

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-732-738

УДК 621.362

Моделирование структуры и характеристик термоэлектрических устройств на основе соединений магния

Злата Александровна Дашина^{1✉}, Алексей Владимирович Асач²,
Григорий Николаевич Исаченко³, Елена Александровна Быковская⁴

^{1,2,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

³ Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

¹ zlata.dashina@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0009-0003-6235-7187>

² avasach@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9509-2048>

³ g.isachenko@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1763-4224>

⁴ ebaykovskaia@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9610-9155>

Аннотация

Введение. В связи с глобальным изменением климата остро стоит задача декарбонизации и повышения эффективности процессов и устройств энергетического сектора экономики. Одним из направлений повышения энергетической эффективности является рекуперация низкопотенциального тепла за счет применения термоэлектрических генераторов (ТЭГ). Перспективными материалами для таких устройств являются силициды. Однако их применение ограничивается недостаточной термостабильностью при высоких температурах. В частности, высокоэффективный материал — твердый раствор силицида и станнида магния ($\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$) деградирует при температурах выше 400 °С, в то время как более стабильный силицид магния (Mg_2Si) обладает меньшей термоэлектрической эффективностью. Для преодоления этого ограничения предлагается использование сегментированной конструкции n -ветви ТЭГ, сочетающей оба материала. Целью работы является моделирование и оптимизация ТЭГ, содержащего сегментированную ветвь n -типа, для расширения рабочего температурного диапазона при сохранении высокого коэффициента полезного действия. **Метод.** Исследование выполнено методом компьютерного моделирования в программной среде COMSOL Multiphysics. Разработана трехмерная стационарная модель ТЭГ, состоящего из 127 пар термоэлектрических ветвей. Ветвь p -типа выполнена из высшего силицида марганца. Сегментированная ветвь n -типа состоит из Mg_2Si на горячей стороне и $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$ на холодной. В модели использовались модули для описания процессов теплопереноса и электропереноса с учетом термоэлектрического эффекта. Учитывался тепловой контакт между различными частями генератора. Для анализа влияния геометрии варьировалось соотношение высот сегментов (от 30 % до 80 % для $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$). Для генератора с оптимальным соотношением высот сегментов построены рабочие характеристики ТЭГ. **Основные результаты.** Согласно результатам моделирования коэффициент полезного действия модуля с сегментированной ветвью повышается до 5,3 % по сравнению с 2,9 % на ТЭГ, n -ветви которого состоят только из Mg_2Si при температуре на горячем спае 500 °С. При определенной конфигурации сегментированной ветви такой температурный режим становится допустимым, а результаты модели сопоставимы с коммерчески доступными устройствами. **Обсуждение.** Результаты компьютерного моделирования демонстрируют, что предложенная конструкция сегментированного силицидного ТЭГ является эффективным решением для преодоления ограничения по термической стабильности высокоэффективного материала $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$. Предложенная конструкция позволяет существенно расширить рабочий температурный диапазон устройства при приемлемом уровне коэффициента полезного действия.

Ключевые слова

мультифизическое моделирование, COMSOL Multiphysics, термоэлектрический генератор, силицид магния, высший силицид марганца

Ссылка для цитирования: Дашина З.А., Асач А.В., Исаченко Г.Н., Быковская Е.А. Моделирование структуры и характеристик термоэлектрических устройств на основе соединений магния // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 4. С. 732–738. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-732-738

© Дашина З.А., Асач А.В., Исаченко Г.Н., Быковская Е.А., 2026

Modeling of the structure and characteristics of thermoelectric generators based on magnesium compounds

Zlata A. Dashina^{1✉}, Alexey V. Asach², Grigory N. Isachenko³, Elena A. Bykovskaya⁴

^{1,2,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

³ Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

¹ zlata.dashina@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0009-0003-6235-7187>

² avasach@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9509-2048>

³ g.isachenko@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1763-4224>

⁴ eabykovskaia@itmo.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9610-9155>

Abstract

In the context of global climate change, the imperative for decarbonization and improvement in efficiency of processes and equipment within the energy sector has become increasingly urgent. One promising approach to improving energy efficiency involves the recovery of low-grade waste heat through the implementation of thermoelectric generators (TEG). Silicide-based materials are considered promising for such devices. However, their utilization is constrained by insufficient thermal stability at elevated temperatures. Specifically, the efficient material $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$ undergoes degradation above 400 °C, whereas the more thermally stable Mg_2Si has lower thermoelectric performance. To address this limitation, a segmented design of the n -type leg in TEG is proposed, integrating both materials. The objective of this study is to model and optimize a TEG with a segmented n -type leg, thereby extending the operational temperature range while maintaining high energy conversion efficiency. The simulation was performed with COMSOL Multiphysics software. A three-dimensional stationary model of a TEG consisting of 127 leg pairs has been developed. The p -type leg was composed of the higher manganese silicide $\text{MnSi}_{1.75}$. The segmented n -type leg consisted of Mg_2Si on the hot side and $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$ on the cold side. The model employed modules to describe the processes of thermal transport and electrical transport, taking into account the thermoelectric effect. Thermal contact between different parts of the generator was taken into account. To analyze the influence of geometry, the height ratio of the segments varied (with $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$ ranging from 30 % to 80 % of the total leg height). According to the simulation results, the efficiency of the module with a segmented n -type leg increases to 5.3 % compared to 2.9 % for a TEG with n -type legs consisting only of Mg_2Si , at a hot-side temperature of 500 °C. With an optimized segmented-leg configuration, this temperature regime becomes acceptable, and the simulated performance is comparable to commercially available generators. The simulation results demonstrate that the proposed segmented silicide-based TEG effectively addresses the thermal stability problem of $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$. This TEG configuration substantially extends the generator operating temperature range while maintaining an acceptable level of efficiency.

