

Термоэлектрический генератор для устройств мониторинга состояния человека

А.С. Коротков¹, В.В. Лобода¹, С.В. Дзюбаненко², Е.М. Бакулин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ОАО «Авангард»

korotkov@spbstu.ru

Аннотация — В статье представлены результаты разработки термоэлектрического генератора для маломощных приложений, например, для систем мониторинга состояния человека. Принцип действия генератора основан на использовании эффекта Зеебека. Приводится описание технологического процесса изготовления и результаты испытаний тонкопленочного термоэлектрического генератора с выходной мощностью 3-56 мкВт при перепаде температур 25-100 К.

Ключевые слова — тонкопленочный термоэлектрический генератор, маломощные применения, электрохимическое осаждение, бондинг.

I. ВВЕДЕНИЕ

Устройства мониторинга состояния человека, как правило, представляющие беспроводные сенсорные сети из набора распределенных датчиков играют важную роль в области профилактики заболеваний и контроля состояния здоровья. В настоящее время использование традиционного источника питания подобных устройств – батареи – является основным вариантом, что требует заряда и замены аккумуляторов. Энергособирающие устройства (Energy Harvesters), использующие преобразование разности температур в ток на основе термоэлектрического эффекта Зеебека, являются альтернативным источником энергии. Для построения подобных источников могут использоваться как традиционные термоэлектрические генераторы (ТЭГ) [1-4], так и термоэлектрические генераторы на гибкой основе [5-7]. Особенностью применения ТЭГ на гибкой основе является возможность размещения рабочей области генератора на теле пациента, что позволяет увеличить эффективную площадь теплового контакта.

Для построения подобных ТЭГ используются пленочные технологии, которые являются совместимыми с технологическим процессом микроэлектромеханических систем (МЭМС) [8]. При этом рабочие области ТЭГ формируются как субмикронные пленочные слои методом электрохимического осаждения [9,10]. Основное преимущество ТЭГ, реализуемых на основе пленочных технологий, – высокая удельная мощность (мощность, приведенная на единицу площади, P/S).

Термоэлектрический генератор на гибкой основе представляет сборку ячеек пленочных ТЭГ, обеспечивающих выходную мощность в единицы микроватт. Увеличение выходной мощности, требует, в свою очередь, повышения параметра P/S .

Цель данной работы – разработка технологического процесса и изготовление ячейки пленочных ТЭГ с повышенной выходной удельной мощностью для источников питания устройств мониторинга состояния человека.

II. ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Обобщая рассмотренные в работах [9,10] технологические процессы, представим изготовление ячейки пленочного термоэлектрического генератора в виде следующих этапов: изготовление основной (нижней) части ТЭГ; изготовление коммутационной (верхней) части ТЭГ; бондинг; корпусирование. Схема процесса изготовления чипа ТЭГ показана на рис. 1-3.

Этап 1. Основание чипа термоэлектрического генератора – кремниевая пластина с оксидной пленкой (рис. 1, а). Методом магнетронного распыления на поверхности оксидной пленки формируются контактные площадки для соединения полупроводниковых термоэлементов (ТЭ) в электрическую цепь, состоящие из трех слоев: Cr–Cu–Ti (рис. 1, б). Тонкий слой хрома выполняет функцию адгезионного слоя между диоксидом кремния и медью. Слой титана выполняет функцию зародышевого слоя для электрохимического осаждения полупроводниковых ТЭ из теллурида висмута Bi_2Te_3 и теллурида сурьмы Sb_2Te_3 . Титан напыляется по предварительно сформированной фоторезистивной маске с последующим «взрывом». Для усиления адгезии пластина с медной пленкой подвергается операции декапирования, и титан напыляется с предварительной ионной обработкой. Далее формируется маска из негативного фоторезиста PR ma-N 490 фирмы Micro Resist Technology. Необходимая маска создается методом фотолитографии, для этого фоторезист наносится в два слоя с экспонированием и проявлением каждого в целях достижения максимально прямого профиля (рис. 1, в). По сформированной маске происходит

