

DOI: 10.18721/JCSTCS.12101
УДК 621.391

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ СИЛИЦИДА МАГНИЯ ПО СТРУКТУРЕ UNI-LEG

Р.Д. Буслаев, В.В. Лобода

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Одним из перспективных устройств автономного питания систем мониторинга состояния объектов, медицинского оборудования и т. п. является термоэлектрический генератор (ТЭГ). Благодаря технологической совместимости с кремнием и высокой термической стабильности использование свойств полупроводниковых силицидов – важная ступень усовершенствования характеристик термоэлектрических генераторов. В статье представлены результаты моделирования термоэлектрического генератора на основе структуры Uni-Leg. Описаны методики моделирования, преимущества использования структуры Uni-Leg, силицидных материалов, результаты моделирования при различных температурных режимах и с использованием экспериментально полученных значений контактных сопротивлений. Приведен анализ влияния материалов керамических подложек на выходные параметры генератора.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, Uni-Leg, термоэлектричество, ANSYS, силициды, омические контакты.

Ссылка при цитировании: Буслаев Р.Д., Лобода В.В. Моделирование термоэлектрического генератора на основе силицида магния по структуре Uni-Leg // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12. № 1. С. 7–20. DOI: 10.18721/JCSTCS.12101

SIMULATION OF UNI-LEG THERMOELECTRIC GENERATOR BASED ON MAGNESIUM SILICIDE

R.D. Buslaev, V.V. Loboda

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

The article describes simulation results of a thermoelectric generator based on a Uni-Leg structure. The simulation techniques, advantages of Uni-Leg structure application, silicide materials and simulation results in different temperature ranges are described.

Keywords: thermoelectric generators, Uni-Leg, thermoelectricity, ANSYS, silicides, ohmic contacts.

Citation: Buslaev R.D., Loboda V.V. Simulation of Uni-Leg thermoelectric generator based on magnesium silicide. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems, 2019, Vol. 12, No. 1, Pp. 7–20. DOI: 10.18721/JCSTCS.12101.

Введение

Одним из перспективных устройств автономного питания систем мониторинга состояния объектов (рис. 1), медицинского оборудования и т. п. является термоэлектрический генератор (ТЭГ) [1, 2].

Традиционные термоэлектрические генераторы изготавливаются на основе полупроводниковых соединений теллуридов висмута и сурьмы. Данный тип генераторов предназначен к использованию в низкотемпературных приложениях, когда термоэлектрическая эффективность материалов максимальна (рис. 2). Актуальна задача построения ТЭГ для среднего диапазона температур с применением силицидов, имеющих максимум термоэлектрической эффективности при температурах порядка 800 К. Благодаря своей технологической совместимости с кремнием и высокой термической стабильности использование свойств полупроводниковых силицидов

является одной из важных ступеней усовершенствования характеристик термоэлектрических генераторов. В конструкции ТЭГ возможно чередование термоэлементов (ТЭ) двух термоэлектрически активных полупроводниковых материалов *n*- и *p*-типа, соединенных термически параллельно и электрически последовательно (π -структура), или ТЭ выполнены только из одного термоэлектрически активного полупроводникового материала – одиночный термоэлемент (Uni-Leg). Структура Uni-Leg упрощает конструкцию термоэлектрического генератора, тем самым уменьшая стоимость готового продукта и упрощая технологию производства.

В [5, 6] представлена методика моделирования микротермоэлектрического генератора на основе полупроводниковых соединений теллуридов висмута и сурьмы с использованием программной платформы ANSYS Workbench.

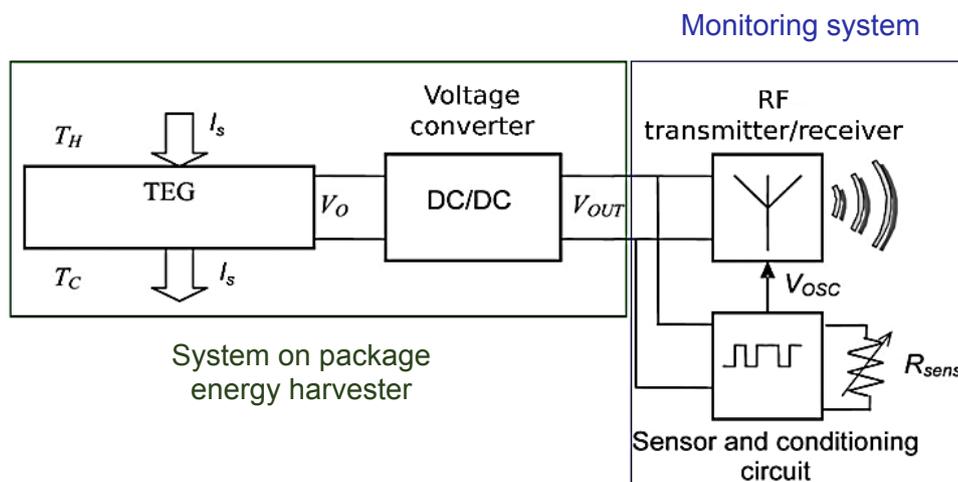


Рис. 1. Обобщенная структурная схема автономного сенсорного узла [3]

Fig. 1. A generalized block diagram of an autonomous sensor node [3]

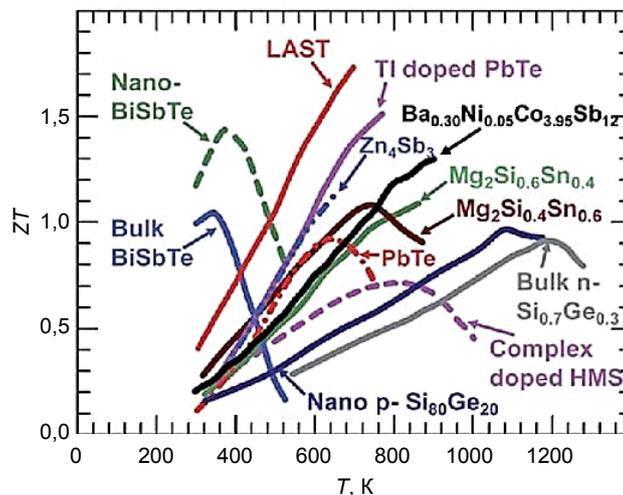


Рис. 2. Показатель качества термоэлектрических материалов [4]
 Fig. 2. Indicator of the quality of thermoelectric materials [4]