Keywords

multiphysics modeling, COMSOL Multiphysics, thermoelectric generator, magnesium silicide, higher manganese silicide

For citation: Dashina Z.A., Asach A.V., Isachenko G.N., Bykovskaya E.A. Modeling of the structure and characteristics of thermoelectric generators based on magnesium compounds. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 4, pp. 732–738 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-732-738

Введение

Формирование глобальной повестки устойчивого развития, обусловленное принятием международных документов, включая Парижское соглашение по климату, привело к повышению значимости декарбонизации и снижения энергоёмкости в таких приоритетных областях, как энергетика, транспорт и промышленное производство. В настоящее время существует большой неиспользованный потенциал для рекуперации энергии в промышленности и автомобилестроении, где образуется большое количество низкопотенциального отработанного тепла [1]. Термоэлектрические устройства могут стать альтернативой для получения чистой энергии из отработанного тепла, тем самым повысив энергетическую эффективность и снизив выбросы парниковых газов [2, 3]. Традиционно в производстве среднетемпературных термоэлектрических генераторов (ТЭГ) используются токсичные соединения теллура, висмута и свинца, которые желательно заменить на экологичные аналоги. По этой причине на сегодняшний день наблюдается растущий интерес к альтернативным высокоэффективным термоэлектрическим

материалам, среди которых отдельную группу составляют силициды, поскольку они являются недорогими и нетоксичными материалами и обладают хорошими термоэлектрическими свойствами. На данное время для этих материалов заявлена максимальная безразмерная термоэлектрическая добротность (ZT) 1,6–1,7 для магниевых сплавов [4, 5] и 0,6–0,8 для соединений марганца [6, 7]. В настоящей работе рассматривается термоэлектрический модуль, состоящий из пар ветвей, где сегментированная ветвь n -типа состоит из твердого раствора силицида и стannида магния ($\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$) и силицида магния (Mg_2Si), а ветвь p -типа из высшего силицида марганца ($\text{MnSi}_{1.75}$). Конструкции такого типа неоднократно рассматривались в различных работах как на математических моделях, так и на рабочих прототипах, позволяющих оценить энергетический потенциал устройства [8–11]. Как показывают ресурсные испытания опытных образцов [9], при температуре на горячей стороне выше 400 °C наблюдается сильная деградация наиболее эффективного материала n -ветви — $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$, при этом Mg_2Si хотя и обладает более высокой стойкостью, проигрывает $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$ по эффективности. Совмещение обоих материалов в

одной, составной, ветви термоэлемента позволит расширить рабочий температурный диапазон и повысить стабильность устройства в целом.

Целью работы является оптимизация ТЭГ, содержащего сегментированную ветвь n -типа, для расширения его рабочего температурного диапазона при сохранении высокого коэффициента полезного действия (КПД). Для этого была построена трехмерная модель термоэлектрического модуля с сегментированной n -ветвью, состоящей из $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ на холодном спае и Mg_2Si на горячем спае, проведены электрические и тепловые расчеты методом конечных элементов. В результате определено распределение температуры внутри модуля, построены рабочие характеристики ТЭГ и рассчитан КПД модуля.

Материалы и методы

Численное моделирование термоэлектрических эффектов выполнено в программной среде COMSOL Multiphysics. Расчет проводился для стационарного режима работы модуля. Модель включала в себя описание процессов тепло- и электропереносов.

Процессы теплопереноса описывались уравнением:

$$\nabla \mathbf{q} = Q_e,$$

где $\mathbf{q}$ — вектор плотности теплового потока; Q_e — джоулева теплота.

Плотность теплового потока складывается из кондуктивной составляющей ($-\lambda \nabla T$), и электрической составляющей, обусловленной эффектом Пельтье ($ST\mathbf{j}$):

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T + ST\mathbf{j},$$

где λ — коэффициент теплопроводности; T — температура; S — коэффициент Зеебека; $\mathbf{j}$ — вектор плотности электрического тока.

Процессы электропереноса описывались уравнением:

$$\nabla \mathbf{j} = 0.$$

Плотность электрического тока определена наличием электрического потенциала ($-\sigma \nabla V$) и термоЭДС материала ($S\nabla T$):

$$\mathbf{j} = -\sigma \nabla V + S\nabla T,$$

где σ — коэффициент электропроводности; V — электрический потенциал.

Для определения характеристик ТЭГ выполнено моделирование подключения генератора к электрической цепи с сопротивлением R . Величина R в ходе расчета изменялась в диапазоне от 1 до 20 Ом.

