1-x)]}, \quad (1)$$

де  $\rho_m$  та  $\rho_s$  – відповідно питомі опори металу та ТЕМ,  $S$  – площа контакту. Застосовуючи до (1) теорему про середнє, знайдемо такий остаточний вираз для електричного контактний опору:

$$r_c = d_0 \left\langle \frac{1}{\rho_m x + \rho_s (1-x)} \right\rangle^{-1}, \quad (2)$$

де кутові дужки означають усереднення за достатньо великою за обсягом послідовністю випадкових (псевдовипадкових) чисел з інтервалу  $[0; 1]$ . Ще одне модельне припущення, яке ми зробимо, полягатиме в тому, що наші псевдовипадкові числа ми будемо вважати розподіленими у вказаному інтервалі у відповідності з так званим «усіченим розподілом Гауса», який ми подамо у вигляді:

$$f(x) = \frac{\exp[-(x-a)^2/2s^2]}{\int_0^1 \exp[-(x-a)^2/2s^2] dx}, \quad (3)$$

де  $a$  та  $s$  – певні параметри, причому  $0 \leq a \leq 1$ . Границя  $\sigma \rightarrow \infty$  відповідає рівномірному розподілу, для якого  $f(x) \equiv 1$ . Тоді контактний опір остаточно дорівнює:

$$R_c = d_0 \left[ \int_0^1 \frac{f(x) dx}{\rho_m x + \rho_s (1-x)} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Використовуючи формули (3) та (4) розглянемо вплив параметрів розподілу, які і характеризують якість обробки поверхні напівпровідника, на значення контактного опору. Результати розрахунків контактного опору для пари телурид вісмуту-нікель наведено на рис. 1 для товщини  $d_0 = 20$  мкм та значень  $a$ , рівних 0.928, 0.5 та 0.072 відповідно. При цьому ми вважали, що  $\rho_m = 8.7 \cdot 10^{-6}$  Ом·см, а  $\rho_s = 1.25 \cdot 10^{-3}$  Ом·см.

З рисунка видно, що зі зростанням  $s$  електричний контактний опір досить швидко (вже за  $s = 20$ ) досягає асимптотичного значення, яке відповідає  $s = \infty$ , тобто рівномірному розподілові «западин» і «горбів» по шорсткій поверхні. Це значення дорівнює:

$$R_c = \frac{d_0 (\rho_s - \rho_m)}{\ln(\rho_s / \rho_m)}, \quad (5)$$

тобто, приблизно  $5 \cdot 10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>.

Окрім того з рисунка видно, що за малих значень  $s$  електричний контактний опір тим менший, чим ближче значення  $a$  до одиниці. Значення  $s = \infty$  за  $a = 1$  відповідає абсолютно гладкій поверхні, тому зрозуміло, що в цьому випадку  $R_c = 0$  (на рисунку цей випадок не показано).

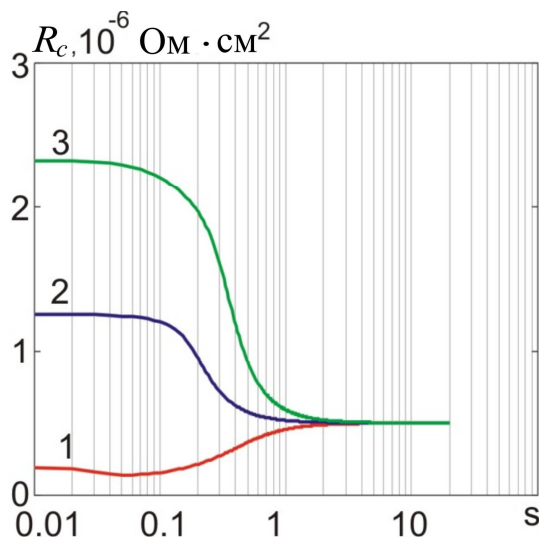


Рис. 1. Залежність електричного контактного опору пари телурид вісмуту-нікель за  $d_0 = 20$  мкм від значення  $s$  за значень  $a$  рівних: 1) 0.928; 2) 0.5; 3) 0.072

