

# Влияние линейных размеров термоэлемента на выходные характеристики термоэлектрического генератора

В.В. Лобода, Р.Д. Буслаев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

vera\_loboda@spbstu.ru

**Аннотация** — В статье представлены результаты исследования влияния линейных размеров термоэлементов (ТЭ) на выходную мощность микротермоэлектрического генератора. Оптимизационные расчеты проводились с использованием программной платформы ANSYS Workbench и генетического алгоритма. Установлено, что соотношение линейных размеров ТЭ не изменяется при изменении тепловых граничных условий. Зависимость максимальной мощности от соотношения линейных размеров имеет пологий максимум и можно выделить общий диапазон изменения линейных размеров, в котором мощность максимальна с отклонением  $\pm 3\%$ .

**Ключевые слова** — термоэлектрический генератор, метод конечных элементов, моделирование, оптимизация, ANSYS, выходная мощность.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Твердотельные термоэлектрические генераторы на основе эффекта Зеебека преобразуют тепловую энергию в электричество. В последние годы возник интерес к использованию микротермоэлектрических генераторов ( $\mu$ TEG) для обеспечения надежного и устойчивого питания маломощных микроэлектронных устройств, таких как беспроводные сенсорные сети, интеллектуальные дома, мониторинг состояния объектов и мобильные устройства [1-4].  $\mu$ TEG может быть интегрирован в различные поверхности источников тепла для передачи энергии, позволяет снизить затраты на техническое обслуживание и увеличить время работы устройства по сравнению с аккумулятором. Это особенно важно, когда традиционная батарея недоступна или устройство размещено в удаленной или агрессивной среде.

В последние десятилетия интенсивно развивается производство тонкопленочных ТЭГ с использованием электрохимических методов MEMS [5-7], MBE [8], CVD [9]. Тонкопленочный термоэлектрический генератор является компактным, имеет короткое время теплового отклика и высокую удельную электрическую мощность. Использование кремния в качестве основы, в связи с его совместимостью с процессами CMOS и MEMS [10,11], также является важным фактором в пользу  $\mu$ TEG.

Типичная длина термоэлемента генератора, выполненного по объемной полупроводниковой технологии, колеблется от 1 мм до 5 мм. Размер тонкопленочного

ТЭГ может быть уменьшен до менее 20 мкм [6]. Когда устройство уменьшено до микрометрового масштаба, факторы, которые влияют на производительность устройства, должны сильно отличаться от объемного термоэлектрического модуля.

Целью данной работы является исследование влияния линейных размеров термоэлементов, а именно отношения высоты термоэлемента к ширине, на выходную мощность микротермоэлектрического генератора на основе оптимизационных расчетов.

## II. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

В качестве объекта исследования выбран одиночный термоэлектрический генератор в микроэлектронном исполнении.  $\mu$ ТЭГ состоит из двух ТЭ  $n$  и  $p$ -типа, контактных площадок для коммутации ТЭ и подложки. На рис. 1 представлена геометрическая 3D модель одиночного  $\mu$ ТЭГа.

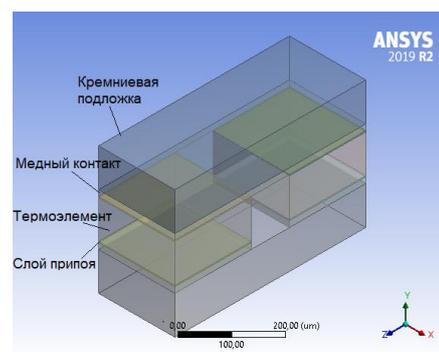


Рис. 1. Геометрическая 3D модель одиночного микротермоэлектрического генератора

Когда существует температурный градиент между сторонами термоэлектрического генератора, выходная мощность может быть выражена следующей формулой [12]:

$$P = U \cdot I = \frac{N \cdot \Delta T^2 \cdot (\alpha_p - \alpha_n)^2 \cdot R_H}{(R_H + R_{вн})^2},$$

где  $N$  – количество ТЭ,  $\Delta T$  – температурный градиент между горячей и холодной сторонами ТЭГ;  $\alpha_n$  и  $\alpha_p$  – коэффициенты Зеебека  $n$ - и  $p$ -полупроводниковых материалов, соответственно;  $R_H$  – сопротивление нагрузки;  $R_{вн}$  – внутренне сопротивление генератора.