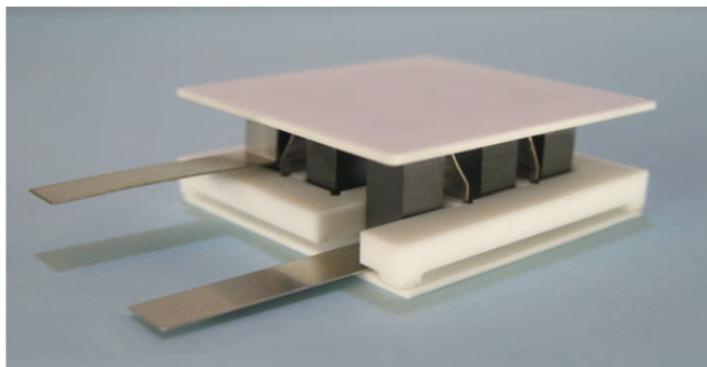


Рис. 3. Фотография Uni-Leg ТЭГ, состоящего из 9 термоэлементов [7]
 Fig. 3. Photograph of Uni-Leg TEG consisting of 9 thermoelements [7]

Цель настоящего исследования — проверка работоспособности методики моделирования для структуры Uni-Leg. Для достижения поставленной цели необходимо проверить работоспособность готовой методики моделирования термоэлектрических генераторов и на основе полученных данных усовершенствовать модель, добавив в нее учет влияния контактных электрических сопротивлений и материалов керамических подложек.

Uni-Leg термоэлектрический генератор

В работе [7] представлено экспериментальное исследование термоэлектрического генератора, имеющего структуру Uni-Leg (рис. 3).

Uni-Leg ТЭГ состоит из двух керамических пластин, на которых закреплены девять термоэлементов *n*-типа, соединенных последовательно электрически при помощи контактных площадок. По всей площади используется уплотнитель для дополнительной термоизоляции генератора.

Построение модели термоэлектрического генератора. Программный комплекс ANSYS предназначен для решения методом конечных элементов стационарных и нестационарных, линейных и нелинейных задач из таких областей физики, как механика твердого деформируемого тела, механика жидкости и газа, теплопередача, электродинамика.

Решение физической задачи осуществляется в три этапа [5, 6]: предварительная обработка (preprocessing), решение (solution) и постобработка (postprocessing).

Этап препроцессинга включает в себя следующие процедуры:

- создание 3D-геометрии (Geometry);
- задание свойств материалов объекта (Engineering data);
- выбор типа анализа (Analysis system/Thermal-electric);
- наложение сетки. Выбор типа конечного элемента в зависимости от размерности объекта и других его свойств (Meshing);
- создание электрических контактов на границе металл-полупроводник;

- приложение граничных условий (тепловых и электрических).

Второй этап – решение системы термоэлектрических уравнений.

Третий этап (постобработка) – анализ результатов расчета. Выходные параметры представляются в графическом окне ANSYS.

Особенность предложенной методики моделирования – дополнение алгоритма процедурой генерации электрических контактов на границе металл-полупроводник.

Построение геометрической 3D-модели (рис. 4, 5) термоэлектрического генератора проведено на основе данных [7]. Линейные размеры элементов конструкции Uni-Leg ТЭГ представлены в табл. 1.

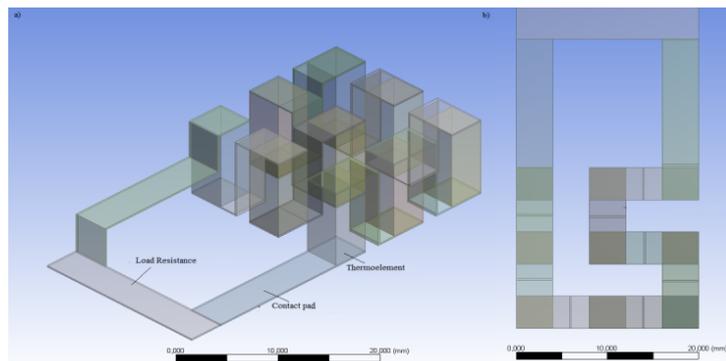


Рис. 4. 3D-геометрическая модель Uni-Leg ТЭГ
Fig. 4. 3D-geometric model of Uni-Leg TEG

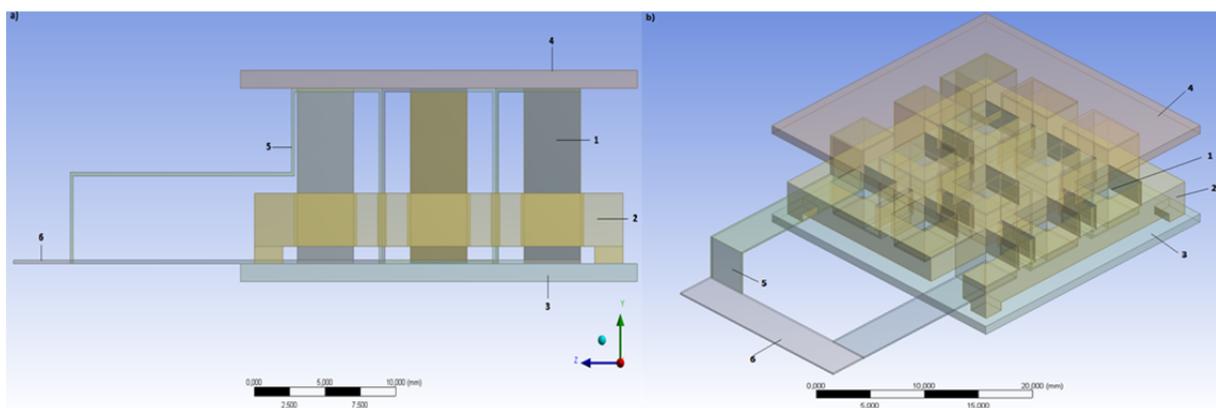


Рис. 5. Структура Uni-Leg термоэлектрического генератора:
1 – термоэлектрический элемент; 2 – уплотнитель; 3 – нижняя подложка (холодная сторона);
4 – верхняя подложка (горячая сторона); 5 – Ni контакт; 6 – нагрузочный резистор