З рисунка також видно, що зі зменшенням  $a$  контактний опір зростає, оскільки зменшення  $a$  відповідає зростанню довжини «напівпровідникової» і зменшенню довжини «металевої» частини кожного з елементарних брусків, які утворюють перехідний шар. Таким чином, у відповідності до кривої 1, найменше значення контактного опору за досліджених умов дорівнює близько  $2 \cdot 10^{-7}$  Ом·см<sup>2</sup>.

Результати аналогічних розрахунків для  $d_0 = 150$  мкм наведено на рис. 2.

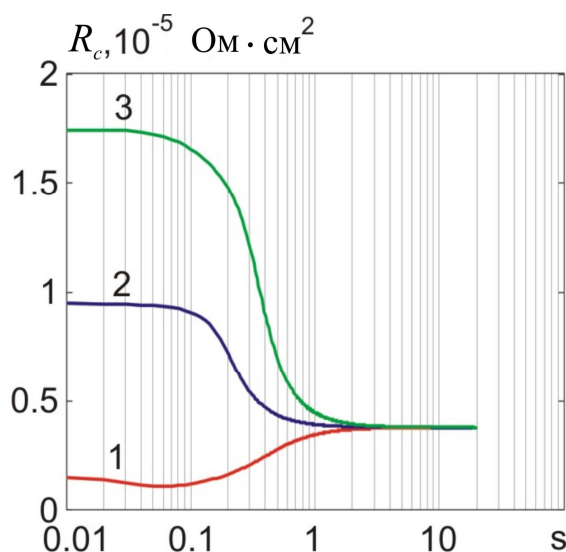


Рис. 2. Залежність електричного контактного опору пари телурид вісмуту-нікель за  $d_0 = 150$  мкм від значення  $s$  за значень  $a$  рівних: 1) 0.928; 2) 0.5; 3) 0.072

За цих умов найменше значення контактного опору дорівнює  $10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>, а його асимптотичне значення дорівнює  $3.75 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup>.

Отже, з розрахунків видно, що характер обробки поверхні, який задається параметрами розподілу (4), істотним чином впливає на значення контактного опору. Найкраща ситуація реалізується у випадку, коли перепад висот істотно більший за шорсткість поверхні. За цих умов «металева» частина елементарних брусків істотно більша за «напівпровідникову», що й пояснює порівняно мале значення контактного опору в цьому випадку.

Повністю аналогічно можна визначити тепловий контактний опір, зумовлений шорсткістю поверхні. Він дорівнює:

$$R_t = d_0 \left[ \int_0^1 \frac{f(x) dx}{\kappa_m^{-1} x + \kappa_s^{-1} (1-x)} \right]^{-1}, \quad (6)$$

Результати розрахунків теплового контактного опору за формулою (6) наведено на рис. 3, 4.

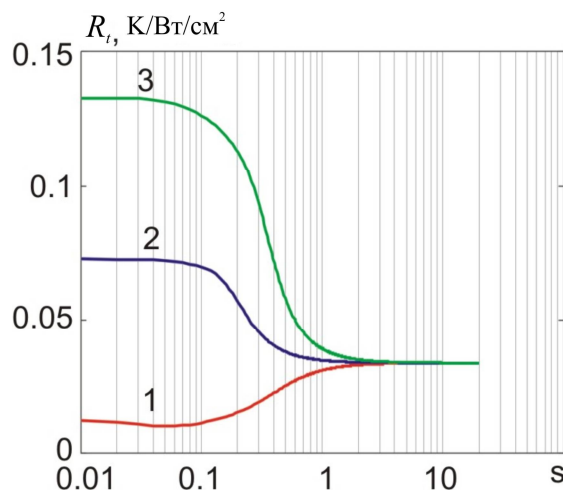


Рис. 3. Залежність теплового контактного опору пари телурид вісмуту-нікель за  $d_0 = 20$  мкм від значення  $s$  за значень  $a$  рівних: 1) 0.928; 2) 0.5; 3) 0.072