Трехмерная модель модуля (рис. 1) состояла из 127 пар термоэлектрических ветвей с поперечным сечением 4 мм^2 , соединенных между собой медными коммутационными пластинами. Для выравнивания температуры на горячей и холодной сторонах ТЭГ использовались керамические пластины.

Схематичное изображение термоэлемента представлено на рис. 2. Высота ветвей 8 мм. Ветвь n -типа состоит из двух сегментов: $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ на холодной

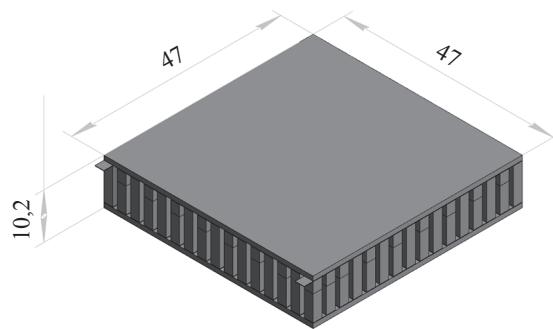


Рис. 1. Геометрическая модель термоэлектрического генератора

Fig. 1. Geometric model of thermoelectric generator

стороне и Mg_2Si на горячей стороне. Ветвь p -типа выполнена из $\text{MnSi}_{1,75}$. Термоэлектрические ветви соединены коммутационными пластинами из меди с параметрами $5 \times 2 \times 0,1 \text{ мм}$, закрепленными между двумя плоскими керамическими пластинами $47 \times 47 \times 1 \text{ мм}$. Геометрия ТЭГ выбрана исходя из классической конфигурации коммерчески доступных термоэлектрических модулей¹. Высота сегмента $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ менялась от 2,4 до 6,4 мм с интервалом 0,4 мм (от 30 % до 80 %).

Термоэлектрические свойства полупроводниковых материалов, используемых в компьютерной модели, представлены в виде температурных графиков на рис. 3. Для достижения наибольшей эффективности ТЭГ в моделировании были использованы термоэлек-

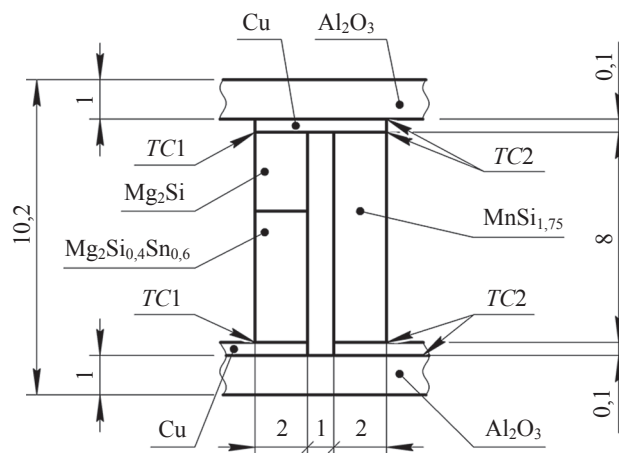


Рис. 2. Схема пары термоэлектрических ветвей термоэлектрического генератора.

TC1 — соединение термоэлектрических ветвей n -типа с коммутационными пластинами из меди; TC2 — соединение термоэлектрических ветвей p -типа с медными пластинами, соединение медных и керамических пластин

Fig. 2. Schematic diagram of a thermoelectric leg pair, TC1 is connection of n -type thermoelectric legs to copper plates; TC2 is connection of p -type thermoelectric legs to copper plates, and connection of copper and ceramic plates

¹ Низкотемпературные генераторные модули [Электронный ресурс]. URL: <https://kryothermtec.com/ru/low-temperature-generating-modules.html> (дата обращения: 26.01.2026).

