Влияние контактных сопротивлений на выходные характеристики термоэлектрического генератора

В.В. Лобода, А.О. Галицкая

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

vera_loboda@spbstu.ru

Аннотация—В статье представлен метод расчета и результаты исследования влияния контактных сопротивлений на границе металл-полупроводник на выходную мощность гибкого микротермоэлектрического генератора. Расчеты проводились с использованием программной платформы ANSYS Workbench и WolframMathematica. Установлено, что контактные сопротивления уменьшают выходную мощность термоэлектрического устройства на 67-70%.

Ключевые слова— термоэлектрический генератор, контактные сопротивления, термоэлемент, моделирование, ANSYS.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует множество источников питания для маломощных применений, однако остро стоит вопрос о разработке альтернативных вариантов источников, для обеспечения надежного и устойчивого питания микроэлектронных устройств, таких как беспроводные сенсорные сети, интеллектуальные дома, мониторинг состояния объектов и мобильные устройства [1],[2]. В последние несколько десятилетий большинство исследований в области термоэлектрических генераторов (ТЭГ) было сосредоточено на неорганических термоэлектрических материалах, объемных и тонкопленочных, и, соответствующих устройствах [3],[4]. Одним из перспективных видов ТЭГ, сочетающих свойства неорганических тонкопленочных полупроводниковых материалов и органической основы, являются гибкие микротермоэлектрические генераторы [5]-[8]. Разработка любого типа ТЭГ требует учета влияния множества факторов связанных с сочетанием различных материалов, основным из которых является наличие электрических и тепловых контактных сопротивлений. Множество исследовательских работ посвящены вопросу влияния сопротивлений на границах контакта металл-полупроводник [9]-[18]. Используются как теоретические, так и экспериментальные методы определения величин сопротивлений. Разброс значений из литературных источников для электрических контактных сопротивлений: 10^{-14} - 10^{-7} Ом*м² для тепловых контактных сопротивлений: 10^{-10} - 10^{-6} К / (Вт / м²). По результатам анализа можно сделать вывод, что

применение того или иного метода расчета или измерения контактных сопротивлений напрямую зависит от технологии синтеза полупроводниковых материалов и конструкции устройства в целом.

Целью данной работы является расчет контактных сопротивлений на границе металл-полупроводник и исследование их влияния на выходные характеристики гибкого микротермоэлектрического генератора.

II. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

В качестве объекта исследования выбран гибкий микротермоэлектрический генератор Y-структуры [19],[20], состоящий из чередующихся двадцати четырех *n*- и *p*-термоэлементов (ТЭ) на основе твердых растворов Bi₂Te₃ и Sb₂Te₃, между которыми расположены контактные проводники. На рис. 1 представлена геометрическая 3D модель гибкого ТЭГ. Термоэлементы имеют размеры 800 мм × 600 мм × 100 мм, а металлические соединения 600 мм × 600 мм × 300 мм. Остальное пространство заполнено PDMS подложкой, общая площадь поверхности устройства составила 26,04 мм².

Рис. 1. Геометрическая 3D модель микротермоэлектрического генератора Y-структуры

Полное внутреннее электрическое сопротивление ТЭГ можно представить в виде суммы последовательно соединенных резисторов:

$$R_{\text{вн}} = \sum_{i=1}^{2N} R_{n,p} + \sum_{i=1}^N R_{\text{me}} + R_{\text{cont}}$$

где $R_{(n,p)}$ – сопротивление ТЭ; R_{me} – сопротивление металла; R_{cont} – контактное сопротивление.

Внутреннее сопротивление генератора и, следовательно, максимальная выходная мощность зависят от величины контактных сопротивлений [21].

Область контакта проводника (металла) и термоэлектрического материала (полупроводника) характеризуется несоответствием объемных свойств и неровностями в тонкой области вблизи границы. Различные тепловые и электрические носители сталкиваются с различными сопротивлениями в этой области раздела, что приводит к уменьшению выходной мощности устройства. Полное граничное тепловое сопротивление представляет цепь из параллельно соединенных сопротивлений, $(A_k R_k)_b$ определяется как [9]:

$$\frac{1}{(A_k R_k)_b} = \frac{1}{(A_k R_k)_{b,pp}} + \frac{1}{(A_k R_k)_{b,ee}} + \frac{1}{(A_k R_k)_{b,ep}} + \frac{1}{(A_k R_k)_{b,pe}} \quad (1)$$

где A_k – площадь поперечного сечения ТЭ; R_k – тепловое сопротивление; $(A_k R_k)_{b,pp}$ – фононное сопротивление; $(A_k R_k)_{b,ee}$ – сопротивление электронов; $(A_k R_k)_{b,ep}$, $(A_k R_k)_{b,pe}$ – электрон-фононное сопротивление. Предполагается, что нет прямой теплопередачи между электронной и фононной подсистемами через границу.