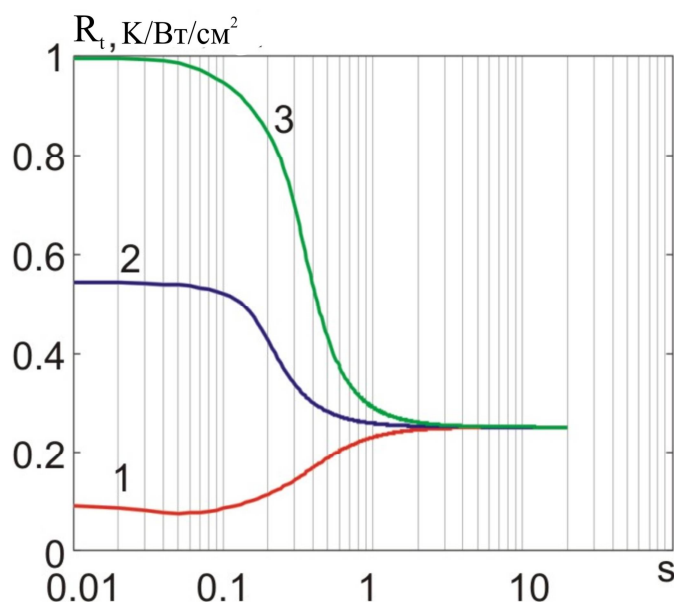


Рис. 4. Залежність теплового контактного опору пари телурид вісмуту-нікель за  $d_0 = 150$  мкм від значення  $s$  за значень  $a$  рівних: 1) 0.928; 2) 0.5; 3) 0.072

З рисунків видно, що поведінка теплового контактного опору як функції  $s$  є цілком аналогічною до поведінки електричного контактного опору внаслідок аналогії між переносом тепла і заряду. Найменше значення теплового контактного опору за розглянутих умов дорівнює, а асимптотичні значення за товщин перехідних шарів 20 та 150 мкм відповідно дорівнюють 0.033 та 0.251 К·см<sup>2</sup>/Вт.

ТермоЕРС контактного шару знаходиться як ЕРС паралельно з'єднаних елементарних брусків, кожному з яких притаманні свої ЕРС та внутрішній опір, зумовлені співвідношенням довжин «металевої» та «напівпровідникової» частин кожного з них. Враховуючи це, знайдемо спочатку термоЕРС елементарного бруска. За означенням ця термоЕРС дорівнює відношенню перепаду термоелектричної напруги на бруску до перепаду температури на ньому. Отже, спочатку треба знайти розподіл температури в елементарному бруску. З цією метою запишемо стаціонарне рівняння теплопровідності за відсутності зовнішніх джерел тепла для одновимірного випадку. Воно матиме вигляд:

$$\frac{d}{dy} \left( \kappa \frac{dT}{dy} \right) = 0, \quad (7)$$

де  $\kappa$  – залежна від координати теплопровідність матеріалу бруска. Загальний розв'язок даного рівняння такий:

$$T = C_1 \int \frac{dy}{\kappa} + C_2, \quad (8)$$

де  $C_1, C_2$  – довільні константи, які можуть бути знайдені з початкових умов. Тому термоЕРС елементарного бруска дорівнює:

$$\alpha_b = \frac{\int_0^{d_0} \alpha dT}{\int_0^{d_0} dT} = \frac{\int_0^{d_0} (\alpha/\kappa) dy}{\int_0^{d_0} (1/\kappa) dy} = \frac{(\alpha_m/\kappa_m)x + (\alpha_s/\kappa_s)(1-x)}{(1/\kappa_m)x + (1/\kappa_s)(1-x)}, \quad (9)$$

де  $\alpha_m, \alpha_s, \kappa_m, \kappa_s$  – термоЕРС та теплопровідності металу та ТЕМ відповідно.