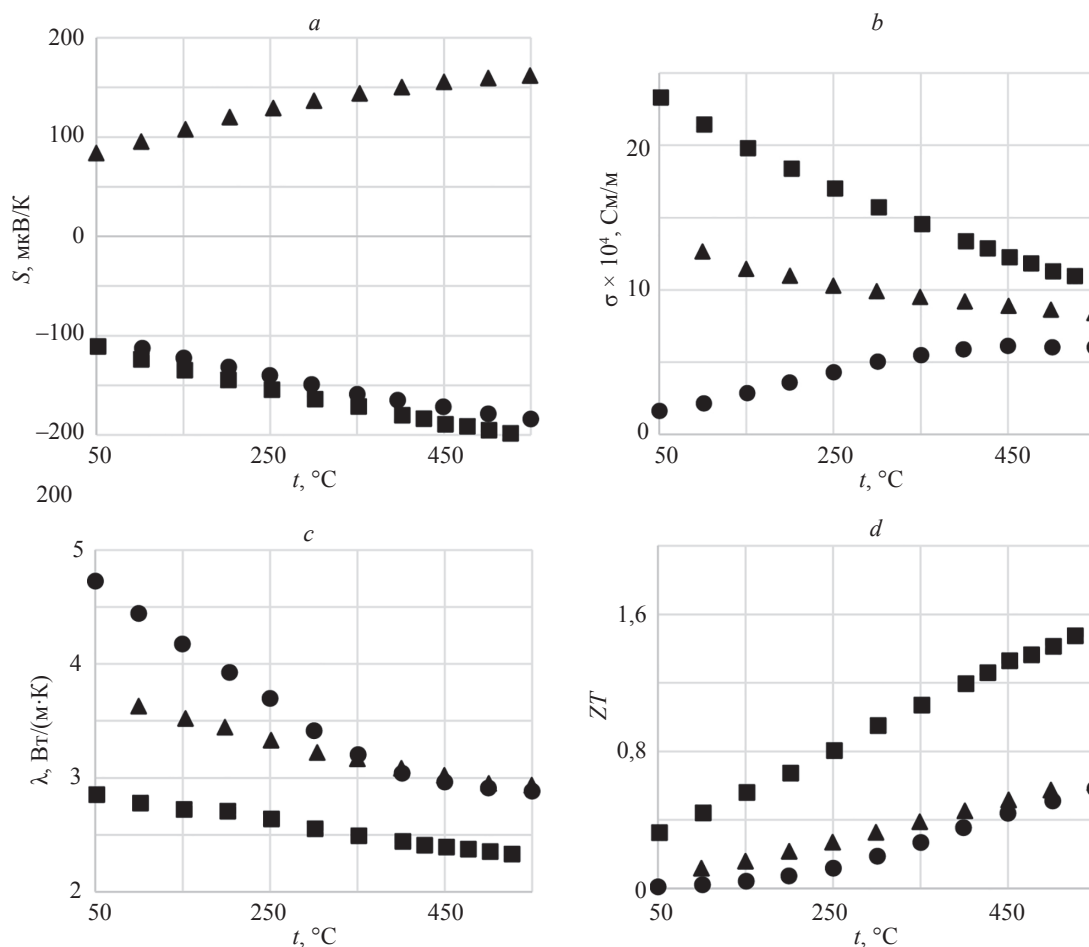


Рис. 3. Коэффициенты: Зеебека (а), электропроводности (б), теплопроводности (с); параметр безразмерной термоэлектрической добротности ZT (д) материалов термоэлектрического генератора в зависимости от температуры.

▲ — $\text{MnSi}_{1.75}$ [7]; ● — Mg_2Si (+3 %Sb) [12]; ■ — $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$ (+1,5 %Sb) [13]

Fig. 3. Temperature dependent Seebeck coefficient (a), electrical conductivity (b), thermal conductivity (c), and the thermoelectric figure of merit ZT (d) of TEG materials.

▲ is $\text{MnSi}_{1.75}$ [7], ● is Mg_2Si (+3 %Sb) [12], ■ is $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$ (+1.5 %Sb) [13]

трические свойства полупроводниковых материалов, полученных из наноструктурированного порошка путем горячего прессования или искрового плазменного спекания [7, 12, 13]. Полупроводниковые материалы n -типа, были дополнительно легированы сурьмой, для увеличения их коэффициента электропроводности. Физические свойства меди (Cu) коммутационных пластин: $\lambda_{\text{Cu}} = 400 \text{ Вт/(м·К)}$, $\sigma_{\text{Cu}} = 6 \cdot 10^3 \text{ См/см}$. В качестве материала керамической пластины выбран оксид алюминия (Al_2O_3) со свойствами $\lambda_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 35 \text{ Вт/(м·К)}$, $\sigma_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10^{-12} \text{ См/см}$. В рассматриваемой модели термоэлектрические свойства керамических и медных пластин не учитываются ($S = 0 \text{ В/К}$).

Граничными условиями теплообмена выбраны граничные условия первого рода для горячей и холодной сторон термоэлемента и адиабатическая изоляция для боковых поверхностей модуля. Температура t_c на холодной стороне ТЭГ принималась равной 115°C , температура t_h на горячей стороне — 500°C . Температуры выбраны исходя из заявленных значений рабочих температур коммерчески доступных среднетемпературных

ТЭГ¹. Места теплового контакта разнородных материалов моделировались путем задания теплофизических свойств тонкого слоя контактного припоя. Для соединения термоэлектрических ветвей n -типа с коммутационными пластинами из меди (TC1) задавалась нержавеющая сталь SS304. Соединение термоэлектрических ветвей p -типа с медными пластинами, а также соединение медных и керамических пластин (TC2) моделировалось серебряной пастой для пайки (рис. 2). Каждому слою задавалась толщина и теплопроводность материала. Для нержавеющей стали SS304 толщина 50 мкм и теплопроводность $16,3 \text{ Вт/(м·К)}$, для серебряной пасты для пайки — 20 мкм и $151,6 \text{ Вт/(м·К)}$, соответственно [8, 14, 15].

Граничные условия для электрических явлений определены следующим образом. Первый вывод, пред-

¹ Среднетемпературные генераторные модули серии Mars. Kryotherm [Электронный ресурс]. URL: <https://kryothermtec.com/ru/medium-temperature-generating-modules-mars-series.html> (дата обращения: 26.01.2026).