Условием передачи максимума мощности в нагрузку является равенство значений внешней нагрузки и внутреннего сопротивления, таким образом:

$$P_{max} = \frac{N^2 \cdot \Delta T^2 \cdot (\alpha_p - \alpha_n)^2}{4 \cdot R_{вн}} \quad (1)$$

Внутренне сопротивление генератора складывается из сопротивлений его составных частей, таких как термоэлементы, контактные площадки и припой:

$$R_{вн} = \sum_{i=1}^N (R_n + R_p) + \sum_{i=1}^{2N} R_{конт} + \sum_{i=1}^{2N} R_{пр}, \quad (2)$$

где  $R_n$  и  $R_p$  – сопротивления  $n$  и  $p$  ТЭ;  $R_{конт}$  – сопротивление контактной площадки;  $R_{пр}$  – сопротивление припоя.

Сопротивления составных частей ТЭГ выражаются через удельные сопротивления материалов и линейные размеры этих частей:

$$R_{n,p} = \rho_{n,p} \cdot \frac{H}{L^2}, \quad (3)$$

где  $\rho_n, \rho_p$  – удельное сопротивление материалов ТЭ  $n$ - и  $p$ -типа, соответственно;  $H$  – высота ТЭ;  $L$  – ширина квадратного основания ТЭ.

$$R_{конт} = \rho_{конт} \cdot \frac{h}{L^2}, \quad (4)$$

где  $\rho_{конт}$  – удельное сопротивление материала контактной площадки;  $h$  – высота контактной площадки;  $L$  – ширина квадратного основания контактной площадки.

$$R_{пр} = \rho_{пр} \cdot \frac{h_1}{L^2}, \quad (5)$$

где  $\rho_{пр}$  – удельное сопротивление материала припоя;  $h_1$  – высота слоя припоя;  $L$  – ширина квадратного основания слоя припоя.

Подставляя формулы (3) – (5) в формулу (2), затем (2) в формулу (1), получим:

$$P_{max} = \frac{1}{4} \frac{N \cdot \Delta T^2 \cdot (\alpha_p - \alpha_n)^2}{(\rho_p - \rho_n) \frac{H}{L^2} + 2 \rho_{конт} \frac{h}{L^2} + 2 \rho_{пр} \frac{h_1}{L^2}}. \quad (6)$$

Таким образом, из формулы (6) следует, что внутреннее сопротивление генератора и, следовательно, максимальная выходная мощность зависят от линейных размеров составных частей ТЭГ, особенно ТЭ, ввиду существенной разницы в значениях удельных сопротивлений материалов полупроводников и металлов.

Решение задачи определения влияния линейных размеров ТЭ на выходную мощность проводится на основе метода конечных элементов с применением расчетной платформы ANSYS Workbench. Методология моделирования подробно изложена в работах [13-16]. Особенностью представленного моделирования является использование модуля DesignXplorer для решения задач одно- и многокритериальной параметрической оптимизации на основе планирования эксперимента, построения поверхности отклика, корреляционного анализа и оценки вероятности отклонения выходных

параметров от заданных значений. Одной из таких задач является целевая оптимизация (Goal-Driven Optimization) прямая или с использованием поверхности отклика.

В ANSYS Workbench доступны следующие методы целевой оптимизации: - Screening - метод прямой выборки, использующий генератор квазислучайных чисел, основанный на алгоритме Хаммерсли; - MOGA - многоцелевой генетический алгоритм, который позволяет решать оптимизационные задачи с непрерывными входными параметрами; - NLPQL (Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian) – одноцелевой градиентный метод оптимизации; - MISQP (Mixed-Integer Sequential Quadratic Programming Method) – одноцелевой градиентный метод оптимизации; - Адаптивный метод прямой одно- и многокритериальной оптимизации без поверхности отклика.