Отже, загальна термоЕРС перехідного шару, зумовленого шорсткістю поверхні, дорівнює:

$$\alpha_c = \frac{\int_0^1 [\rho_m x + \rho_s (1-x)]^{-1} [(\alpha_m/\kappa_m)x + (\alpha_s/\kappa_s)(1-x)] [(1/\kappa_m)x + (1/\kappa_s)(1-x)]^{-1} f(x) dx}{\int_0^1 [\rho_m x + \rho_s (1-x)]^{-1} f(x) dx}. \quad (10)$$

Результати розрахунку термоЕРС пари телурид вісмуту-нікель наведено на рис. 5.

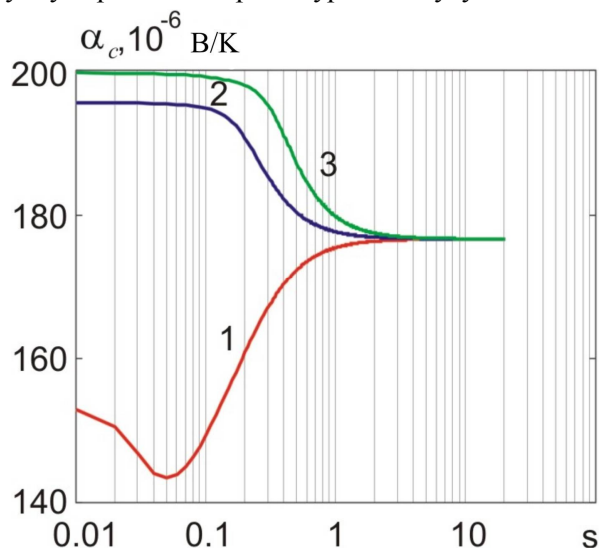


Рис. 5. Залежність термоЕРС пари телурид вісмуту-нікель за  $d_0 = 150$  мкм від значення  $s$  за значень  $a$  рівних: 1) 0.928; 2) 0.5; 3) 0.072

З рисунка видно, що термоЕРС пари телурид вісмуту-нікель якісно залежить від величини  $s$  за різних  $a$  так само, як і електричний та тепловий контактні опори. Ця схожість зумовлена тим, що внаслідок малої теплопровідності ТЕМ у порівнянні з металом за інших рівних умов основна частка перепаду температури на елементарному бруску припадає на його напівпровідникову частину. Найменше значення термоЕРС у даному випадку складає близько 145 мкВ/К, а її асимптотичне значення, яке відповідає рівномірному розподілові «западин» та «горбів», дорівнює 176 мкВ/К. Випадок «короткого замикання», коли перехідний шар цілком складається з металу, у даній статті не розглядається.

## Висновки

1. Встановлено, що електричний контактний опір перехідного шару «ТЕМ-метал», зумовлений відхиленням поверхні напівпровідника від ідеальної площини, для пари «нікель-телурид вісмуту» за товщини перехідного шару 20 мкм становить  $5 \cdot 10^{-7}$ , а за товщини 150 мкм –  $3.8 \cdot 10^{-6}$  Ом·см<sup>2</sup> за умови рівномірного розподілу «западин» та «горбів» у межах шару.