ставляющий собой медную пластину, соединенную с полупроводниковым материалом n -типа, используется в качестве заземления, поддерживая электрический потенциал на уровне 0 В. Противоположный вывод — медная пластина, соединенная с полупроводниковым материалом p -типа, используется как электрический контакт, подключенный к цепи с переменным сопротивлением, выполняющим функцию внешней нагрузки.

Результаты

На первом этапе численного моделирования проводилось определение оптимального соотношения высот сегментов n -ветви ТЭГ. Так как $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ имеет лучшие термоэлектрические характеристики, но начинает разрушаться при температурах свыше 400°C , необходимо определить такую высоту сегмента, при которой $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ будет иметь максимально возможное содержание в n -ветви, но его температура на границе с Mg_2Si не будет превышать указанную температуру. С этой целью было проведено численное моделирование ТЭГ с различным соотношением высот сегментов n -ветви. Высота сегмента $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ менялась от 2,4 до 6,4 мм с интервалом 0,4 мм (от 30 % до 80 %). График зависимости температуры на границе сегментов от высоты сегмента $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ представлен на рис. 4.

Из графика (рис. 4) видно, что зависимость температуры от высоты сегмента имеет явно выраженный линейный характер. Это можно объяснить тем, что при высоких температурах теплопроводности $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ и Mg_2Si близки друг другу по своему значению (рис. 3). При высоте сегмента равной 5,6 мм температура в месте контакта сегментов равна 393°C , что соответствует оптимальному распределению температуры по высоте сегментированной ветви.

На втором этапе численного моделирования выполнен расчет рабочих характеристик ТЭГ с геометрией,

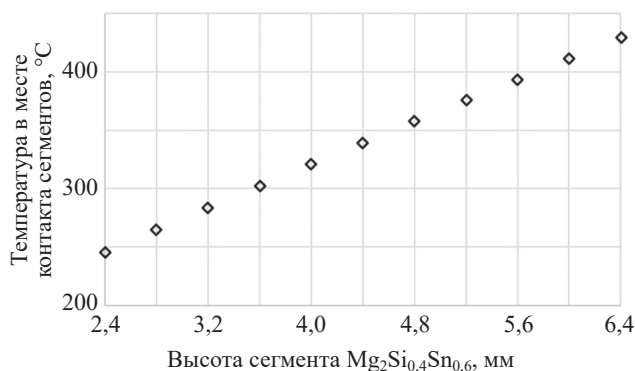


Рис. 4. Зависимость температуры в месте контакта сегментов от высоты сегмента $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$

Fig. 4. Temperature at the segment interface as a function of $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ segment height

показанной на рис. 1, и высотой сегмента $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ равной 5,6 мм. Для этого моделировалось подключение внешнего нагрузочного сопротивления (R) к выводам генератора. Величина сопротивления изменялась с 1 до 20 Ом с шагом 0,5 Ом. Отдельно моделировались случаи короткого замыкания ТЭГ ($R \rightarrow 0$) и работы без нагрузки ($R \rightarrow \infty$). По результатам моделирования рассчитаны значения тока (I), протекающего через нагрузочное сопротивление, напряжения (U) на выводах ТЭГ, а также подводимый к генератору тепловой поток (Q_h). Эффективность работы ТЭГ оценивалась КПД η по формуле:

$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{I^2 R}{Q_h},$$

где P — электрическая мощность, отдаваемая ТЭГ.

Для оценки полезного эффекта от сегментирования n -ветви модуля дополнительно было проведено моделирование генератора, n -ветвь которого состоит пол-