Для расчётов сопротивлений фононов используется модель диффузного рассогласования [9], в которой предполагается, что все фононы, падающие на границу, будут рассеиваться.

Граничное сопротивление фононов можно рассчитать по формуле:

$$\frac{1}{(A_k R_k)_{b,pp}} = \frac{T_{te} - T_{mc}}{q} \quad (2)$$

где q – тепловой поток, вызванный увеличением температуры пленки полупроводника T_{te} относительно температуры подложки T_{mc} .

Начиная с общего выражения для энергии, переносимой в единицу времени от полупроводника к металлу, и предполагая, что коэффициент передачи не зависит от температуры на любой стороне границы раздела (рассматривается только одна сторона границы) можно представить выражение для теплового потока как функцию фононной плотности состояний:

$$q = \frac{h_p \tau_{te \rightarrow mc}}{8\pi} \sum_j U_{p(te,j)} \int_0^\infty P_{p,D}(\omega_p) \omega_p \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{h_p \omega_p}{2\pi k_B T_{te}}\right)} - \frac{1}{\exp\left(\frac{h_p \omega_p}{2\pi k_B T_{mc}}\right)} \right] d\omega_p \quad (3)$$

где h_p – постоянная Планка; $\tau_{te \rightarrow mc}$ – коэффициент передачи тепла; $U_{p(te,j)}$ – скорости фононных мод в полупроводнике; $P_{p,D}$ – плотность фононных состояний; ω_p – угловая частота; k_B – константа Больцмана.

Скорости фононных волн (две поперечные и одна продольная) рассчитываются по формуле:

$$\sum_j \frac{1}{U_{p(te,j)}} = \frac{1}{U_{p(te,l)}} + \frac{2}{U_{p(te,t)}} \quad (4)$$

Коэффициент передачи аппроксимируется по формуле:

$$\tau_{te \rightarrow mc} = \frac{\sum_j u_{p(mc,j)}^{-2}}{\sum_j u_{p(te,j)}^{-2} + u_{p(mc,j)}^{-2}} \quad (5)$$

Выражение (5) выведено для случая, когда T_{te} равно T_{mc} , т.е. уравнение даст адекватный прогноз коэффициента передачи для малого $T_{te} - T_{mc}$. Обычно эта разница составляет примерно 1 K, что и будет использовано при расчётах.

Скорость фонона и температура Дебая связаны с угловой частотой Дебая ω_D через выражения:

$$\omega_D = (6\pi^2 u_p^3 n)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$T_D = \frac{h_p \omega_D}{2\pi k_B} \quad (7)$$

где n – отношение количества примитивных ячеек к объему элементарной ячейки. Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 имеют непримитивные гексагональные элементарные ячейки, в три раза превышающие объем примитивной ромбоэдрической ячейки [1].

Дебаевская плотность фононных состояний определяется как:

$$P_{p,D} = \frac{\omega_p^2}{2\pi^2 u_p^3} \quad (8)$$

Граничное сопротивление электронов определялось по формуле:

$$\frac{1}{(A_k R_k)_{b,ee}} = \frac{\pi^2}{3} \frac{T}{(A_k R_e)_b} \left(\frac{k_B}{e c} \right)^2 \quad (9)$$

где $(A_k R_e)_b$ – электрическое граничное сопротивление:

$$\frac{1}{(A_k R_e)_b} = \frac{4\pi e^2 m_{e,te} P}{h_p^3} \left[\frac{h_p^2 E_0}{8\pi^2 m_{e,te} d^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

где $m_{e,te}$ – эффективная масса электронов/дырок в термоэлектрическом материале; e – заряд электрона; P – вероятность туннелирования; E_0 – высота потенциального барьера, d – толщина потенциального барьера.