2. Встановлено, що тепловий контактний опір перехідного шару «ТЕМ-метал», зумовлений відхиленням поверхні напівпровідника від ідеальної площини, для пари «нікель-телурид вісмуту» за товщини перехідного шару 20мкм становить, 0.033 а за товщини 150мкм – 0.251 К·см<sup>2</sup>/Вт за умови рівномірного розподілу «западин» та «горбів» у межах шару.
3. Встановлено, що термоЕРС перехідного контактного шару «нікель-телурид вісмуту р-типу», зумовлена шорсткістю поверхні напівпровідника, не залежить від товщини контактного шару і становить 176мкВ/К.
4. Оскільки значення контактного опору, яке доводиться «призначати» з метою узгодження реальних та розрахункових значень параметрів термоелектричних модулів, на порядок більше за наведене у даній статті, то це свідчить по-перше про те, що основна частина контактного опору не зумовлена шорсткістю поверхні напівпровідника, по-друге – про те, що існують резерви зменшення контактного опору. Однак для їх виявлення і використання необхідні подальші поглиблені теоретичні та експериментальні дослідження механізмів формування контактного опору.

### Література

1. Anatyshuk L.I. Contact resistance between metal and thermoelectric material / Anatyshuk L.I., Dugaev V.K., Litvinov V.I., Volkov V.L. // Journal of Thermoelectricity. – 1994. – No 1. – P.70-77.
2. Da Silva L.W., Kaviany M. Micro-thermoelectric cooler: interfacial effects on thermal and electrical transport. // Int. Journ of Heat and Mass Transfer. – 2004, vol.478 – P.2417-2435.
3. Вихор Л.М. Електричний опір контакту термоелектричний матеріал-метал / Вихор Л.М., Горський П.В. // Термоелектрика – 2015, №2, с.16-24.
4. Вихор Л.М. Перенос тепла й електричного заряду на границі «термоелектричний матеріал-метал» / Вихор Л.М., Горський П.В. // Термоелектрика. – 2015. – №6. – С.5-15.
5. Алиева Т.Д., Абдинов Д.Ш., Салаев Э.Ю. Влияние обработки поверхностей термоэлектрических материалов на свойства термоэлементов, изготовленных из твердых растворов Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> – Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> и Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> – Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1981. –Т.17. – №10. – С.1773-1776.
6. 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).
7. D. Ilzyser, A. Sher, M. Shilon. Electrical contacts to thermoelectric bismuth telluride based alloys/ D. Ilzyser, A. Sher, M. Shilon // Third international conf. on thermoelectric energy conversion. – March 12-14, 1980. – P.200-202.
8. Белоногов Е.К. Модификация поверхности термоэлектрических ветвей на основе твердого раствора Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> – Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> методом импульсной фотонной обработки / Белоногов Е.К., Дыбов В.А., Костюченко А.В. и др. // Конденсированные среды и межфазные границы – 2017. – Т.19. – №4. – С.479-488.
9. 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.
10. Хольм Р. Электрические контакты. / Р. Хольм. – М.: Иностран. лит., 1981.– 464 с.

Надійшла до редакції 24.08.2018

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

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

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

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ТЕПЛООВОГО КОНТАКТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ТЕРМОЭДС ПЕРЕХОДНОГО КОНТАКТНОГО СЛОЯ, ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ-МЕТАЛЛ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НЕПЛОСКОСТНОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА

*Теоретически исследовано влияние шероховатости поверхности полупроводника на электрическое и тепловое контактные сопротивления и термоЭДС переходного контактного слоя «термоэлектрический материал-металл». Распределение «впадин» и «горбов» на шероховатой поверхности моделируется «усеченным распределением Гаусса». Исследовано влияние параметров распределения на электрическое и тепловое контактное сопротивление и термоЭДС контакта «термоэлектрический материал-металл». Конкретные численные расчеты и построение графиков выполнены для случая контакта теллурида висмута с никелем. Оказалось, что электрическое и тепловое контактные сопротивления и термоЭДС при малых среднеквадратичных отклонениях высоты профиля немонотонно зависят от средней высоты профиля, но с приближением распределения «впадин» и «горбов» к равномерному стремятся к определенным асимптотическим значениям. При этом как тепловое и электрическое контактные сопротивления, так и термоЭДС, по мере приближения распределения «впадин» и «горбов» к равномерному возрастают при больших относительных значениях средней высоты профиля и уменьшаются при малых ее значениях. Библ. 10, Рис. 5.*

**Ключевые слова:** электрическое контактное сопротивление, термоЭДС, шероховатость поверхности, переходной слой, элементарные бруски, среднее значение, среднеквадратичное отклонение.