Fig. 5. Structure of the Uni-Leg thermoelectric generator:
1 – thermoelectric element; 2 – compactor; 3 – lower substrate (cold side);
4 – upper substrate (hot side); 5 – Ni contact; 6 – load resistor

Таблица 1
Линейные размеры составных частей ТЭГ

Table 1
Linear dimensions of TEG components

Части ТЭГ	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
Mg ₂ Si	4	4	9,6
Ni	4	4	0,2
Al ₂ O ₃	28	28	1
9 ТЭ	20	20	10
TEG	28	28	12

В качестве материалов ТЭ использовался Mg₂Si, для контактных площадок и соединительных элементов применялся Ni. Физические параметры керамики, материала уплотнителя, соединительных элементов контактных площадок, материалов ТЭ

брались из литературных источников [7–10] и библиотеки ANSYS (табл. 2).

Генерация сетки конечных элементов производилась автоматически. Прямоугольная сетка состояла из 3D-изопараметрических элементов SOLID226, имеющих три степени свободы (термическую, электрическую и структурную) в каждом из 20 узлов. Общее число элементов в сетке 5357 (рис. 6). Тепловые граничные условия определялись температурами T_h и T_c на внешних поверхностях керамических пластин (табл. 3). Моделирование проводилось при четырех температурных режимах $\Delta T_{TEG} = 100, 200, 400$ и 500 К. Тепловые граничные условия соответствовали экспериментальным данным, приведенным в работе [7] (табл. 3). Значения внешней нагрузки R_n варьировались в пределах от 60 мОм и до 700 мОм. Электрические граничные условия задает «нуль» потенциала на внешней нагрузке.

Таблица 2

Свойства материалов элементов конструкции Uni-Leg ТЭГ

Table 2

Properties of materials of the Uni-Leg TEG structural elements

T, К	Mg ₂ Si			Ni			Al ₂ O ₃
	α , $\mu\text{V/K}$	ρ , $\Omega^*\text{m}$	λ , W/m*K	α , $\mu\text{V/K}$	ρ , $\Omega^*\text{m}$	λ , W/m*K	λ , W/m*K
373	-154,7	$8,79 \cdot 10^{-6}$	6,73	-19,3	$11,91 \cdot 10^8$	83	28
473	-173,5	$1,16 \cdot 10^{-5}$	5,09	-19,3	$17,95 \cdot 10^8$	74	21
573	-218,4	$1,87 \cdot 10^{-5}$	4,28	-19,3	$26,09 \cdot 10^8$	68	15,7
773	-249	$2,51 \cdot 10^{-5}$	3,44	-19,3	$35,51 \cdot 10^8$	62	10,5
873	-254,5	$2,82 \cdot 10^{-5}$	3,27	-19,3	$38,74 \cdot 10^8$	60	8,7

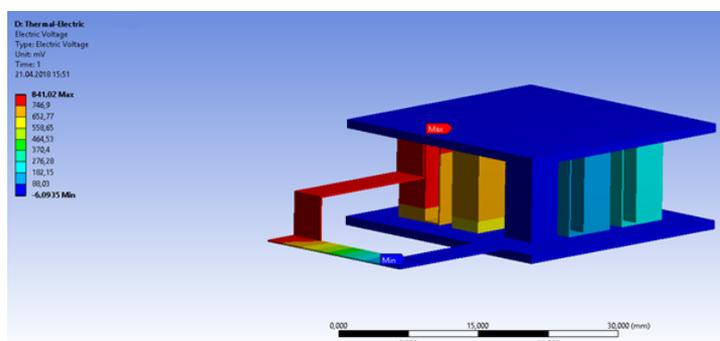


Рис. 6. Результаты моделирования выходного напряжения ТЭГ с использованием процедуры автоматической генерации контактов

Fig. 6. TEG output voltage simulation results using the automatic contact generation procedure

Таблица 3
Температурные граничные условия

Table 3

Temperature boundary conditions

Температурные моды [7]			Температурные граничные условия (модель)		
$T_h, ^\circ\text{C}$	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$T_h, ^\circ\text{C}$	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$
473	373	100	473	373	100
573	373	200	573	373	200
773	373	400	773	373	400
873	373	500	873	373	500

Моделирование электрических контактов между металлическими контактными площадками и полупроводниковыми термоэлементами возможно двумя способами: при помощи процедуры автоматического генерирования контактов, предусмотренной ANSYS Workbench, или с помощью ручного ввода значений поверхностного сопротивления контакта.

Результаты моделирования, проведенного с использованием процедуры автоматической генерации контактов, представлены на рис. 6. Расчет проводился для максимальной разницы температур горячей и холодной сторон при условии передачи максимальной мощности в нагрузку. Данное условие выполняется при равенстве внутреннего сопротивления термоэлектрического генератора и сопротивления внешней нагрузки. Моделирование показало расхождение с результатами эксперимента порядка 40 %.

Таким образом, при моделировании необходимо использовать расчетные или экспериментально измеренные значения сопротивлений электрических контактов между металлом и полупроводником. В работе [7] произведено измерение сопротивления электрических контактов. Значение составило $R_{\text{cont}} = 11,7$ МОм.

Результаты моделирования выходного напряжения с использованием данных о величине контактных сопротивлений для максимальной разницы температур горячей и холодной стороны при условии передачи максимальной мощности в нагрузку $R_L = R_m = 181$ МОм, представлены на рис. 7.

Результаты моделирования в графической форме для различных температурных режимов (см. табл. 3) представлены на рис. 8, 9. Пунктирные линии показывают результаты моделирования, сплошные – результаты эксперимента. Различие в результатах моделирования и эксперимента не превышает 1 %.

Значения максимальной выходной мощности термоэлектрического генератора, полученные в результате моделирования при различных ΔT , представлены в табл. 4.