### III. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РАСЧЁТЫ

Проведены две серии расчетов (предварительный и итоговый) с использованием многоцелевого генетического алгоритма (MOGA) для различных значений ширины ТЭ (стороны квадратного основания,  $L$ ) 200, 100 и 20 мкм, при этом высота ТЭ ( $H$ ) варьировалась в пределах от 10 до 1000 мкм, высота контактных площадок ( $h$ ) варьировалась от 1 до 100 мкм. Толщина слоя припоя и толщина подложки при расчетах были константами 3 и 100 мкм соответственно.

Таблица 1

Физические параметры материалов составных частей микро-ТЭГ

$T, K$	коэффициент Зеебека, $\mu V \cdot K^{-1}$	удельное сопротивление, $\mu \Omega \cdot m$	удельная теплопроводность, $W/m \cdot K$
<i>полупроводниковый материал n-типа (<math>Bi_2Te_3</math>)</i>			
300	-148,24	12,02	1,03
350	-152,59	13,48	1,11
400	-156,89	15,05	1,18
<i>полупроводниковый материал p-типа (<math>Sb_2Te_3</math>)</i>			
300	208,25	13,33	1,07
350	220,21	16,78	1,06
400	219,52	19,74	1,13
<i>Контактные площадки (Cu)</i>			
300	3,5	0,017	406
<i>Припой (Sb/Pb)</i>			
300	-	0,4	48
<i>Подложка (Si)</i>			
300	-	-	148

В качестве функциональных 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 [17]. Исходные данные для моделирования включают следующие физические параметры: коэффициент

Максимальная выходная мощность  $\mu$ ТЭГа при различных сопротивлениях внешней нагрузки и температурных граничных условиях

$\Delta T=100\text{ K}$			$\Delta T=50\text{ K}$			
$R_{\text{вн}}=300\text{ МОм}$						
$L$ , мкм	$H$ , мкм	$H/L$	$P_{\text{max}}$ , мкВт	$H$ , мкм	$H/L$	$P_{\text{max}}$ , мкВт
200	50	0,25	738	50	0,25	180
100	35	0,35	104	35	0,35	25,4
20	20	1	0,25	20	1	0,06
$R_{\text{вн}}=600\text{ МОм}$						
$L$ , мкм	$H$ , мкм	$H/L$	$P_{\text{max}}$ , мкВт	$H$ , мкм	$H/L$	$P_{\text{max}}$ , мкВт
200	65	0,325	711	65	0,325	178
100	35	0,25	155	35	0,25	37,8
20	20	1	0,49	20	1	0,12
$R_{\text{вн}}=1000\text{ МОм}$						
$L$ , мкм	$H$ , мкм	$H/L$	$P_{\text{max}}$ , мкВт	$H$ , мкм	$H/L$	$P_{\text{max}}$ , мкВт
200	65	0,325	629	65	0,325	153
100	35	0,25	185	35	0,25	45
20	20	1	0,8	20	1	0,2

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Соотношение высоты к ширине квадратного основания ТЭ ( $H/L$ ), при котором достигается максимум мощности не изменяется при изменении тепловых граничных условий.
2. Значение максимальной мощности монотонно возрастает при увеличении  $\Delta T$  при постоянном отношении  $H/L$  вне зависимости от величины внешней нагрузки.
3. Значение максимальной мощности монотонно возрастает при увеличении ширины квадратного основания генератора
4. Соотношение  $H/L$  остается постоянным, при изменении внешней нагрузки и сохранении температурного режима для  $L=100$  и  $20$  мкм и уменьшается при  $L=200$  мкм, что говорит о том, что внутренне сопротивление  $\mu$ ТЭГа с оптимальными размерами будет лежать в диапазоне от 300 до 600 МОм.
5. Зависимости выходной мощности  $\mu$ ТЭГа от отношения высоты ТЭ к его ширине в нагрузке имеют пологий максимум. При отклонении  $\pm 3\%$  от значения  $P_{\text{max}}$ , значения  $H/L$  лежат в диапазоне  $0,2 \div 0,7$ ;  $0,2 \div 0,7$  и  $0,5 \div 2$  для  $L=200, 100, 20$  мкм, соответственно, вне зависимости от внешней нагрузки. Таким образом, можно выделить общий диапазон изменения линейных размеров ТЭ:  $0,5 \div 0,7$ .

