



УДК 538.953-405

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОХЛАЖДАЮЩИЙ МОДУЛЬ С ДЕМПФИРУЮЩИМ ПРОВОДНИКОМ НА ХОЛОДНЫХ СПЯХ

А.А. Касьянов^{a,b}, Г.Н. Исаченко^{b,c}, К.Л. Самусевич^b^a ООО «Криотерм», 197348, Санкт-Петербург, Российская Федерация^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^c Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

Адрес для переписки: kas.43@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 10.12.18, принята к печати 26.02.19

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-229-235

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Касьянов А.А., Исаченко Г.Н., Самусевич К.Л. Термоэлектрический охлаждающий модуль с демпфирующим проводником на холодных спаях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 229–235. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-229-235

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты исследования термоэлектрического охлаждающего модуля с демпфирующим тепло- и электропроводящим веществом на холодных спаях. В качестве материала термоэлектрического элемента использован теллурид, синтезированный в печи плавления. Размер термоэлектрического элемента 2,0×2,0×1,5 мм. Модули монтировались на керамические пластины размером 30×30×0,89 мм из 96 %-ного Al₂O₃. В качестве материала коммутационных шин использована медь, покрытая слоем никеля. Модули крепились на плату пайкой. В качестве сборочного припоя использовалась оловянно-висмутовая паяльная паста ($T_{пл} = 139$ °С). **Методы.** Для повышения эффективности теплового контакта термоэлектрического модуля, работающего в условиях большого температурного градиента между горячей и холодной сторонами термоэлектрического элемента, особенно у элементов *n*-типа, на горячих спаях предложено использовать упругий электропроводящий клей на основе силикона с удельным сопротивлением 0,02 Ом/см, плотностью 3,7 г/см³, теплопроводностью 2,1 Вт/(м·К). Токопроводящий силиконовый клей-герметик EX-A302L состоял из однокомпонентного силикона холодной вулканизации с вкраплениями токопроводящих микрогранул. Рабочая температура от –50 до +120 °С позволяет применять этот клей как для обычных холодильных модулей, так и для холодного спая среднетемпературных модулей. Предложена поэтапная технология сборки модуля. **Основные результаты.** Проведены сравнительные испытания экспериментального термоэлектрического модуля и стандартного промышленного термоэлектрического модуля ТВ-31-2.0-1.5 на измерительных установках производства ООО «Криотерм». Целостность модулей проверялась на тепловизоре Testo. Установлено, что разница между рабочими характеристиками экспериментального и промышленного модулей не превышает 10 %, что лежит в пределах допустимой нормы. Выявлено, что динамика разрушения модулей после температурного циклирования фактически одинакова. **Практическая значимость.** Полученные результаты демонстрируют возможность использования электропроводящего клея в качестве контактного слоя для термоэлемента. Предложенная технология позволит использовать в ветвях термоэлектрических модулей материалы с различными коэффициентами температурного расширения, что повысит коэффициент полезного действия термоэлектрического устройства.

Ключевые слова

термоэлектричество, термоэлектрический модуль, силициды, электропроводный силикон, коэффициент теплового расширения

Благодарности

Эксперимент и измерения проводились в ООО «Криотерм».

THERMOELECTRIC COOLING MODULE WITH DAMPING CONDUCTOR ON COLD SPAYS

A.A. Kasianov^{a,b}, G.N. Isachenko^{b,c}, K.L. Samusevich^b^aKryotherm Company, LLC, 197348, Saint Petersburg, Russian Federation^bITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^cIoffe institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

Corresponding author: kas.43@mail.ru

Article info

Received 10.12.18, accepted 26.02.19

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-229-235

Article in Russian

For citation: Kasianov A.A., Isachenko G.N., Samusevich K.L. Thermoelectric cooling module with damping conductor on cold spays. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 229–235 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-229-235