Таблица 4

Выходная мощность термоэлектрического генератора при различных температурных режимах

Table 4

Output power of a thermoelectric generator at various temperature conditions

$\Delta T, \text{K}$	$P_{\text{max.exp}}, \text{mW}$	$P_{\text{max.mod}}, \text{mW}$	δ
500	545,4	541,6	0,7
400	354,1	352	0,6
200	65,2	64,7	0,8
100	20	19,8	1

Анализ влияния материала керамической подложки на выходные параметры. На рис. 10 а показана ситуация, при которой предполагается, что каждая покрывающая пластина находится в изотермическом состоянии, а падение температуры происходит только над термоэлектрическими элементами. На рисунке 10 б представлено распределение температуры по термоэлектрическому элементу при использовании Al_2O_3 в качестве подложек.

При использовании подложек, изготовленных из Al_2O_3 , температура на поверхностях не соответствует температуре на ТЭ, что продемонстрировано на рис. 10 а, б. Коэффициент Зеебека полупроводника определяется разницей температур на поверхностях данного полупроводника и, следовательно, изменение температуры за счет ее на подложках сказывается на значении выходной мощности.

Существует два способа уменьшить тепловые потери на подложках: уменьшить толщину подложки или использовать другой материал с более высоким коэффициентом теплопроводности.

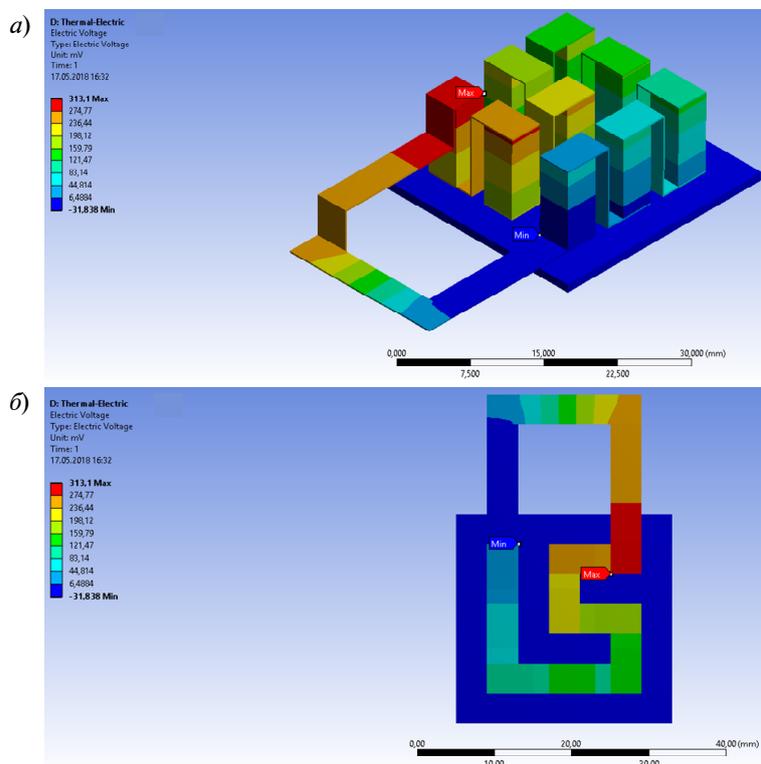


Рис. 7. Результаты моделирования выходного напряжения ТЭГ с использованием $R_{\text{cont}} = 11,7 \text{ мОм}$:
a – вид спереди; *б* – вид сверху

Fig. 7. The results of TEG output voltage simulation using $R_{\text{cont}} = 11.7 \text{ m}\Omega$ were carried out for the maximum temperature difference between the hot and cold sides, provided that the maximum power was transmitted to the load $R_L = R_{in} = 181 \text{ m}\Omega$:
a – front view; *b* – top view

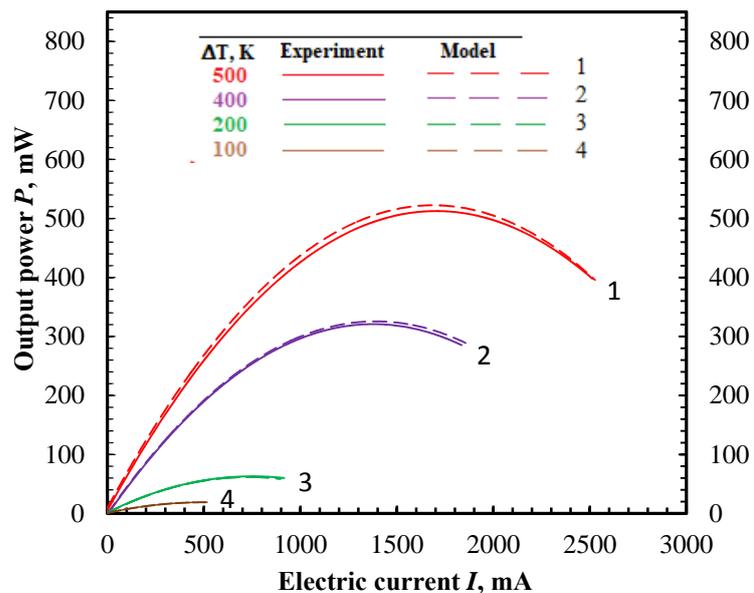


Рис. 8. ВАС термоэлектрического генератора при различных температурных режимах
 Fig. 8. CVC of a thermoelectric generator at various temperature conditions