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 этих параметров методом наименьших квадратов [13]. Параметры материалов подложки и контактных площадок были выбраны из библиотеки ANSYS, припоя из [18]. В табл. 1 приведены значения физических параметров материалов составных частей  $\mu$ ТЭГ, использованные при моделировании в диапазоне температур 300–400 К.

При моделировании сетка конечных элементов генерировалась автоматически. Сетка состоит из кубических изопараметрических элементов SOLID226 с тремя степенями свободы (термических, электрических и структурных).

Температурные граничные условия определялись температурой нижней кремниевой подложки  $T_h$  и температурой верхней кремниевой подложки  $T_c$ . Рассмотрены следующие значения температур:  $T_h=343$  К,  $393$  К,  $T_c=293$  К. Данные температуры соответствуют разнице  $\Delta T=50$  и  $100$  К.

В модели учитывались электрические и термические контактные сопротивления на границе «металл-полупроводник». При этом использованы параметры согласно [18]. Результатом моделирования являются значения выходной мощности ТЭГ на внешней нагрузке. Моделирование проводилось для трех значений внешней нагрузки 300, 600, 1000 МОм.

Предварительный оптимизационный расчет произведен с целью выявления влияния толщины слоя контактных площадок ( $h$ ) на выходную мощность. В модуле оптимизации была составлена матрица моделирования (Design of experiment) для следующих значений геометрических размеров:  $L=200, 100, 20$  мкм;  $H=100, 50$  мкм;  $h=1 \div 100$  мкм. Геометрические размеры определялись в соответствии с предполагаемой микроэлектронной технологией изготовления микрогенератора совместимой с технологиями CMOS и MEMS. В результате проведенных расчетов было установлено оптимальное соотношение между высотами контактных площадок и ТЭ для всех высот ТЭ для достижения максимальной мощности, которое составило  $h=0,15H$ .

Основной оптимизационный расчет произведен с целью выявления влияния линейных размеров ТЭ на выходную мощность с учетом выявленного на предварительном этапе соотношения. Таким образом, в модуле оптимизации была составлена обновленная матрица моделирования для следующих значений геометрических размеров ТЭ:  $L=200, 100, 20$  мкм;  $H=1 \div 1000$  мкм. В процессе моделирования поддерживалось постоянным соотношение между высотами ТЭ и контактной площадки  $h=0,15H$  и было параметром при построении проекта в ANSYS.

Результаты основного оптимизационного расчета представлены на рисунках 2, 3 и табл. 2.