электрохимическое осаждение Bi_2Te_3 из водного раствора электролита, состоящего из 3,5М HNO_3 , 25мМ Bi , 25мМ Te в виде оксидов, на плотности тока $5,3 \text{ mA/cm}^2$ в течение 120 минут с использованием анода из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (рис. 1, г) для формирования ТЭ n -типа. Процесс фотолитографии повторяется для вскрытия окон, в которых происходит осаждение Sb_2Te_3 . Осаждение происходит из водного раствора электролита, состоящего из 1М HNO_3 , 52мМ $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$, 7мМ Te , 63мМ Sb в виде оксидов, при плотности тока $5,3 \text{ mA/cm}^2$ в течение 120 минут (рис. 1, д) для формирования ТЭ p -типа.

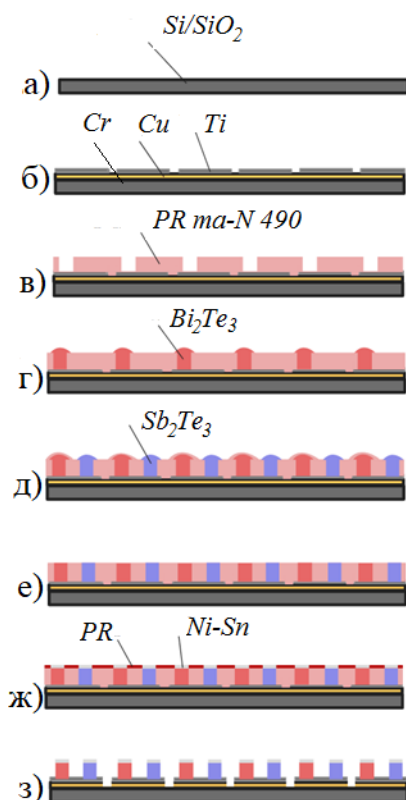


Рис. 1. Процесс изготовления основной пластины термоэлектрического генератора

- а) подготовка основания
- б) металлизация
- в) нанесение фоторезиста
- г) электрохимическое осаждение ТЕ n -типа
- д) электрохимическое осаждение ТЕ p -типа
- е) планаризация поверхности
- ж) формирование припоя
- з) травление

Для проведения процесса бондинга необходимо провести планаризацию поверхности для обеспечения надежных контактов всех полупроводниковых площадок из теллурида висмута и сурьмы с ответной коммутационной частью ТЭГ. С целью предохранения выступающих элементов операция проводится при нанесенном на поверхность пластины фоторезисте, который заполняет области между осажденными

полупроводниковыми площадками. Планаризация поверхности осуществляется методом механической полировки на установке шлифовки-полировки, фоторезист при этом не удаляется (рис. 1, е). В качестве рабочего абразивного материала применен мелкодисперсный порошок Al_2O_3 с размером зерна 3 мкм в виде суспензии. Образцы монтировались на стеклосителе и опускались лицевой поверхностью на шлифовальный круг. Процесс шлифовки проводился при минимальной нагрузке на образец (до 300 г) при скорости вращения шлифовального диска 10 об/мин. Контроль толщины снятого материала проводился вручную при помощи электронного микрометра и оптического микроскопа с увеличением до 500х.

После планаризации происходит формирование площадок припоя состава Ni-Sn на поверхности осажденных теллуридов висмута и сурьмы методом последовательного магнетронного распыления никеля и олова по предварительно сформированной маске фоторезиста с последующим «взрывом» (рис. 1, ж). Последний этап формирования нижней пластины – травление медного слоя на местах, не защищенных слоем титана (рис. 1, з).

Этап 2. Коммутационная (верхняя) часть термоэлектрического генератора состоит из кремниевой пластины с оксидной пленкой, контактных площадок. Технология формирования топологии слоев Cr-Cu-Ti с площадками Ni-Sn аналогична основной (нижней) части (рис. 2).