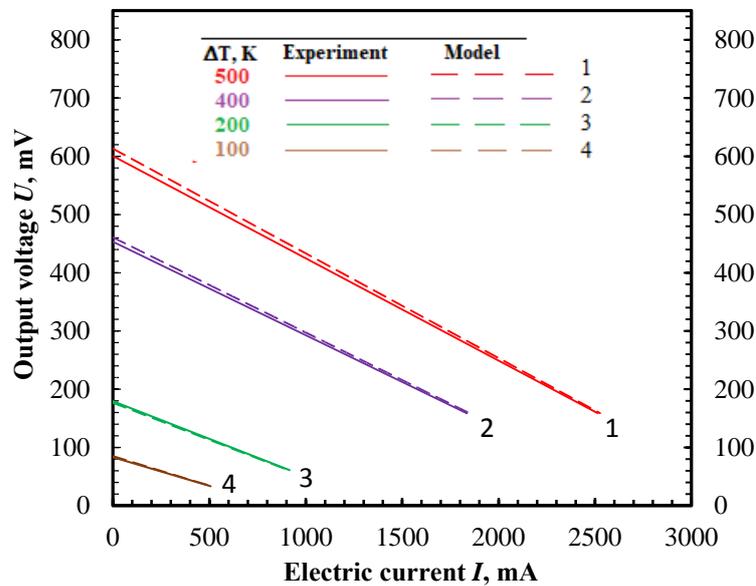


Рис. 9. Зависимости выходной мощности термоэлектрического генератора от тока в нагрузке при различных температурных режимах

Fig. 9. Dependences of the output power of a thermoelectric generator on the current in the load at various temperature conditions

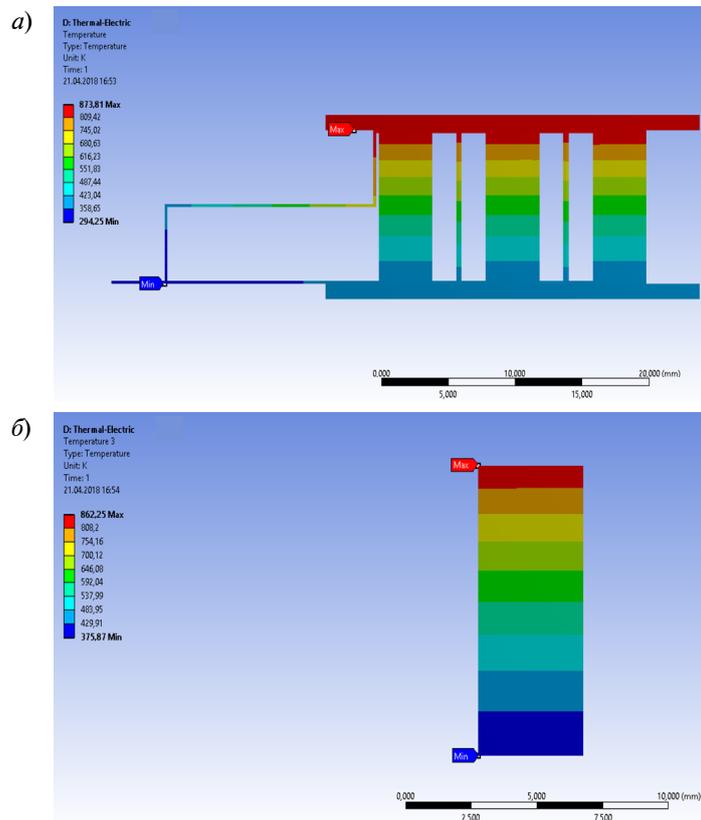


Рис. 10. Распределение температуры по поверхности: *a* – термоэлектрического генератора; *b* – термоэлемента Mg_2Si при использовании подложек из Al_2O_3

Fig. 10. Temperature distribution over the surface: *a* – thermoelectric generator; *b* – Mg_2Si thermoelement when using Al_2O_3 substrates

Для уменьшения тепловых потерь на корпусе термоэлектрического генератора было решено при моделировании заменить Al_2O_3 на подложки Si_3N_4 тех же геометрических размеров. Теплопроводность Al_2O_3 при 300 К $\lambda = 25\text{--}30$ Вт/м*К, при тех же размерах теплопроводность нитрида кремния Si_3N_4 при 300 К $\lambda = 62,8$ Вт/м*К. Как видно, теплопроводность нитрида кремния в два раза выше, чем у оксида алюминия. Следовательно, температурные потери на керамике будут ниже в случае использования Si_3N_4 , и их влияние на выходные параметры термоэлектрического генератора снизится.

На рис. 11 *а, б* изображены распределения температур по поверхностям горячей и холодной сторон ТЭГ при использовании Al_2O_3 в качестве подложек. На рис. 12 *а, б* показаны распределения температур по поверхностям горячей и холодной сторон ТЭГ при использовании Si_3N_4 в качестве

подложек. Рисунок 13 демонстрирует распределение температуры по термоэлектрическому элементу.

Можно видеть, что при использовании Si_3N_4 падение температуры снизилось на 8 К на горячей стороне ТЭ (рис. 10 *б* и 13). В связи с этим наблюдается увеличение выходной мощности (рис. 14, 15).

В табл. 5 представлены результаты моделирования при $\Delta T = 500$ К для генераторов с различными керамическими подложками. Как видно из данных таблицы, выходная мощность генератора с горячей и холодной сторонами из Si_3N_4 на 2,8 % выше, чем у генератора с подложками из Al_2O_3 . В табл. 6 сведены результаты моделирования при $\Delta T = 200$ К для генераторов с различными керамическими подложками. В данном случае наблюдается большая разница. В табл. 7 представлены результаты выходной мощности для различных подложек.