Электрическое сопротивление контакта рассчитывается по формуле:

$$R_{e,c} = \frac{4N_{te}(A_k R_e)_c}{A_k} \quad (11)$$

где N_{te} – количество термоэлементов.

В таблице 1 приведены численные значения параметров для расчёта тепловых контактных сопротивлений.

Расчет контактных сопротивлений по формулам (1-11) проводился в пакете WolframMathematica, результаты расчётов при $T_{te} = 300$ K, представлены в таблице 2. Решение задачи определения влияния контактных сопротивлений ТЭ на выходную мощность проводится на основе метода конечных элементов с

применением расчетной платформы ANSYS Workbench.

Таблица 1

Свойства термоэлектрических элементов

Параметр	Bi_2Te_3	Sb_2Te_3
$n, м^{-3}$	$5,95 \cdot 10^{27}$	$6,40 \cdot 10^{27}$
$\omega_D, рад \cdot с^{-1}$	$2,16 \cdot 10^{13}$	$2,09 \cdot 10^{13}$
$u_p, м \cdot с^{-1}$	3,058	2,888
$\tau_{te \rightarrow mc}$	0,56	0,54
$\tau_m, с$	$2,5 \cdot 10^{-14}$	$9,8 \cdot 10^{-14}$
$\tau_e, с$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$
$m_{e,te}$	$0,58 m_{e,0}$	$1 m_{e,0}$
$E_0, эВ$	0,15	0,2
d, nm	2,06	2,12

Таблица 2

Результаты расчетов контактных сопротивлений

Граничные тепловые сопротивления	$Bi_2Te_3/Металл, К/(Вт/м^2)$	$Sb_2Te_3/Металл, К/(Вт/м^2)$
Фононное (2),	$8,7 \cdot 10^{-8}$	$7,6 \cdot 10^{-11}$
Электронное (9)	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$9,7 \cdot 10^{-7}$
Полное (1)	$6,9 \cdot 10^{-8}$	$7,0 \cdot 10^{-8}$
Электрические сопротивления	$Bi_2Te_3/Металл, (Ом \cdot м^2)$	$Sb_2Te_3/Металл, (Ом \cdot м^2)$
<i>Cu</i>	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$
<i>Au</i>	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
<i>Ti</i>	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$4,1 \cdot 10^{-8}$

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведено моделирование выходных параметров гибкого микротермоэлектрического генератора для трех различных металлов (*Cu*, *Au*, *Ti*) контактов с учетом и без учета контактных сопротивлений. Методика моделирования подробно описана в [22],[23].

В качестве материалов для термоэлементов микро-ТЭГ использованы теллуриды висмута и сурьмы *n*-типа и *p*-типа проводимости, как обеспечивающие максимальную термоэлектрическую эффективность в рассматриваемом диапазоне температур. Исходные данные для моделирования включают следующие физические параметры: коэффициент Зеебека, удельное электрическое сопротивление, удельную теплопроводность. Данные параметры во многом зависят от технологии изготовления и имеют существенный разброс. В этой связи в качестве исходных данных были использованы результаты оценки параметров этих методом наименьших квадратов [24]. Параметры материалов подложки и металлов были выбраны из библиотеки ANSYS. В табл. 3 приведены значения физических параметров материалов составных частей гибкого ТЭГ, использованные при моделировании в диапазоне температур 300-400 К.

Температурные граничные условия определялись температурой нижней подложки T_h и температурой верхней подложки T_c . Рассмотрены следующие значения температур: $T_h=318 К, 310 К, 303 К, T_c=283 К, 288 К, 278 К$. Данные температуры соответствуют разнице температур горячей и холодной сторон $\Delta T=22 К, 25 К, 30 К$ и $35 К$ соответственно.

Результатом моделирования являются значения выходной мощности ТЭГ на внешней нагрузке. Моделирование проводилось с учетом и без учета рассчитанных контактных сопротивлений при значениях внешней нагрузки в диапазоне от 0,5 до 30 Ом. Результаты расчета представлены на рисунках 2, 3 и табл. 4.