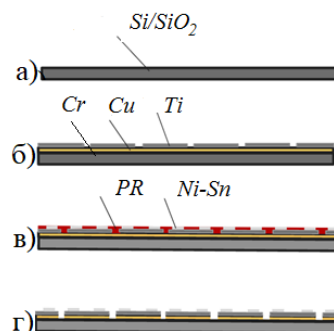


Рис. 2. Процесс изготовления коммутационной пластины термоэлектрического генератора

- а) подготовка основания
- б) металлизация
- в) формирование припоя
- г) травление

Этап 3. Бондинг основной (нижней) и коммутационной (верхней) частей генератора сплавлением соответствующих оловянных площадок друг с другом методом термокомпрессионной сварки (рис. 3). Совмещение верхней и нижней части осуществлялось с помощью преустановленной системы инфракрасного машинного зрения на установке Dr. Tresky T-3002-FC3. В заключение полученная конструкция разделяется на чипы

алмазным диском, на нижней пластине вскрываются контактные площадки для внешних выводов.

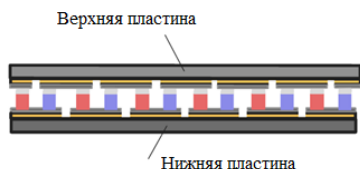


Рис. 3. Бондинг

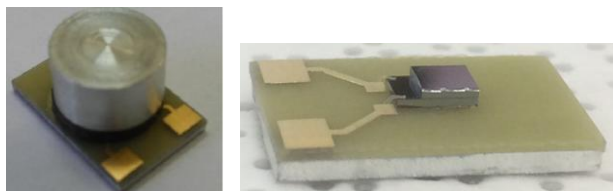


Рис. 4. Термоэлектрический генератор в сборе

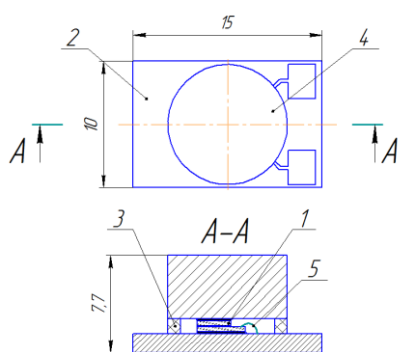


Рис. 5. Чертеж термоэлектрического генератора в сборе

- 1 – чип термоэлектрического генератора
- 2 – печатная плата с алюминиевым основанием
- 3 – кольцо-изолятор
- 4 – радиатор
- 5 – соединительная проволока

Этап 4. ТЭГ в сборе состоит из чипа термоэлектрического генератора, закрепленного между двумя алюминиевыми частями корпуса. Верхняя часть корпуса выполнена в виде цилиндра (радиатора), нижняя – в виде пластины, на которую крепится плата с внешними выводами ТЭГ (рис. 4, 5), что обеспечивает эффективный теплообмен. Кристалл монтировался на плату через эпоксидный клей с алюминиевой пудрой в качестве наполнителя, также способствующей повышению теплопроводности. Электрические соединения между контактными площадками кристалла и соответствующими контактными площадками печатной платы выполнялись методом клиновой ультразвуковой микросварки. Для надежности контакта и уменьшения токовой нагрузки на проводник все соединения дублировались. Завершающий этап – монтаж кольца-изолятора и радиатора на печатную плату с кристаллом. Диэлектрическое кольцо располагается между алюминиевыми частями корпуса. Кольцо устанавливалось на эпоксидный клей без наполнителя. Радиатор монтировался на кольцо с помощью

эпоксидного клея. С целью улучшения теплопередачи между кристаллом и радиатором на место их контакта наносилась термопаста Titan TTG-G30015.

В Таблице 1 перечислены материалы, использованные для изготовления генератора.