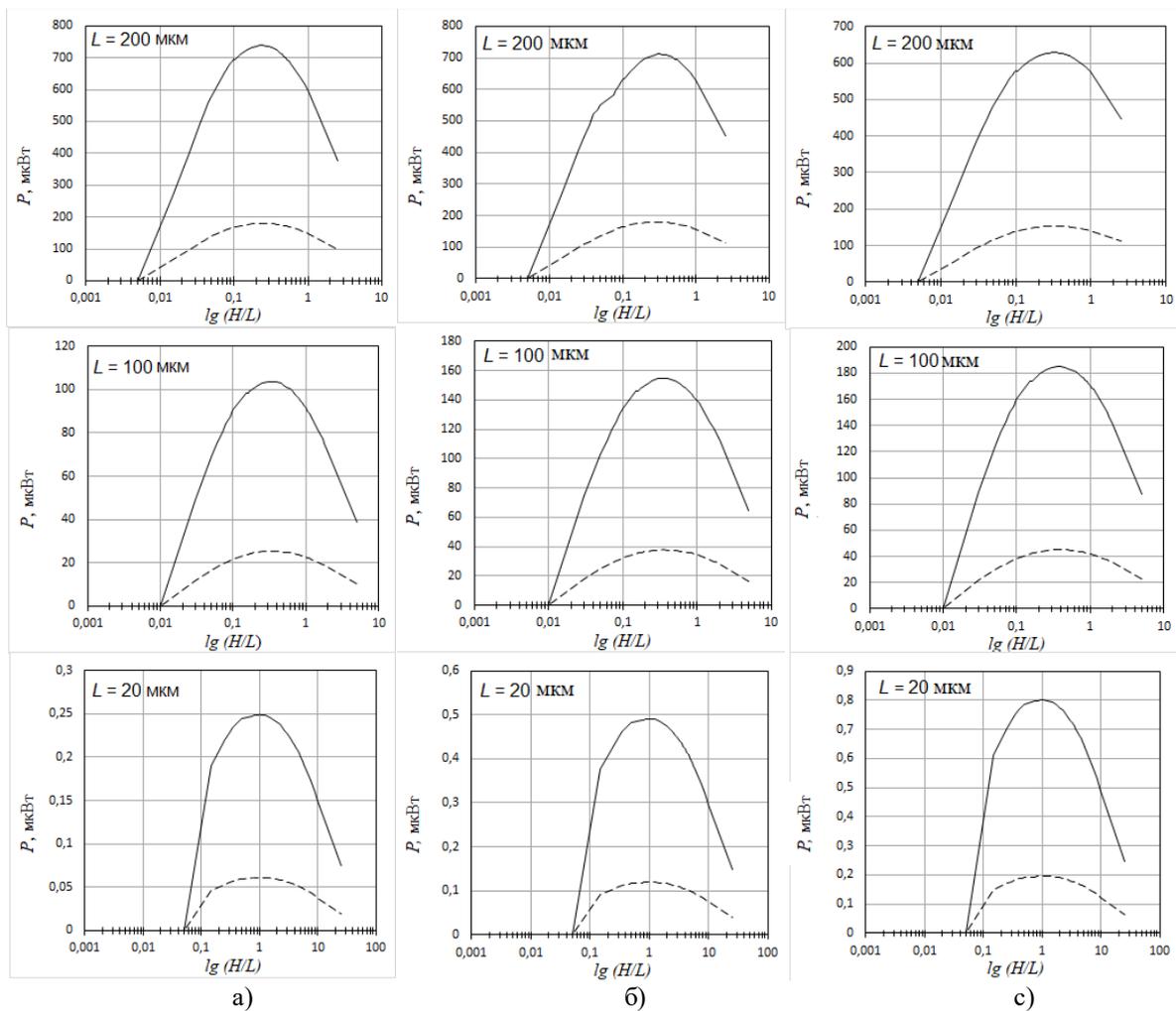


Рис. 2. Зависимости выходной мощности микротермоэлектрического генератора от соотношения высоты ТЭ к его ширине в нагрузке (а)  $R_{вн}=300$  мОм; б)  $R_{вн}=600$  мОм; в)  $R_{вн}=1000$  мОм) при различных температурных режимах (сплошные линии соответствуют  $\Delta T=100$  К, пунктирные линии –  $\Delta T=50$  К)