Таблица 3

Физические параметры материалов составных частей гибкого ТЭГ

T, K	Коэфф. Зеебека, $\mu V \cdot K^{-1}$	удельное сопротивление, $\mu \Omega \cdot m$	удельная теплопроводность, $W/m \cdot K$
полупроводниковый материал <i>n</i> -типа (Bi_2Te_3)			
300	-148,24	12,02	1,03
350	-152,59	13,48	1,11
400	-156,89	15,05	1,18
полупроводниковый материал <i>p</i> -типа (Sb_2Te_3)			
300	208,25	13,33	1,07
350	220,21	16,78	1,06
400	219,52	19,74	1,13
Контактные площадки (<i>Cu</i>)			
300	-	0,017	406
Контактные площадки (<i>Au</i>)			
300	-	0,022	317
Контактные площадки (<i>Ti</i>)			
300	-	0,500	18
Подложка (PDMS)			
300	-	-	0,15

Таблица 4

Максимальная выходная мощность ТЭГ для различных металлов с учетом и без учета рассчитанных контактных сопротивлений

Металл	Без учёта контактных сопротивлений		С учётом контактных сопротивлений		$\Delta, \%$
	$P_{max}, мкВт$	$P_{max}/S, мкВт/м^2$	$P_{max}, мкВт$	$P_{max}/S, мкВт/м^2$	
<i>Cu</i>	53,8	2,1	19,3	0,7	64
<i>Au</i>	53,8	2,1	19,3	0,7	64
<i>Ti</i>	53,8	2,1	16,3	0,6	70

Рис. 2. Зависимость удельной выходной мощности ТЭГ от тока для меди, золота и титана (а) без учета контактных сопротивлений, (б) с учетом контактных сопротивлений

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- контактные электрические и тепловые сопротивления достаточно сильно влияют на выходные характеристики устройства, уменьшают выходную мощность термоэлектрического устройства на 67-70% в зависимости от типа металла контактной пары металл-полупроводник;
- наибольший вклад в уменьшение выходной мощности после введения контактных сопротивлений на границе металл/полупроводник вносит электрическое контактное сопротивление;

- величина электрического контактного сопротивления увеличивается в ряду Cu, Au, Ti;
- величины теплового контактного сопротивления зависят от типа термоэлектрического полупроводникового материала и не зависят выбора металла контактной пары.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты расчетов контактных сопротивлений соответствуют экспериментальным измерениям [14,17], что позволяет сделать вывод, о применимости данной методики расчета электрических