Таблица 1

Материалы ТЭГ

Наименование слоя	Материал
Оксидная пленка	SiO ₂
Адгезионный подслой	Cr
Адгезионный слой	Cu
Фоторезист	ФП-383
Зародышевый слой	Ti
Фоторезист (негативный, 2 слоя)	Ma-N 490
Функциональные слои	n-тип Bi ₂ Te ₃ , p-тип Sb ₂ Te ₃
Площадки для бондинга	Sn

Таблица 2

Линейные размеры функциональных слоев габаритные размеры ТЭГ

Основная (нижняя) пластина	
Функциональный слой	Толщина, мкм
Оксидная пленка	0,85
Адгезионный подслой	0,05
Адгезионный слой	2,00
Зародышевый слой	1,00
Слой Bi ₂ Te ₃	20,00
Слой Sb ₂ Te ₃	20,00
Площадка для бондинга	3,00
Коммутационная (верхняя) пластина	
Функциональный слой	Толщина, мкм
Оксидная пленка	0,85
Адгезионный подслой	0,05
Адгезионный слой	2,00
Площадка для бондинга	3,00
Размеры чипа и сборки в корпусе, мм	
Чип	3,8X2,7X0,8
ТЭГ в сборке	15,0X10,0X7,7

В Таблице 2 приведены линейные размеры функциональных слоев и габаритные размеры разработанного тонкопленочного термогенератора с 288 термоэлементами.

Анализ изображений, полученных с помощью растрового электронного микроскопа (рис. 6, 7), показал, что созданные термоэлементы имеют плотно упакованную структуру с размером кристаллита от 4 мкм (теллурид висмута) до 10 мкм (теллурид сурьмы). Элементарный состав соединений составляет: 39,5% Bi-60,5% Te для Bi₂Te₃ и 39% Sb-61% Te для Sb₂Te₃.

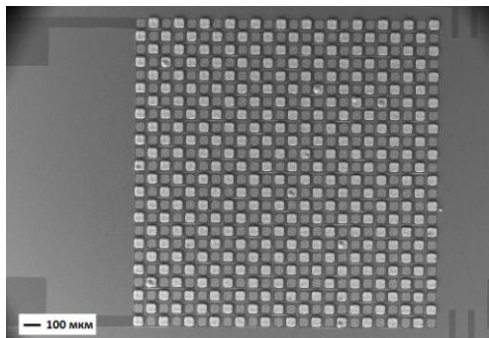


Рис. 6. Расположение на пластине термоэлементов до полировки

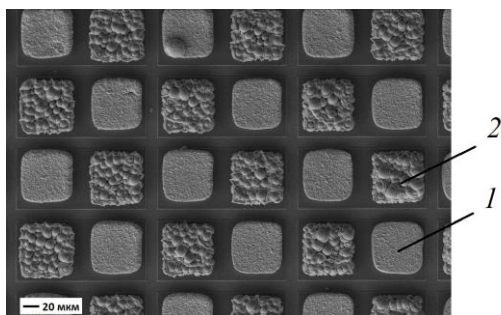


Рис. 7. Структура полупроводниковых термоэлементов до полировки: 1 – теллурид висмута; 2 – теллурид сурьмы

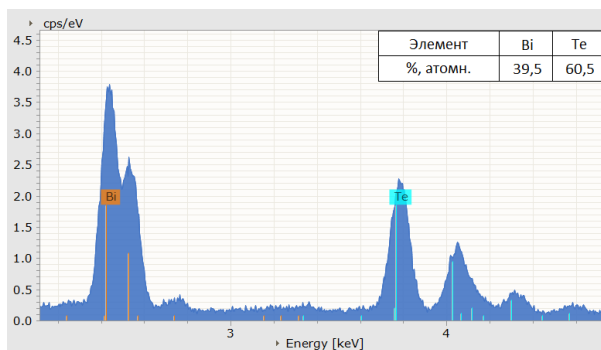


Рис. 8. Элементный анализ осажденного соединения теллурида висмута

Контроль элементного состава осажденных полупроводниковых материалов также осуществлялся методом растровой электронной микроскопии, совмещенной с рентгеноспектральным микроанализом. На рис. 8 приведены результаты анализа осажденного соединения теллурида висмута.