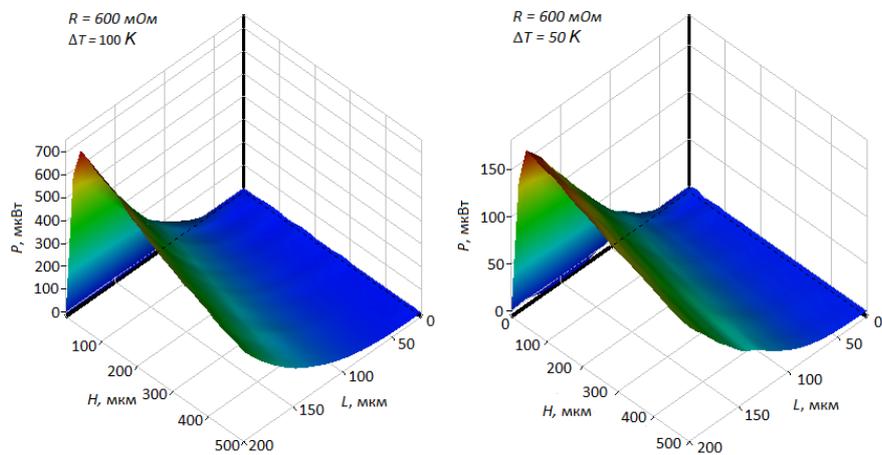


Рис. 3. Зависимости выходной мощности микротермоэлектрического генератора от линейных размеров ТЭ при внешней нагрузке  $R_{вн}=600$  мОм,  $\Delta T=100$  и 50 К

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты оптимизационных расчетов позволяют сделать вывод о применимости данного подхода к разработке микротермоэлектрического генератора с оптимальными характеристиками. В отличие от подобных исследований, например, [19,20], в данной работе в модель введен физический слой припоя между ТЭ и контактными площадками, учитывается влияние контактных электрических и тепловых сопротивлений на границе раздела «металл-полупроводник» и влияние толщины слоя контактных площадок. Данные особенности модели позволяют не только определить оптимальные размеры ТЭ, но и значение его внутреннего сопротивления, что в свою очередь, дает возможность разрабатывать микротермоэлектрические генераторы для заданных условий эксплуатации по мощности и рабочим температурам 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] 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.
- [3] 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. P. 1477–1485.
- [4] Volvenko S., Dong Ge, Zavjalov S., Gruzdev A., Rashich A., Svechnikov E. Experimental wireless ultra wideband sensor network for data collection // *Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*. 22-25 May 2017.
- [5] Snyder G.J., Lim J.R., Huang Chen-Kuo, Fleurial J.-P. Thermoelectric microdevice fabricated by a MEMS-like electrochemical process // *Nature Materials*. 2003. V.2. Aug. 2003. P.528-531.
- [6] Kim M. J., Oh T. S. Thermoelectric Thin Film Device of Cross-Plane Configuration Processed by Electrodeposition and Flip-Chip Bonding // *Materials Transactions*. 2012. V.53. № 12. P. 2160–2165.
- [7] A.Korotkov, V.Loboda, E.Bakulin, S.Dzyubanenکو. Fabrication and Testing of MEMS Technology Based Thermoelectric Generator // *Proc. 7th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)*. September 18-21. 2018. Dresden. 4 pages.
- [8] Gehong Zeng, Je-Hyeong Bahk, John E. Bowers, Joshua M. O. Zide, Arthur C. Gossard, Zhixi Bian, Rajeev Singh, Ali Shakouri, Woochul Kim, Suzanne L. Singer, and Arun Majumdar ErAs: (InGaAs)<sub>1-x</sub>(InAlAs)<sub>x</sub> alloy power generator modules // *Appl. Phys. Lett.* 91. 263510 (2007).
- [9] Tzounisa L., Liebscher M., Fuge R., Leonhardt A., Mechtcherine V. P- and n-type thermoelectric cement composites with CVD grown p- and n-doped carbon nanotubes: Demonstration of a structural thermoelectric generator // *Energy and Buildings*. Volume 191. 15 May 2019. Pages 151-163.
- [10] Akhmetov D.B., Korotkov A.S., Morozov D.V., Pilipko M.M., Romyancev I.A. Radio Frequency Identification System of Internet of Things Based on CMOS Integrated Circuits // *Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium. EWDTS 2017*. 8110155.
- [11] Korotkov A.S., Pilipko M.M., Morozov D.V., Hauer J., “Delta-sigma modulator with a 50-MHz sampling rate implemented in 0.18-μm CMOS technology // *Russian Microelectronics*. 2010. T. 39. № 3. С. 210-219.
- [12] 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*. Сб. трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2018. Ч. IV. – С. 57-62.
- [13] 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.
- [14] Korotkov A.S., Loboda V.V., Makarov S.B., and Feldhoff A. Modeling Thermoelectric Generators Using the ANSYS Software Platform: Methodology, Practical Applications, and Prospects // *Russian Microelectronics*. 2017. Vol. 46. No. 2. PP. 131–138.
- [15] Korotkov A.S., Loboda V.V. Simulation of MEMS technology based thermoelectric generators // *Selected Articles of All Russia Science&Technology Conference “Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development” (MES-2016)*. Part IV. 2017. PP. 30-34.
- [16] Geppert B., Groeneveld D., Korotkov A., Loboda V., Feldhoff A. Finite-Element Simulations of a Thermoelectric Generator and Their Experimental Validation // *Energy Harvesting and Systems*. 2(1). 2015. P. 94-105.
- [17] Snyder G.J., Toberer E.S. Complex thermoelectric materials // *Nature materials*. Vol.7. February 2008. P. 105–114.
- [18] Piggott A. Detailed Transient Multiphysics Model for Fast and Accurate Design, Simulation and Optimization of a Thermoelectric Generator (TEG) or Thermal Energy Harvesting Device // *Journal of Electronic Materials*. Volume 48. PP. 5442–5452. (2019).
- [19] S. Ferreira-Teixeira, A.M. Pereira Geometrical Optimization of a Thermoelectric Device: Numerical Simulations // *Energy Conversion and Management*. Volume 169. 1 August 2018. PP. 217-227.
- [20] Dongxu J., Zhongbao W., Pou J., Mazzoni S., Rajoo S., Romagnoli F. Geometry Optimization of Thermoelectric Modules: Simulation and Experimental Study // *Energy Conversion and Management*. Volume 195. 1 September 2019. PP. 236-243.