и тепловых контактных сопротивлений в случае микроэлектронного синтеза термоэлектрических материалов. Моделирование выходной мощности проведено с учетом влияния контактных электрических и тепловых на границе раздела «металл-полупроводник» для шести контактных пар (три металла, два полупроводника). Показано, что учет контактных сопротивлений значительно уменьшает выходную мощность. Представленные особенности модели позволяют не только определить оптимальные контактные пары, но и значение внутреннего сопротивления, что в свою очередь, дает возможность разрабатывать микроэлектронные термоэлектрические устройства с учетом условий эксплуатации по потребляемой мощности при известных сопротивлениях внешней нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 140. P.167–181.
- [2] R. Rodriguez; M. Preindl; J. S. Cotton; A. Emadi, “Review and Trends of Thermoelectric Generator Heat Recovery in Automotive Applications,” *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 68, issue 6, pp. 5366 – 5378, June 2019.
- [3] Jiabin Yan, Xiaoping Liao, Deyang Yan, Youguo Chen, “Review of Micro Thermoelectric Generator,” *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 27, issue 1, pp. 1 – 18, Feb. 2018.
- [4] S. M. Pourkiaei, M. H. Ahmadi, M. Sadeghzadeh, S. Moosavia, F. Pourfayaz, L. Chen, M. A. P. Yazdi, R. Kumar, “Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials,” *Energy*, 186, 115849, pp.1-17, 2019.
- [5] Deng F., Qiu H., Chen J., Wang L., Wang B. Wearable Thermoelectric Power Generators Combined With Flexible Supercapacitor for Low-Power Human Diagnosis Devices // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. February 2017. V. 64. № 2. pp. 1477–1485.
- [6] Du Y., Xu J., Paul B., Eklund P. Flexible thermoelectric materials and devices // *J. Applied Materials Today*. 2018. 12. pp. 366–388.
- [7] Wang Y., Yang L., Shi X., Shi X., Chen L., Dargusch M.S., Zou J., Chen Z. Flexible Thermoelectric Materials and Generators: Challenges and Innovations // *J. Advanced Materials* — 2019. — 31 — 1807916.
- [8] Коротков А.С., Лобода В.В., Дзюбаненко С.В., Бакулин Е.М. Термоэлектрический генератор для устройств мониторинга состояния человека // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2018. Вып. 4. С. 57-62. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-57-62
- [9] Da Silva L.W., Kaviani M. Micro-thermoelectric cooler: interfacial effects on thermal and electrical transport // *J. International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2004. — 47. — P. 2417–2435.
- [10] Kim C.H. Development of a numerical method for the performance analysis of thermoelectric generators with thermal and electric contact resistance // *J. Applied Thermal Engineering*. — 2018. — 108. — P. 408-417.
- [11] Chen B., Kruse M., Xu B., Tutika R., Zheng W., Bartlett M.D., Wu Y., Claussen J.C. Flexible thermoelectric generators with inkjet-printed bismuth telluride nanowires and liquid metal contacts // *J. Nanoscale*. — 2019. — 11. — P. 5222-5230.
- [12] Luo Y., Kim C.H. Effects of the cross - sectional area ratios and contact resistance on the performance of a cascaded thermoelectric generator // *J. International Journal of Energy Research*. — 2019. — 43 N.3. — P. 572 - 596.
- [13] Ащеулов А.А., Добровольский Ю.Г., Романюк И.С., Фотий В.Д. Переходные контакты ветвей ТЭМ повышенной прочности на основе кристаллов твердых растворов Bi—Te—Se—Sb // *Ж. Прикладная физика*— 2018. — 1 — С. 88-88.
- [14] Lahmar A., Nguyenb T.P., Sakamia D., Oraina, Scudeller Y., Danesa F. Experimental investigation on the thermal contact resistance between gold coating and ceramic substrates // *J. Thin Solid Film* - 2001. - 389 - P. 167-172.
- [15] Sim M., Park H., Kim S. Modeling and Extraction of Parasitic Thermal Conductance and Intrinsic Model Parameters of Thermoelectric Modules // *J. Journal of Electronic Materials*, — 2015. — 44 N.11 — P. 4473–4481.
- [16] Gao Y., Marconnet A.M., Panzer M.A., Leblanc S., Dogbe S., Ezzahri Y., Shakouri A., Goodson K.E. Nanostructured Interfaces for Thermoelectrics// *J. Journal of Electronic Materials* — 2010. — 39 — P. 1456–1462.
- [17] Gupta R.P., Mccarty R., Sharp J. Practical Contact Resistance Measurement Method for Bulk Bi₂Te₃-Based Thermoelectric Devices // *J. Journal of Electronic Materials* — 2014. — 43 N.6 — P. 1608–1612.
- [18] Hodes M. Optimal Design of Thermoelectric Refrigerators Embedded in a Thermal Resistance Network//*J. IEEE Transactions on Components, Packaging And Manufacturing Technology* - 2012. - 2 N.3 - P. 483– 495.
- [19] Nguyen H.T., Nguyen V.T., Takahito O. Flexible thermoelectric power generator with Y-type structure using electrochemical deposition process // *Applied Energy*. 15 January 2018. V. 210. P. 467–476.
- [20] Galitskaya A.O., Buslaev R.D. Simulation of flexible thermoelectric generators with different geometry // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1326 (2019) 012033.
- [21] Лобода В.В., Буслаев Р.Д. Влияние линейных размеров термоэлемента на выходные характеристики термоэлектрического генератора // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2020. Вып. 3. С. 230-236. doi:10.31114/2078-7707-2020-3-230-236
- [22] Лобода В.В., Коротков А.С. Моделирование и экспериментальное исследование термоэлектрических генераторов // *Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника*. №1(161). 2016. с.53-57.
- [23] Коротков А.С., Лобода В.В. Моделирование термоэлектрического генератора на основе МЭМС технологии // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. 2016. № 4. С. 71-76
- [24] Korotkov A.S., Loboda V.V., Dzyubanenکو S.V., and Bakulin E.M. Design of a Thin-Film Thermoelectric Generator for Low-Power Applications // *Russian Microelectronics*, 2019, Vol. 48, No. 5, pp. 326–334.

The Influence of Contact Resistances on Thermoelectric Generator Output Characteristics

V.V. Loboda, A.O. Galitskaya

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

vera_loboda@spbstu.ru

Abstract — The article explains the calculation method and presents the results of the influence of contact resistances of the metal-semiconductor interface on the output power of a flexible microthermoelectric generator. The calculations were carried out using the software platform ANSYS Workbench and Wolfram Mathematica.