Фотография пластины со сформированными контактными площадками и микрофотография термоэлемента приведены на рис. 9. Диаметр кремниевой пластины составляет 76 мм (76КЭС).

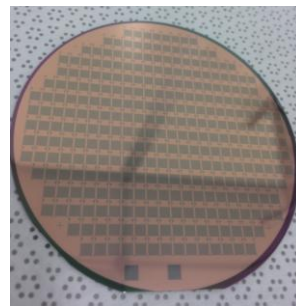


Рис. 9. Внешний вид пластины со сформированными контактными площадками

III. ТЕСТИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Принцип работы и устройство экспериментальной установки представлены в работах [1, 3, 7]. Во время эксперимента поддерживалась постоянная температура горячей стороны модуля T_h . Значения внешней нагрузки R_H варьировались в пределах от 10 Ом до 10 кОм. В процессе эксперимента контролировалась температура на поверхностях корпуса термоэлектрического генератора, а также измерялось выходное напряжение на нагрузке. Величины тока и выходная мощность рассчитывались согласно [1]. Напряжение термо-ЭДС $E_{ТЭДС}$, генерируемое ТЭГ, прямо пропорционально коэффициенту Зеебека α генератора и разнице температур ΔT между горячей T_h и холодной T_c сторонами термоэлектрического генератора:

$$E_{ТЭДС} = \alpha \cdot \Delta T.$$

На внешней нагрузке R_H создается напряжение U , равное термо-ЭДС за вычетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении генератора R :

$$U = I \cdot R_H = E_{ТЭДС} - I \cdot R,$$

где ток I в цепи определяется выражением:

$$I = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{R + R_H}.$$

Мощность, отдаваемая во внешнюю цепь, вычисляется по следующей формуле:

$$P = U \cdot I = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2}{(R + R_H)^2} R_H.$$

Результаты измерений представлены на рис. 10, 11. Измерения проведены при 4 значениях разницы температур: 25К, 50К, 75К, 100К. Выбранные значения ΔT обусловлены возможными применениями ТЭГ как в нормальных условиях, так и в условиях Крайнего Севера, в том числе, в арктическом регионе при температуре окружающего воздуха до минус 40–50 град.С. Значения выходной мощности составляют до 3-56 мкВт при перепаде температур 25-100К.

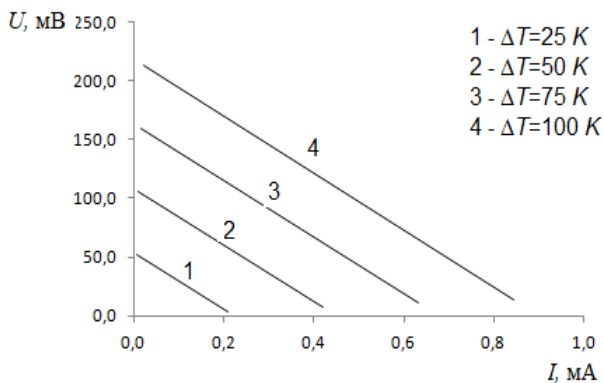


Рис. 10. ВАХ термоэлектрического генератора при различных температурных режимах

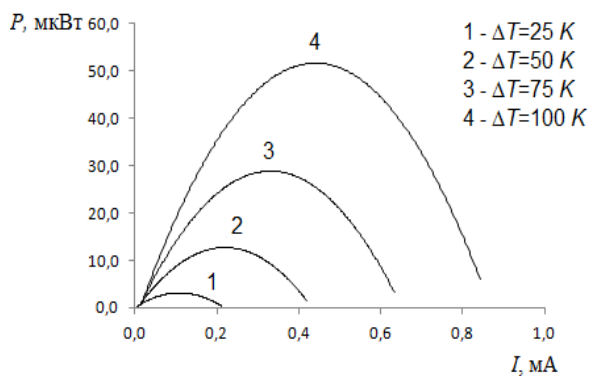


Рис. 11. Зависимости выходной мощности термоэлектрического генератора от тока в нагрузке при различных температурных режимах