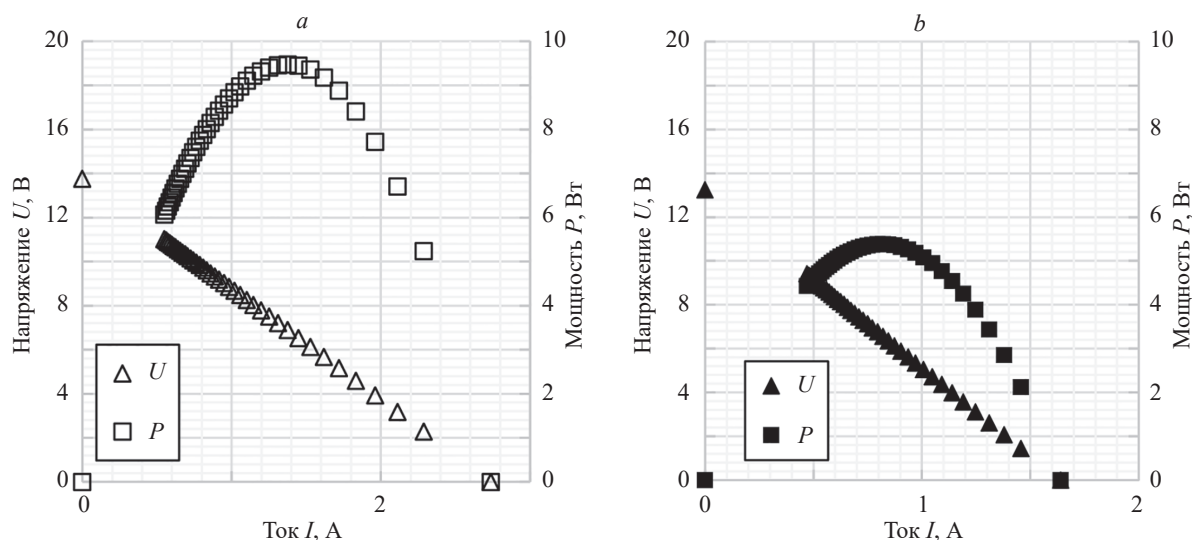


Рис. 5. График зависимости напряжения на нагрузке (U) и выходной мощности (P) от тока через нагрузку для генератора с сегментированной (а) и несегментированной (б) ветвей

Fig. 5. Dependence of the voltage on the load (U) and the output power (P) on the current through the load for a generator with a segmented leg (a) and homogenous leg (b)

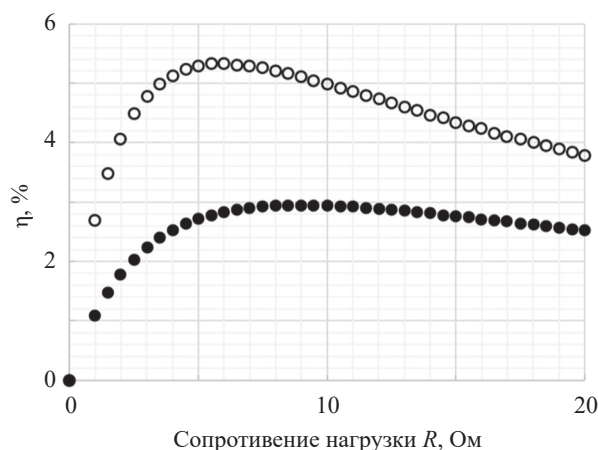


Рис. 6. График зависимости коэффициента полезного действия (η) от сопротивления нагрузки для генератора с сегментированной ($\circ$) и несегментированной ($\bullet$) ветвей

Fig. 6. Dependence of efficiency on load resistance for a generator with a segmented leg ($\circ$) and homogenous leg ($\bullet$)

ностью из Mg_2Si . На основании полученных величин построены базовые характеристики двух генераторных модулей (рис. 5 и 6).

Максимальная выходная мощность генераторного модуля с сегментированной ветвью достигает 9,5 Вт при сопротивлении нагрузки равной 5 Ом. При таком сопротивлении напряжение на нагрузке равняется 6,9 В, ток через нагрузку — 1,38 А. Данные показатели существенно превышают аналогичные значения ТЭГ без сегментированной ветви (с n -ветвью, состоящей исключительно из Mg_2Si). Так при равных рабочих температурах на сторонах модуля, оптимальном режиме работы модуля (максимальный КПД) и сопоставимых значениях напряжения на нагрузке, значение тока увеличено на 68 %, а выходная мощность на 76 %. Максимально возможное значение КПД увеличено с 2,9 % до 5,3 %.

Значение КПД на уровне 5,3 % сопоставимо с коммерчески доступными среднетемпературными ТЭГ. Генератор «Fobos-55» компании «Криотерм» при идентичных рабочих температурах обладает КПД равным 6,2 % и выходной мощностью 55 Вт, что составляет около 0,47 Вт/см² рабочей поверхности. При

этом моделируемый генератор имеет значение около 0,43 Вт/см².

Выводы

По результатам численного моделирования сегментированного силицидного ТЭГ можно сделать следующие выводы. Во-первых, при температуре 115 °С на холодной стороне и 500 °С на горячей оптимальная высота сегмента, состоящего из $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ равна 5,6 мм. Из-за схожих значений коэффициентов теплопроводности этих материалов зависимость температуры в месте контакта сегментов от высоты сегмента имеет линейный характер. Во-вторых, переход от однородной ветви к сегментированной ветви увеличивает КПД устройства почти в два раза. При оптимальном режиме работы модуль имеет следующие параметры: сопротивление нагрузки $R = 5,0$ Ом, напряжение $U = 6,9$ В, ток $I = 1,38$ А, $\eta = 5,3$ %. Данные значения существенно превышают аналогичные у силицидного модуля с n -ветвью, состоящей исключительно из Mg_2Si .

Заключение

По своим характеристикам генератор с сегментированной n -ветвью сопоставим с коммерчески доступными среднетемпературными термоэлектрическими генераторами, работающими в аналогичном температурном диапазоне. Рассчитанное значение коэффициента полезного действия модуля получено для материалов со свойствами, взятыми из сторонних источников, которые могут быть не оптимальными для рассматриваемой задачи. После проведения подробной оптимизации и подбора материалов с соответствующими свойствами, коэффициент полезного действия модуля может быть значительно увеличен.

Следует обратить внимание на то, что высота сегмента зависит как от рабочего температурного диапазона, так и от высоты ветви. Следовательно, для каждого отдельного модуля необходимо проводить повторный расчет оптимальной высоты сегмента. Однако, ввиду явно выраженной линейной зависимости температуры в месте контакта сегментов от высоты сегмента, подобный расчет в последующем может быть проведен аналитическими методами без применения численного моделирования.