Today, there are multiple power sources for low energy consumption applications, but there arises a desire to design improved alternative sources, and provide reliable and stable power supplies for micro electronic devices such as wireless sensor networks, smart homes, objects monitoring and mobile devices. Lately, the majority of research on thermoelectric generators (TEG) has focused on inorganic thermoelectric materials, volume and thin film ones and corresponding devices. One of the most promising TEGs that combine properties of inorganic thin film semiconductor materials and an organic base is flexible microthermoelectric generators. The design of any type of a TEG requires considering multiple factors related to the combination of different materials, the main of which are electric and thermal contact resistances. A number of research studies focuses on the influence of resistances on ‘metal-semiconductor’ border. Both theoretical and experimental methods to measure resistances values are used. The values from the references range for electric contact resistances: 10^{-14} - 10^{-7} Ohm·m², for thermal contact resistances: 10^{-10} - 10^{-6} K / (W / m²). It may be concluded from the analysis results that application of this or that calculation method or measurements of contact resistances depend directly on synthesis technology of semiconductor materials and device structure on the whole.

The research aims at calculating contact resistances on the ‘metal-semiconductor’ border and understanding their influence on output characteristics of a flexible microthermoelectric generator.

The flexible microthermoelectric generator of Y-structure consisting of twenty four intermittent *n*- and *p*-thermal elements (TE) based on solid solutions Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ between which the contact conductors are placed, has become the research focus.

The simulation of output parameters of a flexible microthermoelectric generator for three different metals (Cu, Au, Ti) and contacts with/without taking into account contact resistances was carried out.

The following results have been achieved:

- contact electric and thermal resistances influence output characteristics of devices, and reduce output power of a thermoelectric device by 67-70% depending on metal type of the ‘metal-semiconductor’ contact couple;

- electric contact resistance contributes most to decreasing the output power after introducing contact resistances on the ‘metal-semiconductor’ border;
- the value of electric contact resistance increases in the row of Cu, Au and Ti;
- the values of thermal contact resistance depend on the material type of thermoelectric semiconductor and do not depend on the choice of a metal for a contact couple.

The presented calculation results of contact resistances correlate with the experimental measurements, thus allowing us to conclude that such a calculation method of electric and thermal contact resistances can be used in case of microelectronic synthesis of thermoelectric materials. Output power simulation has been carried out by taking into account contact electric and thermal influence on the ‘metal-semiconductor’ border for six contact couples (three metals, two semiconductors). It has been proven that taking into account contact resistances significantly decreases output power. The described model peculiarities allow not only to define the optimal contact couples, but also the internal resistance, that in its turn, allows designing microelectronic thermoelectric devices and take into account operation conditions of consumed energy with known resistances of internal load.

Keywords — thermoelectric generator, contact resistances, thermoelement, simulation, ANSYS, output power.

REFERENCES

- [1] Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications // Energy Conversion and Management. 2017. V. 140. P.167–181.
- [2] R. Rodriguez; M. Preindl; J. S. Cotton; A. Emadi, “Review and Trends of Thermoelectric Generator Heat Recovery in Automotive Applications,” IEEE Trans. Vehicular Tech., vol. 68, issue 6, pp. 5366 – 5378, June 2019.
- [3] Jiabin Yan, Xiaoping Liao, Deyang Yan, Youguo Chen, “Review of Micro Thermoelectric Generator,” J. Microelectromechanical Syst., vol. 27, issue 1, pp. 1 – 18, Feb. 2018.
- [4] S. M. Pourkiaei, M. H. Ahmadi, M. Sadeghzadeh, S. Moosavia, F. Pourfayaz, L. Chen, M. A. P. Yazdi, R. Kumar, “Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials,” Energy, 186, 115849, pp.1-17, 2019.
- [5] Deng F., Qiu H., Chen J., Wang L., Wang B. Wearable Thermoelectric Power Generators Combined With Flexible Supercapacitor for Low-Power Human Diagnosis Devices // IEEE Transactions on Industrial Electronics. February 2017. V. 64. № 2. pp. 1477–1485.