# Thermoelement Linear Dimensions Influence on Output Characteristics of Thermoelectric Generator

V.V. Loboda, R.D. Buslaev

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

vera\_loboda@spbstu.ru

**Abstract** — Solid state thermoelectric generators based on the Seebeck effect convert thermal energy into electricity. Microthermoelectric generators ( $\mu$ TEG) have generated great interest recently due to their reliable and stable power provision for low-power microelectronic devices, such as wireless sensor networks, smart homes, object monitoring systems and mobile devices.

In the recent decades, a fabrication of thin-film TEGs has been intensively developed using the electrochemical methods MEMS, MBE, CVD. The thin-film thermoelectric generator is compact; it has a short thermal response time and a high specific electric power. The use of silicon as a base, due to its compatibility with CMOS and MEMS processes, is also an important advantage of  $\mu$ TEG.

The article deals with the research results on the thermoelements linear dimensions influence on output characteristics of thermoelectric generators. The optimization calculations were carried out by ANSYS Workbench and genetic algorithm. It has been stated that the thermoelectric linear dimensions correction is not changed when thermal boundary conditions are changed. The dependence of the output power of linear dimensions correlation has a flat top, and the general range of linear dimension change can be found, where the output power shows the deviation of  $\pm 3\%$ .

The optimization calculation result in the conclusions that such approach to develop microthermoelectric generators with optimal characteristics can be applied. Unlike other similar research [19,20], this study suggests employing a physical layer of soldering between the thermal elements and the bonding pads and taking into account the electric and thermal contact influences on the metal/semiconductor border as well as the bonding pad layer thickness. These peculiar characteristics of the model allow prediction of the optimal thermal element dimensions and internal resistance values, thus, in its turn, facilitates to design thermoelectric generators with different output operation parameters and operation temperature ranges with the required external load resistance.