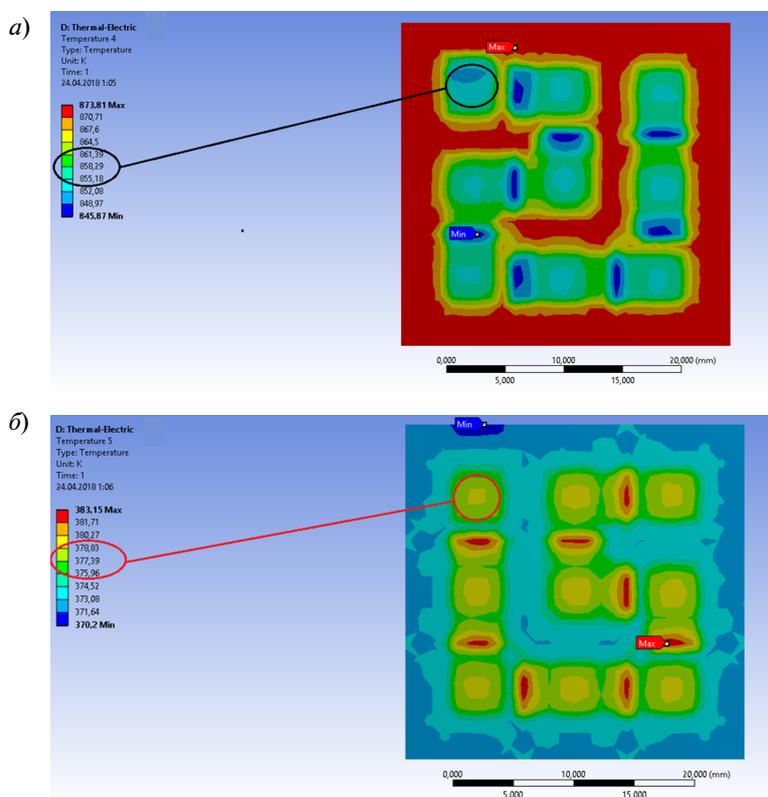


Рис. 11. Распределение температуры: *а* – по верхней подложке; *б* – по нижней подложке из Al_2O_3
 Fig. 11. Temperature distribution over: *a* – the upper substrate; *b* – bottom substrate of Al_2O_3

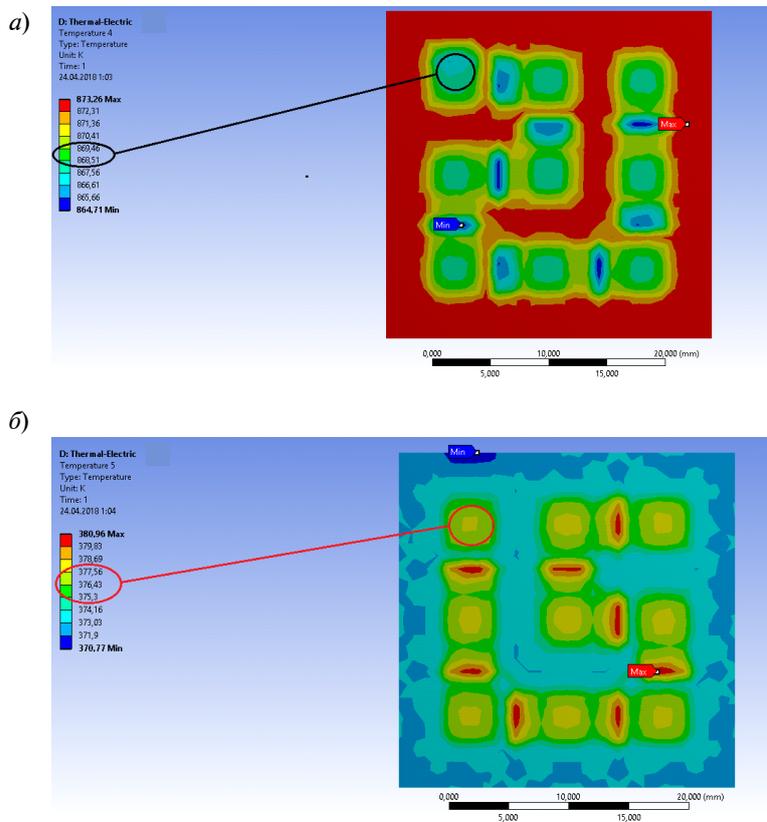


Рис. 12. Распределение температуры: *a* – по верхней подложке; *б* – по нижней подложке, изготовленных из Si_3N_4

Fig. 12. Temperature distribution over: *a* – top substrate; *b* – lower substrate made of Si_3N_4

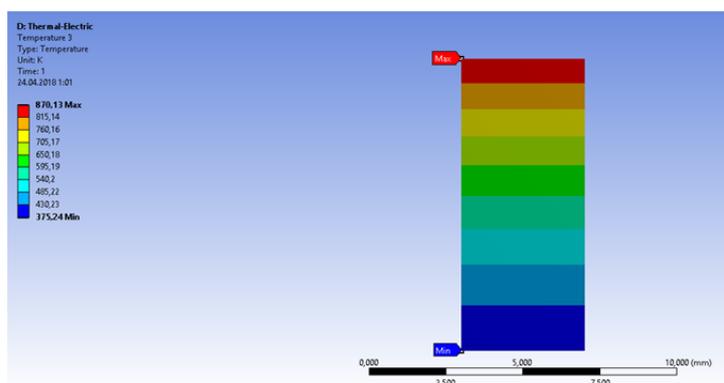


Рис. 13. Распределение температуры по термоэлементу Mg_2Si при использовании подложек из Si_3N_4

Fig. 13. Temperature distribution over the Mg_2Si thermoelement when using Si_3N_4 substrates

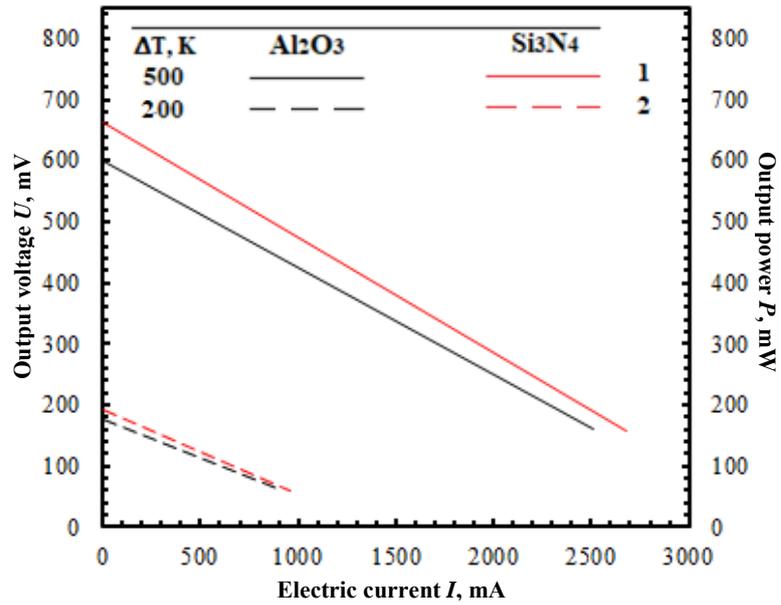


Рис. 14. ВАХ термоэлектрического генератора, полученные из 3D-модели для подложек из Al₂O₃ и Si₃N₄