- [6] Du Y., Xu J., Paul B., Eklund P. Flexible thermoelectric materials and devices // J. Applied Materials Today. 2018. 12. pp. 366–388.
- [7] Wang Y., Yang L., Shi X., Shi X., Chen L., Dargusch M.S., Zou J., Chen Z. Flexible Thermoelectric Materials and Generators: Challenges and Innovations // J. Advanced Materials — 2019. — 31 — 1807916.
- [8] Korotkov A.S., Loboda V.V., Dzyubanenko S.V., Bakulin E.M. Thermoelectric Generator for Human Body Monitoring Systems // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2018. Issue 4. P. 57-62. doi:10.31114/2078-7707-2018-4-57-62
- [9] Da Silva L.W., Kaviany M. Micro-thermoelectric cooler: interfacial effects on thermal and electrical transport // J. International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2004. — 47. — P. 2417–2435.
- [10] Kim C.H. Development of a numerical method for the performance analysis of thermoelectric generators with thermal and electric contact resistance // J. Applied Thermal Engineering. — 2018. — 108. — P. 408-417.
- [11] Chen B., Kruse M., Xu B., Tutika R., Zheng W., Bartlett M.D., Wu Y., Claussen J.C. Flexible thermoelectric generators with inkjet-printed bismuth telluride nanowires and liquid metal contacts // J. Nanoscale. — 2019. — 11. — P. 5222-5230.
- [12] Luo Y., Kim C.H. Effects of the cross - sectional area ratios and contact resistance on the performance of a cascaded thermoelectric generator // J. International Journal of Energy Research. — 2019. — 43 N.3. — P. 572 - 596.
- [13] Ashcheulov A.A., Dobrovolskiy Yu.G., Romanyuk I.S., Fotiy V.D. Transitional contacts of TEM branches of increased strength based on crystals of Bi–Te–Se–Sb solid solutions // Zh. Applied Physics – 2018. – 1 - pp. 88-88.
- [14] Lahmar A., Nguyenb T.P., Sakamia D., Oraina, Scudeller Y., Danesa F. Experimental investigation on the thermal contact resistance between gold coating and ceramic substrates //J. Thin Solid Film — 2001. — 389 — P. 167-172.
- [15] Sim M., Park H., Kim S. Modeling and Extraction of Parasitic Thermal Conductance and Intrinsic Model Parameters of Thermoelectric Modules //J. Journal of Electronic Materials, — 2015. — 44 N.11 — P. 4473–4481.
- [16] Gao Y., Marconnet A.M., Panzer M.A., Leblanc S., Dogbe S., Ezzahri Y., Shakouri A., Goodson K.E. Nanostructured Interfaces for Thermoelectrics// J. Journal of Electronic Materials — 2010. — 39 — P. 1456–1462.
- [17] Gupta R.P., Mccarty R., Sharp J. Practical Contact Resistance Measurement Method for Bulk Bi₂Te₃-Based Thermoelectric Devices // J. Journal of Electronic Materials — 2014. — 43 N.6 — P. 1608–1612.
- [18] Hodes M. Optimal Design of Thermoelectric Refrigerators Embedded in a Thermal Resistance Network//J. IEEE Transactions on Components, Packaging And Manufacturing Technology— 2012. — 2 N.3 — P. 483–495.
- [19] Nguyen H.T., Nguyen V.T., Takahito O. Flexible thermoelectric power generator with Y-type structure using electrochemical deposition process // Applied Energy. 15 January 2018. V. 210. P. 467–476.
- [20] Galitskaya A.O., Buslaev R.D. Simulation of flexible thermoelectric generators with different geometry // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1326 (2019) 012033.
- [21] Loboda V.V., Buslaev R.D. Thermoelement Linear Dimensions Influence on Output Characteristics of Thermoelectric Generator // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2020. Issue 3. P. 230-236. doi:10.31114/2078-7707-2020-3-230-236
- [22] Loboda V.V., Korotkov A.S. Simulations and Experimental Investigation of Thermoelectric Generators // Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics. №1(161) 2016. pp.53-57.
- [23] Korotkov A.S., Loboda V.V. Simulation of MEMS Technology Based Thermoelectric Generators // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2016. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2016. Part 4. P. 71-76.
- [24] Korotkov A.S., Loboda V.V., Dzyubanenko S.V., and Bakulin E.M. Design of a Thin-Film Thermoelectric Generator for Low-Power Applications // Russian Microelectronics, 2019, Vol. 48, No. 5, pp. 326–334.