**Keywords** — thermoelectric generator, MEMS, finite element method, simulation, optimization, output power.

## REFERENCES

- [1] Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 140. pp.167–181.
- [2] 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. pp. 467–476.
- [3] 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.
- [4] Volvenko S., Dong Ge, Zavjalov S., Gruzdev A., Rashich A., Svechnikov E. Experimental wireless ultra wideband sensor network for data collection // *Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*. 22-25 May 2017.
- [5] Snyder G.J., Lim J.R., Huang Chen-Kuo, Fleurial J.-P. Thermoelectric microdevice fabricated by a MEMS-like electrochemical process // *Nature Materials*. 2003. V.2. Aug. 2003. pp.528-531.
- [6] Kim M. J., Oh T. S. Thermoelectric Thin Film Device of Cross-Plane Configuration Processed by Electrodeposition and Flip-Chip Bonding // *Materials Transactions*. 2012. V.53. № 12. pp. 2160–2165.
- [7] A.Korotkov, V.Loboda, E.Bakulin, S.Dzyubanenکو. Fabrication and Testing of MEMS Technology Based Thermoelectric Generator // *Proc. 7th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)*. September 18-21. 2018. Dresden. 4 pages.
- [8] Gehong Zeng, Je-Hyeong Bahk, John E. Bowers, Joshua M. O. Zide, Arthur C. Gossard, Zhixi Bian, Rajeev Singh, Ali Shakouri, Woochul Kim, Suzanne L. Singer, and Arun Majumdar ErAs:  $(\text{InGaAs})_{1-x}(\text{InAlAs})_x$  alloy power generator modules // *Appl. Phys. Lett.* 91. 263510 (2007).
- [9] Tzounisa L., Liebscher M., Fuge R., Leonhardt A., Mechtcherine V. P- and n-type thermoelectric cement composites with CVD grown p- and n-doped carbon nanotubes: Demonstration of a structural thermoelectric generator // *Energy and Buildings*. Volume 191. 15 May 2019. pp 151-163.
- [10] Akhmetov D.B., Korotkov A.S., Morozov D.V., Pilipko M.M., Romyancev I.A. Radio Frequency Identification System of Internet of Things Based on CMOS Integrated Circuits // *Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium. EWDTS 2017*. C. 8110155.
- [11] Korotkov A.S., Pilipko M.M., Morozov D.V., Hauer J., “Delta-sigma modulator with a 50-MHz sampling rate implemented in 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS technology // *Russian Microelectronics*. 2010. T. 39. No. 3. pp. 210-219.
- [12] Korotkov A.S., Loboda V.V., Dzyubanenکو S.V., and Bakulin E.M. Thermoelectric Generator for Human Body Monitoring Systems // *Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development* (MES-2018). The proceedings / under general editorship of member of the RF Academy of Sciences Stempkocky A.L. M.: IPPM RAS, 2018. Volume. IV. –pp. 57-62 (in Russian).
- [13] 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.

- [14] Korotkov A.S., Loboda V.V., Makarov S.B., and Feldhoff A. Modeling Thermoelectric Generators Using the ANSYS Software Platform: Methodology, Practical Applications, and Prospects // *Russian Microelectronics*. 2017. Vol. 46. No. 2. pp. 131–138.
- [15] Korotkov A.S., Loboda V.V. Simulation of MEMS technology based thermoelectric generators // *Selected Articles of All Russia Science&Technology Conference “Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development” (MES-2016)*. Part IV. 2017. pp. 30-34.
- [16] Geppert B., Groeneveld D., Korotkov A., Loboda V., Feldhoff A. Finite-Element Simulations of a Thermoelectric Generator and Their Experimental Validation // *Energy Harvesting and Systems*. 2(1). 2015. pp. 94-105.
- [17] Snyder G.J., Toberer E.S. Complex thermoelectric materials // *Nature materials*. Vol.7. February 2008. pp. 105–114.
- [18] Piggott A. Detailed Transient Multiphysics Model for Fast and Accurate Design, Simulation and Optimization of a Thermoelectric Generator (TEG) or Thermal Energy Harvesting Device // *Journal of Electronic Materials*. Volume 48. pp. 5442–5452. (2019).
- [19] S. Ferreira-Teixeira, A.M. Pereira Geometrical Optimization of a Thermoelectric Device: Numerical Simulations // *Energy Conversion and Management*. Volume 169. 1 August 2018. pp. 217-227.
- [20] Dongxu J., Zhongbao W., Pou J., Mazzoni S., Rajoo S., Romagnoli F. Geometry Optimization of Thermoelectric Modules: Simulation and Experimental Study // *Energy Conversion and Management*. Volume 195. 1 September 2019. pp. 236-243.