Abstract

Subject of Research. The paper presents results of study on a thermoelectric cooling module with damping heat and electrically conductive material for cold junctions. Telluride obtained by synthesis in a melting furnace is used as a thermoelectric element material. The size of a thermoelectric element is 2.0×2.0×1.5 mm. The modules were mounted on ceramic plates made of 96% Al₂O₃ with dimensions of 30×30×0.89 mm. Copper coated with a layer of nickel is used as the switching bus material. Modules were attached to the board by soldering. Tin and bismuth solder paste (melting point is equal to 139°C) was used as an assembly solder alloy. An electrically conductive EX-A302L silicone with specific resistance of 0.02 Ohm/cm, density of 3.7 g/cm³ and thermal conductivity of 2.1 W/(m·K) was used for the damping compound. **Methods.** For efficiency increase of a thermal contact of a thermoelectric module, associated with large temperature gradient between hot and cold energy, especially for electrical *n*-elements, it is recommended to use an elastic electrically conductive adhesive. Elastic conductive adhesive based on silicone is proposed. Conductive silicone EX-A302L adhesive sealant consisted of single-component cold-vulcanized silicone with splashes of conductive microgranules. Working temperature from –50 to +120 °C allows for the application of this adhesive both for conventional refrigeration modules, and for the cold junction of medium-temperature modules. A phased module assembly technology is developed. **Main Results.** Comparative tests are carried out for the experimental thermoelectric module and the standard industrial module of TB-31-2.0-1.5 thermoelectric module at measuring installations manufactured by Kryotherm company. The integrity of the modules was tested on Testo thermal imager. It is established that the difference between the working characteristics of experimental and industrial modules does not exceed 10% and lies within the permissible limits. It is found out that destruction dynamics of the modules after temperature cycling is virtually the same. **Practical Relevance.** The results obtained demonstrate the application possibility of electrically conductive adhesive as a contact layer for a thermoelement. The proposed technology will allow for replacing the materials of thermoelectric module branches with more efficient ones, but having different coefficients of temperature expansion, thereby increasing the efficiency of the thermoelectric device.

Keywords

thermoelectricity, thermoelectric module, silicides, electrically conductive silicone, thermal expansion coefficient

Acknowledgements

The experiment and measurements were carried out in Kryotherm Company.

Введение

Термоэлектрические устройства, построенные на взаимобратных эффектах Зеебека и Пельтье, используемые для генерации электрической энергии или в качестве теплового насоса, устойчиво занимают свою нишу среди устройств малой энергетики. Одним из главных преимуществ таких конструкций является отсутствие движущихся частей, что повышает их надежность и избавляет от необходимости регулярного обслуживания, в то же время главным недостатком таких устройств является низкий КПД.

Эффективность преобразования энергии в этих устройствах зависит от термоЭДС (α), электропроводности (σ) и теплопроводности (κ) материалов ветвей. Эти коэффициенты определяют показатель термоэлектрической добротности $ZT = T\alpha^2\sigma/\kappa$, где T – температура. Чем выше ZT , тем выше КПД устройства или достижимый перепад температур. Традиционно используются надежные материалы на основе теллуридов с термоэлектрической добротностью порядка единицы. Для повышения КПД устройств в настоящее время активно ведется разработка новых материалов с более высокими значениями ZT . Среди них силициды, которые привлекают внимание и с научной и с практической точки зрения. Так, стоимость, токсичность и масса силицидов меньше, чем у теллуридов, а их большая доступность и высокая термоэлектрическая эффективность являются значительным преимуществом [1–3]. Однако применение новых материалов с высокими значениями ZT в термоэлектрических устройствах затрудняет, в частности, необходимость согласования разнородных материалов в одном модуле, работающем при значительном градиенте температур.

Классическая конструкция термоэлектрического модуля представляет собой зажатые между параллельными керамическими пластинами соединенные между собой термоэлементы П-образной формы, образованные ветвями с различным типом проводимости. При таком исполнении напряжения термоЭДС ветвей складываются. Чаще всего, поскольку термоэлектрическая добротность определяется зонной структурой, и значение ZT будет максимальным только для одного типа проводимости, в одном термоэлементе используется пара разнородных материалов. Однако механические напряжения, возникающие вследствие различия коэффициентов термических расширений материалов ветвей, ограничивают функциональные возможности при эксплуатации термоэлектрического модуля. «Узким местом» в ветвях термоэлементов материалов различающегося состава являются контакты.

На сегодняшний день в большинстве высокопроизводительных силицидных термоэлектриков используются твердые растворы Mg₂(Si-Sn) *n*-типа проводимости с ZT до 1,5 [4–7]. Из известных силицидов *p*-типа проводимости наиболее эффективными являются силициды марганца, имеющие пиковые значения $ZT=0,6–0,8$ [8]. Одной из главных проблем соединения этих материалов в пары