Литература

1. Saidur R., Rezaei M., Muzammil W.K., Hassan M.H., Paria S., Hasanuzzaman M. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. V. 16. N 8. P. 5649–5659. doi: 10.1016/j.rser.2012.05.018
2. He J., Tritt T.M. Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward // *Science*. 2017. V. 357. N 6358. P. eaak9997. doi: 10.1126/science.aak9997
3. Olabi A.G., Al-Murisi M., Maghrabie H.M., Yousef B.A.A., Sayed E.T., Alami A.H., et al. Potential applications of thermoelectric generators (TEGs) in various waste heat recovery systems // *International Journal of Thermofluids*. 2022. V. 16. P. 100249. doi: 10.1016/j.ijft.2022.100249
4. Wang B., Zhao H., Li J., Zhang B., Wang D., Chen C., et al. Enhanced thermoelectric performance of Sb-doped $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ via doping,

References

1. Saidur R., Rezaei M., Muzammil W.K., Hassan M.H., Paria S., Hasanuzzaman M. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, no. 8, pp. 5649–5659. doi: 10.1016/j.rser.2012.05.018
2. He J., Tritt T.M. Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward. *Science*, 2017, vol. 357, no. 6358, pp. eaak9997. doi: 10.1126/science.aak9997
3. Olabi A.G., Al-Murisi M., Maghrabie H.M., Yousef B.A.A., Sayed E.T., Alami A.H., et al. Potential applications of thermoelectric generators (TEGs) in various waste heat recovery systems. *International Journal of Thermofluids*, 2022, vol. 16, pp. 100249. doi: 10.1016/j.ijft.2022.100249
4. Wang B., Zhao H., Li J., Zhang B., Wang D., Chen C., et al. Enhanced thermoelectric performance of Sb-doped $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,4}\text{Sn}_{0,6}$ via doping,