P. V. Gorskiy, Doctor fiz.-mat. science<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: anatykh@gmail.com;

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

## IMATION OF THE ELECTRICAL AND THERMAL CONTACT RESISTANCES AND THERMOEMF OF “THERMOELECTRIC MATERIAL-METAL” TRANSIENT CONTACT LAYER DUE TO SEMICONDUCTOR SURFACE ROUGHNESS



*The impact of semiconductor surface roughness on the electrical and thermal contact resistances and thermoEMF of “thermoelectric material (TEM)-metal” transient contact layer is studied theoretically. The distribution of “hollows” and “humps” on the rough surface is simulated by the “truncated Gaussian distribution”. The impact of distribution parameters on the electrical contact resistance and thermoEMF of “thermoelectric material-metal” contact is studied. Specific numerical calculations and plotting is made for the case of bismuth telluride-nickel contact. It turned out that the electrical and thermal contact resistances and thermoEMF at low root-mean-square deviations of profile height nonmonotonically depend on the average profile height, however, as the distribution of “hollows” and “humps” approaches the uniform, they tend to certain asymptotic values. In so doing, both the thermal and electrical contact resistances and thermoEMF increase at high relative values of the average profile height and decrease at its low values. Bibl. 10, Fig. 5.*

**Key words:** electrical contact resistance, thermoEMF, surface roughness, transient layer, elementary bars, average value, root-mean-square deviation.

## References

1. Anatyshuk L.I., Dugaev V.K., Litvinov V.I., Volkov V.L. (1994). Contact resistance between metal and thermoelectric material. *J. Thermoelectricity*, 1, 70-77.
2. Da Silva L.W., Kaviany M. (2004). Micro-thermoelectric cooler: interfacial effects on thermal and electrical transport. *Int. Journ of Heat and Mass Transfer*, 478, 2417-2435.
3. Vikhor L.M., Gorskiy P.V. (2015). Electrical resistance of “thermoelectric material-metal” contact. *J. Thermoelectricity*, 2, 16-24.
4. Vikhor L.M., Gorskiy P.V. (2015). Heat and charge transport at “thermoelectric material-metal” boundary. *J. Thermoelectricity*, 6, 5-15.
5. Alieva T.D., Abdinov D.Sh., Salaev E.Yu. (1981). Vlianiie obrabotki poverkhnoctei termoelektricheskikh materialov na svoistva termoelementov izgotovlennykh iz tverdykh rastvorov  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$  i  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$  [The influence of processing of thermoelectric material surfaces on the properties of thermoelements made of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$  and  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$  solid solutions]. *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Neorganicheskiie materialy – Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Inorganic Materials*, 17(10), 1773-1776 [in Russian].
6. Gupta R.P., McCarty R., Sharp J. (2013). Practical contact resistance measurement method for bulk  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -based thermoelectric devices. *J. of Electron. Mat.*, 1-5 (doi: 10.10007/s11664-013-2806-6).
7. Ilzyser D., Sher A., Shilon M. (1980). Electrical contacts to thermoelectric bismuth telluride based alloys. Proc of Third International Conf. on Thermoelectric Energy Conversion (March 12-14, 1980), 200-202.
8. Belonogov E.K., Dybov V.A., Kostiuchenko A.V. et al. (2017). Modification of surface of thermoelectric legs based on  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$  solid solution by pulse phonon treatment method. *Condensed Matter and Interphases*, 19(4), 479-488.
9. 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.
10. Holm R. (1981). Elektricheskiie kontakty [Electrical contacts]. Moscow: Inostrannaia literatura [Russian transl].

Submitted 24.08.2018