Fig. 14. VAC of a thermoelectric generator obtained from the 3D-model for substrates of Al₂O₃ and Si₃N₄

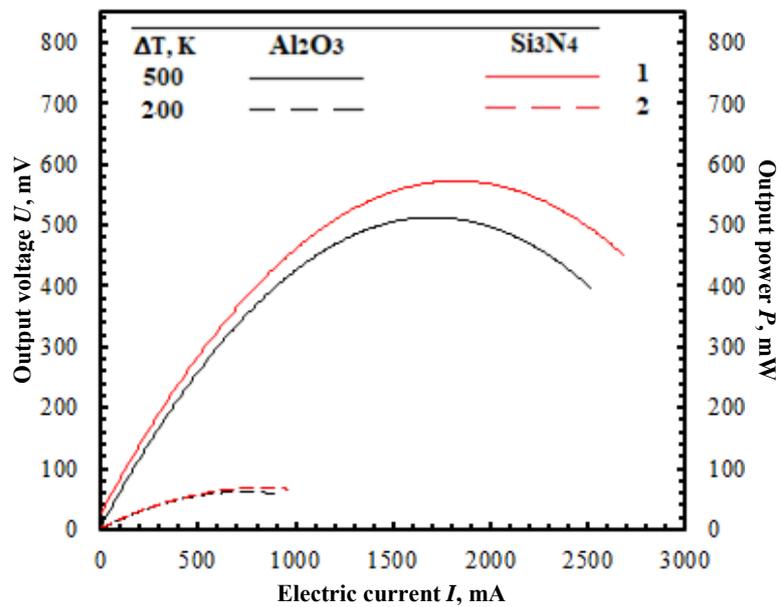


Рис. 15. Зависимости мощности от тока, полученные из 3D-модели для подложек из Al₂O₃ и Si₃N₄

Fig. 15. Power versus current obtained from the 3D-model for substrates of Al₂O₃ and Si₃N₄

Таблица 5

Выходные параметры термоэлектрического генератора с Si_3N_4 , полученные в результате моделирования, в сравнении с экспериментальными данными при использовании Al_2O_3 при $\Delta T = 500 \text{ K}$

Table 5

Output parameters of a thermoelectric generator with Si_3N_4 , obtained as a result of simulation as compared with experimental data using Al_2O_3 at $\Delta T = 500 \text{ K}$

Experiment		$\Delta T = 500$		Model Si_3N_4		$\Delta T = 500$	
$R_L, \text{m}\Omega$	U, mV	I, mA	P, mW	$R_L, \text{m}\Omega$	U, mV	I, mA	P, mW
100000	594	0,0001	0,0594	100000	647	0,0001	0,0647
754	496	657,825	326,3	754	557	739	411,5
429	447	1041,96	465,8	429	472	1100	519,3
322	407	1263,98	514,4	322	421	1307	550,4
217	341	1571,43	535,9	217	349	1608	561,3
190	320,2	1685,26	539,6	190	327	1721	562,8
184	315,9	1716,85	542,4	184	324,3	1763	571,6
181	314,2	1735,91	545,4	181	322,1	1780	573,2
176	308,9	1755,11	542,2	176	318	1807	574,6
172	301,4	1752,33	528,2	172	313	1820	569,6
169	296,1	1752,07	518,8	169	309,9	1834	568,3
163	287,3	1762,58	506,4	163	303,7	1863	565,9
159	279	1754,72	489,6	159	297,8	1873	557,8
152	271,2	1784,21	483,9	152	289,6	1905	551,8
125	244,7	1957,6	479,0	125	260,8	2086	544,1
117	234,1	2000,85	468,4	117	250,1	2138	534,6
98	211,9	2162,24	458,2	98	226,2	2308	522,1
83	193,1	2326,51	449,2	83	205,2	2472	507,3
69	174,3	2526,09	440,3	69	185	2681	496,0

Таблица 6

Выходные параметры термоэлектрического генератора с Si_3N_4 , полученные в результате моделирования, в сравнении с выходными параметрами Uni-Leg TEG с использованием Al_2O_3 при $\Delta T = 200 \text{ K}$

Table 6

Output parameters of a thermoelectric generator with Si_3N_4 , obtained as a result of modeling in comparison with the output parameters of the Uni-Leg TEG using Al_2O_3 at $\Delta T = 200 \text{ K}$

Model Al_2O_3		$\Delta T = 200$		Model Si_3N_4		$\Delta T = 200$	
$R_L, \text{m}\Omega$	U, mV	I, mA	P, mW	$R_L, \text{m}\Omega$	U, mV	I, mA	P, mW
100000	179	0,0001	0,0179	100000	212	0,0001	0,0212
754	160,5	212,865	34,2	754	167,5	222	37,2
429	136,2	317,483	43,2	429	141,1	329	46,4
322	120,2	373,292	44,9	322	125,7	390	49,1
217	108,7	500,922	54,5	217	111,9	516	57,7
190	103,5	544,737	56,4	190	106,2	559	59,4
184	102,4	556,522	57,0	184	105,3	572	60,3
181	101,9	562,983	57,4	181	104,8	579	60,7
176	101,4	576,136	58,4	176	103,9	590	61,3
172	100,6	584,884	58,8	172	103,3	601	62,0
169	100,1	592,308	59,3	169	102,6	607	62,3
163	98,7	605,521	59,8	163	101,7	624	63,5
159	98,3	618,239	60,8	159	100,8	634	63,9
152	97,8	643,421	62,9	152	100,2	659	66,1
125	89,9	719,2	64,7	125	92,6	741	68,6
117	86,4	738,462	63,8	117	91,4	781	71,4
98	78,3	798,98	62,6	98	82,9	846	70,1
83	71,1	856,627	60,9	83	75,7	912	69,0
69	61,8	895,652	55,4	69	66,2	959	63,5