- alloying and nanoprecipitation // *Journal of Materiomics*. 2024. V. 10. N 2. P. 285–292. doi: 10.1016/j.jmat.2023.06.001
5. Goyal G.K., Mukherjee S., Mallik R.C., Vitta S., Samajdar I., Dasgupta T. High thermoelectric performance in $\text{Mg}_2(\text{Si}_{0.3}\text{Sn}_{0.7})$ by enhanced phonon scattering // *ACS Applied Energy Materials*. 2019. V. 2. № 3. P. 2129–2137. doi: 10.1021/acsae.8b02148
6. Федоров М.И. Термоэлектрические силициды: прошлое, настоящее и будущее // *Термоэлектричество*. 2009. № 2. С. 53–64.
7. Кузнецов Ю.М., Дорохин М.В., Калентьева И.Л., Здоревейшев А.В., Демина П.Б., Ерофеева И.В. [и др.] Синтез и термоэлектрические свойства высшего силицида марганца // *Физика и техника полупроводников*. 2024. Т. 58. № 7. С. 376–380. doi: 10.61011/FTP.2024.07.59181.6350H
8. Mouko H.I., Romanjek K., Mejri M., Oulfarsi M., El Oualid S., Malincon P., et al. Manufacturing and performances of silicide-based thermoelectric modules // *Energy Conversion and Management*. 2021. V. 242. P. 114304. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114304
9. Mejri M., Malard B., Thimont Y., Romanjek K., Mouko H.I., Estournès C. Thermal stability of $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.55}\text{Sn}_{0.45}$ for thermoelectric applications // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. V. 846. P. 156413. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.156413
10. Skomedal G., Holmgren L., Middleton H., Eremin I.S., Isachenko G.N., Jaegle M., et al. Design, assembly and characterization of silicide-based thermoelectric modules // *Energy Conversion and Management*. 2016. V. 110. P. 13–21. doi: 10.1016/j.enconman.2015.11.068
11. Brito F.P., Peixoto J.S., Martins J., Gonçalves A.P., Louca L., Vlachos N., et al. Analysis and design of a silicide-tetrahedrite thermoelectric generator concept suitable for large-scale industrial waste heat recovery // *Energies*. 2021. V. 14. N 18. P. 5655. doi: 10.3390/en14185655
12. Jung J.Y., Kim I.H. Synthesis and thermoelectric properties of *n*-Type Mg_2Si // *Electronic Materials Letters*. 2010. V. 6. N 4. P. 187–191. doi: 10.3365/eml.2010.12.187
13. Guo W., Li J., Pan H., Deng Y., Chen B., Jing R., et al. Improving *n*-type thermoelectric performance of $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$ compounds via high pressure and Sb-doping // *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. V. 1002. P. 175366. doi: 10.1016/j.jallcom.2024.175366
14. Jayachandran B., Prasanth B., Gopalan R., Dasgupta T., Sivaprahasam D. Thermally stable, low resistance $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}/\text{Cu}$ thermoelectric contacts using SS 304 interlayer by one step sintering // *Materials Research Bulletin*. 2021. V. 136. P. 111147. doi: 10.1016/j.materresbull.2020.111147
15. Ordonez-Miranda J., Hermens M., Nikitin I., Kouznetsova V.G., van der Sluis O., Ras M.A., et al. Measurement and modeling of the effective thermal conductivity of sintered silver pastes // *International Journal of Thermal Sciences*. 2016. V. 108. P. 185–194. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.05.014
- alloying and nanoprecipitation. *Journal of Materiomics*, 2024, vol. 10, no. 2, pp. 285–292. doi: 10.1016/j.jmat.2023.06.001
5. Goyal G.K., Mukherjee S., Mallik R.C., Vitta S., Samajdar I., Dasgupta T. High thermoelectric performance in $\text{Mg}_2(\text{Si}_{0.3}\text{Sn}_{0.7})$ by enhanced phonon scattering. *ACS Applied Energy Materials*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 2129–2137. doi: 10.1021/acsae.8b02148
6. Fedorov M.I. Thermoelectric silicides: past, present and future. *Journal of Thermoelectricity*, 2009, no. 2, pp. 51–60.
7. Kuznetsov Yu.M., Dorokhin M.V., Kalentyeva I.L., Zdoroveyshchev A.V., Demina P.B., Erofeeva I.V., et al. Synthesis and thermoelectric properties of higher manganese silicide. *Semiconductors*, 2024, vol. 58, no. 7, pp. 345–350. doi: 10.61011/SC.2024.07.59543.6350H
8. Mouko H.I., Romanjek K., Mejri M., Oulfarsi M., El Oualid S., Malincon P., et al. Manufacturing and performances of silicide-based thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 242, pp. 114304. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114304
9. Mejri M., Malard B., Thimont Y., Romanjek K., Mouko H.I., Estournès C. Thermal stability of $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.55}\text{Sn}_{0.45}$ for thermoelectric applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, vol. 846, pp. 156413. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.156413
10. Skomedal G., Holmgren L., Middleton H., Eremin I.S., Isachenko G.N., Jaegle M., et al. Design, assembly and characterization of silicide-based thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 110, pp. 13–21. doi: 10.1016/j.enconman.2015.11.068
11. Brito F.P., Peixoto J.S., Martins J., Gonçalves A.P., Louca L., Vlachos N., et al. Analysis and design of a silicide-tetrahedrite thermoelectric generator concept suitable for large-scale industrial waste heat recovery. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 18, pp. 5655. doi: 10.3390/en14185655
12. Jung J.Y., Kim I.H. Synthesis and thermoelectric properties of *n*-Type Mg_2Si . *Electronic Materials Letters*, 2010, vol. 6, no. 4, pp. 187–191. doi: 10.3365/eml.2010.12.187
13. Guo W., Li J., Pan H., Deng Y., Chen B., Jing R., et al. Improving *n*-type thermoelectric performance of $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$ compounds via high pressure and Sb-doping. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 1002, pp. 175366. doi: 10.1016/j.jallcom.2024.175366
14. Jayachandran B., Prasanth B., Gopalan R., Dasgupta T., Sivaprahasam D. Thermally stable, low resistance $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}/\text{Cu}$ thermoelectric contacts using SS 304 interlayer by one step sintering. *Materials Research Bulletin*, 2021, vol. 136, pp. 111147. doi: 10.1016/j.materresbull.2020.111147
15. Ordonez-Miranda J., Hermens M., Nikitin I., Kouznetsova V.G., van der Sluis O., Ras M.A., et al. Measurement and modeling of the effective thermal conductivity of sintered silver pastes. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, vol. 108, pp. 185–194. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.05.014

Авторы

Дашина Злата Александровна — лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0003-6235-7187>, zлата.dashina@yandex.ru

Асач Алексей Владимирович — кандидат технических наук, старший преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57023883800](https://orcid.org/57023883800), <https://orcid.org/0000-0001-9509-2048>, avasach@itmo.ru

Исаченко Григорий Николаевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 14066141100](https://orcid.org/14066141100), <https://orcid.org/0000-0002-1763-4224>, g.isachenko@mail.ioffe.ru

Быковская Елена Александровна — старший преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57213518219](https://orcid.org/0009-0000-9610-9155), <https://orcid.org/0009-0000-9610-9155>, eabykovskaia@itmo.ru

Authors

Zlata A. Dashina — Laboratory Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-6235-7187>, zлата.dashina@yandex.ru

Alexey V. Asach — PhD, Senior Lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57023883800](https://orcid.org/57023883800), <https://orcid.org/0000-0001-9509-2048>, avasach@itmo.ru

Grigory N. Isachenko — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 14066141100](https://orcid.org/14066141100), <https://orcid.org/0000-0002-1763-4224>, g.isachenko@mail.ioffe.ru

Elena A. Bykovskaya — Senior Lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57213518219](https://orcid.org/0009-0000-9610-9155), <https://orcid.org/0009-0000-9610-9155>, eabykovskaia@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 13.02.2025
Одобрена после рецензирования 01.05.2026
Принята к печати 20.07.2026

Received 13.02.2025
Approved after reviewing 01.05.2026
Accepted 20.07.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»