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен разработанный авторами и реализованный на ОАО «Авангард» технологический процесс создания тонкопленочных термоэлектрических генераторов для маломощных приложений. В отличие от известных работ [9,10] для увеличения выходной удельной мощности ТЭГ предложено: изменить тип металлизации с Cr–Au, Ti–Cu–Ti на Cr–Cu–Ti, что обеспечило лучшую адгезию; изменить режим электрохимического осаждения для формирования термоэлементов с оптимальными, полученными в ходе моделирования, значениями геометрических размеров с высотой более 20 мкм. Кроме того, для повышения эксплуатационных качеств ТЭГ разработан, в отличие от работ [9,10], корпусированный вариант изделия.

Линейные размеры рабочей области (чипа) термоэлектрического генератора составляют 3,8X2,7X0,8 мм. Проведенные испытания показали, что разработанный термоэлектрический генератор обеспечивает выходную мощность 3-56 мВт при перепаде температур 25-100 К. Оценка полученных результатов показывает, что выходная удельная

мощность разработанного ТЭГ составляет $P/S=0,33$ мВт/кв.мм, что в 1,4 раза больше, чем в работе [10].

При использовании данных генераторов для схем питания систем мониторинга состояния человека практически значимый перепад температур составляет 10-15 градусов. Оценки показывают, что при этом достижимая мощность составляет единицы микроватт. Данная мощность обеспечивается сборкой ячеек подобных генераторов на гибкой основе площадью до 10 кв.см.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Geppert B., Groeneveld D., Korotkov A., Loboda V., and Feldhoff A. Finite-Element Simulations of a Thermoelectric Generator and Their Experimental Validation // *Energy Harvesting and Systems*. 2(1). 2015. PP. 94–105.
- [2] Лобода В.В., Коротков А.С. Моделирование и экспериментальное исследование термоэлектрических генераторов // *Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника*. №1(161). 2016. с.53-57.
- [3] Лобода В.В., Коротков А.С., Макаров С.Б., Фельдхофф А. Моделирование термоэлектрических генераторов с использованием программной платформы ANSYS: методики, практические приложения, перспективы // *Микроэлектроника*. Том 46. № 2. 2017. с.142-150.
- [4] Korotkov A., Loboda V., Feldhoff A., Groeneveld D. Simulation of Thermoelectric Generators and Its Results Experimental Verification // *IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS 2017)*. 13-14 July 2017. Iasi. Romania. 2017
- [5] Nguyen N.T., Nguyen V.T., Takahito O. Flexible thermoelectric power generator with Y-type structure using electrochemical deposition process // *Applied Energy*. Vol. 210, PP. 467–476. 15 January 2018.
- [6] 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*. Vol. 64. No. 2. February 2017. P. 1477–1485.
- [7] Suarez F., Parekh D. P., Ladd C., Vashae D., Dickey M.D., Ozturk M.C. Flexible thermoelectric generator using bulk legs and liquid metal interconnects for wearable electronics // *Applied Energy*. Vol. 202. PP. 736–745. 16 September 2017.
- [8] Коротков А.С., Лобода В.В. Моделирование термоэлектрического генератора на основе МЭМС технологии // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – (МЭС) 2016*. Сб. трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2016. Ч. IV. – С. 71-76.
- [9] Snyder G.J., Lim J.R., Huang Chen-Kuo, Fleurial J.-P. Thermoelectric microdevice fabricated by a MEMS-like electrochemical process // *Nature Materials*. Vol.2. Aug. 2003. PP.528-531.
- [10] Min-Young Kim, Tae-Sung Oh. Thermoelectric Thin Film Device of Cross-Plane Configuration Processed by Electrodeposition and Flip-Chip Bonding // *Materials Transactions*. Vol.53. No. 12 (2012). PP. 2160 – 2165.