Таблица 7

Выходные параметры термоэлектрического генератора с использованием Si_3N_4 , полученные в результате моделирования, в сравнении с выходными параметрами при использовании подложки из Al_2O_3

Table 7

Output parameters of a thermoelectric generator using Si_3N_4 obtained as a result of modeling versus output parameters using an Al_2O_3 substrate

ΔT , К	$P_{\max, \text{Al}_2\text{O}_3}$, мВт	$P_{\max, \text{Si}_3\text{N}_4}$, мВт	δ
500	541,6	574,6	5,7
200	65,2	71,4	8,7

Заключение

Представленные результаты позволяют сделать вывод о правильности предложенного

подхода к моделированию термоэлектрических генераторов на основе структуры Uni-Leg. Особенностью процесса моделирования является добавление в методику контактных электрических сопротивлений, анализ и учет влияния материалов, используемых в качестве керамических подложек, на выходные параметры термоэлектрического генератора. Учет внутренних контактных сопротивлений при моделировании позволяет подобрать материалы межсоединений таким образом, чтобы минимизировать влияние электрических и тепловых потерь на выходные параметры термоэлектрического генератора. Правильный выбор материала подложки оказывает существенное влияние на передачу тепла от источника до термопар. Предложенная методика моделирования позволяет быстро и качественно оценить влияние материала подложки на выходные характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahiska R., Mamur H. A review: Thermoelectric generators in renewable energy // *Internat. J. of Renewable Energy Research*. 2014. Vol. 4. No. 1.
2. Volvenko S., Ge Dong, Zavjalov S., Gruzdev A., Rashich A., Svechnikov E. Experimental wireless ultra wideband sensor network for data collection // *Progress in Electromagnetics Research Symp.* Spring. 2017.
3. Dalola S., Ferrari M., Ferrari V., Guizzetti M., Marioli D., Taroni A. Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors // *IEEE Trans. Instr. Measurement*. 2009. Vol. 58. No. 1. Pp. 99–107.
4. Snyder G.J., Ursell T. Thermoelectric efficiency and compatibility // *Physical Review Letters*. 2003. Vol. 91. No. 14.
5. Korotkov A., Loboda V., Feldhoff A., Groeneveld D. Simulation of thermoelectric generators and its results experimental verification // *IEEE Internat. Symp. on Signals, Circuits and Systems*. Iasi. Romania. 2017.
6. Лобода В.В., Коротков А.С., Макаров С.Б., Фельдхофф А. Моделирование термоэлектрических генераторов с использованием программной платформы ANSYS: методики, практические приложения, перспективы // *Микроэлектроника*. 2017. Т. 46. № 2. С. 142–150.
7. Nemoto T., Iida T., Sato J., Oguni Y., Matsumoto A., Miyata T., Sakamoto T., Nakajima T., Taguchi H., Nishio K., Takashi Y. Development of an Mg_2Si Uni-Leg thermoelectric module using durable Sb-Doped Mg_3Si Legs // *J. Electron. Mater.* 2012. Vol. 39. P. 1572.
8. Wijescara W., Rosendahl L., Brown D., Snyder J. Uni-Leg thermoelectric generator design for oxide thermoelectrics and generalization of the Uni-Leg design using an idealized metal // *Journal of Electronic Materials*. 2015. Vol. 44, No. 6.
9. Szczech J., Higgins J., Jin S. Enhancement of the thermoelectric properties in nanscale and nanostructured materials // *J. Mater. Chem*. 2011. Vol. 21. P. 4037.
10. Nolas G.S., Sharp J., Goldsmid H.J. *Thermoelectrics*. Berlin: Springer, 2001. P. 146.

Статья поступила в редакцию 10.11.2018.

REFERENCES

1. Ahiska R., Mamur H. A review: Thermoelectric generators in renewable energy. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2014, Vol. 4, No. 1.
2. Volvenko S., Ge Dong, Zavjalov S., Gruzdev A., Rashich A., Svechnikov E. Experimental wireless ultra wideband sensor network for data collection.

Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring, 2017.

3. Dalola S., Ferrari M., Ferrari V., Guizzetti M., Marioli D., Taroni A. Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors. *IEEE Trans. Instr. Measurement*, 2009, Vol. 58, No. 1, Pp. 99–107.

4. Snyder G.J., Ursell T. Thermoelectric efficiency and compatibility. *Physical Review Letters*, 2003, Vol. 91, No. 14.

5. 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 2017*, Iasi, Romania, 2017.

6. Loboda V.V., Korotkov A.S., Makarov S.B., Feldkhoff A. Modelirovaniye termoelektricheskikh generatorov s ispolzovaniyem programmnoy platformy ANSYS: metodiki, prakticheskiye prilozheniya, perspektivy [Modeling thermoelectric generators using the ANSYS software platform: Methodology,

practical applications, and prospects]. *Mikroelektronika [Russian Microelectronics]*, 2017, Vol. 46, No. 2, Pp. 142–150. (rus)

7. Nemoto T., Iida T., Sato J., Oguni Y., Matsumoto A., Miyata T., Sakamoto T., Nakajima T., Taguchi H., Nishio K., Takanashi Y. Development of an Mg₂Si Uni-Leg Thermoelectric Module Using Durable Sb-Doped Mg₂Si Legs. *Journal of Electronic Materials*, 2012, Vol. 39, P. 1572.

8. Wijescara W., Rosendahl L., Brown D., Snyder J. Uni-Leg thermoelectric generator design for oxide thermoelectrics and generalization of the Uni-Leg design using an idealized metal. *Journal of Electronic Materials*, 2015, Vol. 44, No. 6.

9. Szczech J., Higgins J., Jin S. Enhancement of the thermoelectric properties in nanscale and nanostructured materials. *Journal of Mater. Chem.*, 2011, Vol. 21, P. 4037.

10. Nolas G.S., Sharp J., Goldsmid H.J. *Thermoelectrics*, Berlin: Springer, 2001, P. 146.

Received 10.11.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

БУСЛАЕВ Роман Дмитриевич

BUSLAEV Roman D.

E-mail: tasraven@gmail.com

ЛОБОДА Вера Владимировна

LOBODA Vera V.

E-mail: vera_loboda@spbstu.ru