Thermoelectric Generator for Human Body Monitoring Systems

A.S. Korotkov¹, V.V. Loboda¹, S.V. Dzyubanenko², E.M. Bakulin²

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

²JSC “Avangard”

korotkov@spbstu.ru

Abstract - The paper presents results of design, manufacturing, and testing of a thin-film thermoelectric generator for low-power applications, for example, for human body monitoring systems. Currently used monitoring systems are usually powered by rechargeable batteries, with apparent drawbacks for continuous operation from patients being affected by cognitive diseases. To extend the lifetime of traditional batteries, the development of portable power generators able to harvest energy from environmental sources and convert it into electricity looks like a much-promised technique. Thus, the manufacturing of such devices which can be placed on flexible substrates is the key point for the development of low-cost wearable and integrated devices for healthcare and biometric parameters monitoring.

Operating principle of the generator is based on Seebeck effect (transformation of thermal energy from a temperature gradient to electrical energy). Thermal elements of a generator are fabricated based on Bi₂Te₃ for n-type thermoelements and Sb₂Te₃ for p-type thermoelements. These materials have been used because of their high thermoelectric efficiency near to room temperature.

The proposed technological process includes the following stages: magnetron sputtering of Cr/Cu/Ti for forming contact areas; electrodeposition of Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ for fabrication of n-type and p-type thermoelements, respectively; magnetron sputtering of Ni-Sn solder layers; flip-chip bonding, and packaging. The core-chip size is 3.8X2.7X0.8 mm. Linear dimensions of a thermoelectric generator in a package are 15.0x10.0x7.7 mm.

Testing of manufactured generator samples was carried out with temperature differences from 25 to 100 K. The values of the external load ranged from 10 Ohm to 10 kOhm. During the experiment, the output voltage was measured on the load; the output power and current were calculated. The voltage-current characteristics and the dependence of the output power on the current for different temperature differences of the generator sides were prepared. It has been shown that the range of power is from 3 UW up to 56 UW while the temperature difference is mentioned above.

Keywords — thin-film thermoelectric generator, low-power applications, electrochemical deposition, flip-chip bonding.

REFERENCES

- [1] Geppert B., Groeneveld D., Korotkov A., Loboda V., and Feldhoff A. Finite-Element Simulations of a Thermoelectric Generator and Their Experimental Validation // *Energy Harvesting and Systems*. 2(1). 2015. PP. 94–105.
- [2] Loboda V.V., Korotkov A.S. Simulations and Experimental Investigation of Thermoelectric Generators // *Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics*. №1(161) 2016. PP.53-57 (in Russian).
- [3] 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.
- [4] Korotkov A., Loboda V., Feldhoff A., Groeneveld D. Simulation of Thermoelectric Generators and Its Results Experimental Verification // *IEEE International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS 2017)*. 13-14 July 2017. Iasi. Romania. 2017
- [5] Nguyen N.T., Nguyen V.T., Takahito O. Flexible thermoelectric power generator with Y-type structure using electrochemical deposition process // *Applied Energy*. Vol. 210, PP. 467–476. 15 January 2018.
- [6] 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*. Vol. 64. No. 2. February 2017. P. 1477–1485.
- [7] Suarez F., Parekh D. P., Ladd C., Vashae D., Dickey M.D., Ozturk M.C. Flexible thermoelectric generator using bulk legs and liquid metal interconnects for wearable electronics // *Applied Energy*. Vol. 202. PP. 736–745. 16 September 2017.
- [8] 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.
- [9] Snyder G.J., Lim J.R., Huang Chen-Kuo, Fleurial J.-P. Thermoelectric microdevice fabricated by a MEMS-like electrochemical process // *Nature Materials*. Vol.2. Aug. 2003. PP.528-531.
- [10] Min-Young Kim, Tae-Sung Oh. Thermoelectric Thin Film Device of Cross-Plane Configuration Processed by Electrodeposition and Flip-Chip Bonding // *Materials Transactions*. Vol.53. No. 12 (2012). PP. 2160 – 2165.