термоэлектрических элементов (ТЭЭ) является разный коэффициент теплового расширения (КТР) материалов. Для материала *n*-типа $Mg_2(Si-Sn)$ $КТР=(16-18)\cdot 10^{-6} K^{-1}$, в то время как для *p*-типа $КТР=(9-13)\cdot 10^{-6} K^{-1}$ [6, 9–11]. Подобная разница неизбежно приводит к деформации термоэлектрического модуля (ТЭМ), что, в свою очередь, может привести к разрушению ТЭЭ. Такие напряжения вследствие большого температурного градиента между горячей и холодной сторонами свойственны ТЭЭ *n*-типа на горячих спаях [12–14]. В качестве решения проблемы проводились исследования ТЭМ только на ТЭЭ *n*-типа Mg_2Si [15–17]. Подобные ТЭМ демонстрировали высокие стабильность и надежность, но имели довольно низкую эффективность при мощности на единицу площади около 22 Вт/см^2 и разности температур $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Конструкции ТЭМ с использованием пружинных контактов на холодных спаях уменьшают несоответствие между *p*- и *n*-ветвями с разными КТР [18]. При этом нарушается тепловой контакт, и эффективность такой конструкции снижается. Для преодоления этой проблемы необходим упругий электропроводящий контакт с возможностью эффективного отвода тепла. Эластичный токопроводящий силикон и клей на его основе отвечают требованиям к контакту термоэлемента. Токопроводящий силиконовый клей-герметик EX-A302L состоит из однокомпонентного силикона холодной вулканизации с вкраплениями токопроводящих микрогранул. Удельное сопротивление за счет серебряных гранул на медном подслое составляет $0,02-0,03 \text{ Ом/см}$. Рабочая температура от -50 до $+120 \text{ }^\circ\text{C}$ позволяет применять этот клей как для обычных холодильных модулей, так и для холодного спая среднетемпературных модулей. Для оценки целесообразности и эффективности замены жесткого электрического контакта на силиконовый проведены испытания на экспериментальном ТЭМ, конструктивно и геометрически схожем со стандартным промышленным ТЭМ типа ТВ-31-2.0-1.5. Модули различались только типом электрического контакта, испытания проводились в одинаковых условиях.

Конструкция и сборка ТЭМ

Используемый в ТЭЭ теллурид получен синтезом в печи плавления. Размер ветвей ТЭЭ – $2,0\times 2,0\times 1,5$ мм. Размер керамических пластин из 96 %-ного Al_2O_3 $30\times 30\times 0,89$ мм (Китай). Коммутационные медные шины, покрытые никелем, имеют размеры $5,7\times 0,2\times 0,3$ мм. В качестве сборочного припоя использовалась оловянно-висмутовая паяльная паста с $T_{пл} = 139 \text{ }^\circ\text{C}$. Для демпфирующего соединения использовался электропроводный силикон EX-A302L с удельным сопротивлением $0,02 \text{ Ом/см}$, плотностью $3,7 \text{ г/см}^3$, теплопроводностью $2,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

За основу было решено взять стандартный ТЭМ ТВ-31-2.0-1.5 размерами $30\times 30\times 4,8$ мм. На металлизированные керамические пластины были припаяны коммутационные облуженные медные шины, после чего с использованием специализированной оснастки на «горячую» керамическую пластину с шинами припаяли заранее собранную по коммутационной схеме цепь ветвей ТЭЭ. Получилась заготовка в виде «ежика», без «холодной» пластины (рис. 1). Затем через квадратные отверстия в трафаретах, расположенных в шахматном порядке, на специальном принтере нанесли на поверхность ветвей ТЭЭ *p*-типа «ежика» паяльную пасту. На ответную заготовку «холодной» керамической пластины через квадратные отверстия трафарета нанесли электропроводный силикон таким образом, чтобы при совмещении с «ежиком» силикон контактировал с ветвями ТЭЭ *n*-типа. Далее две заготовки совместили в специальной силиконовой оснастке и провели пайку в конвейерной печи при $T_{пл} = 260 \text{ }^\circ\text{C}$. После этого ТЭМ подвергся шлифованию на плоскошлифовальном станке для достижения плоскостности контактных поверхностей 20 мкм и параллельности между поверхностями 30 мкм .

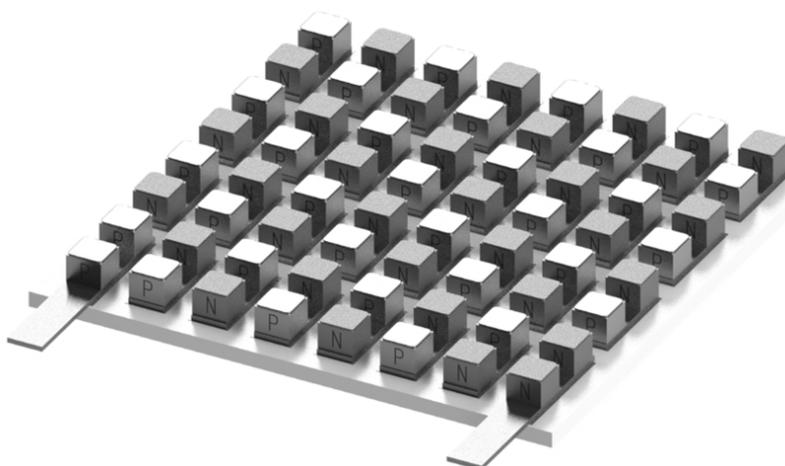


Рис. 1. Промежуточная стадия сборки экспериментального термоэлектрического модуля

На рис. 2 приведен промышленный ТЭМ ТВ-31-2.0-1.5. На рис. 3 изображен аналогичный ТЭМ с электропроводным силиконом на холодных саях ветвей ТЭЭ л-типа. Заметна разница контактов на холодных саях стандартного ТЭМ.

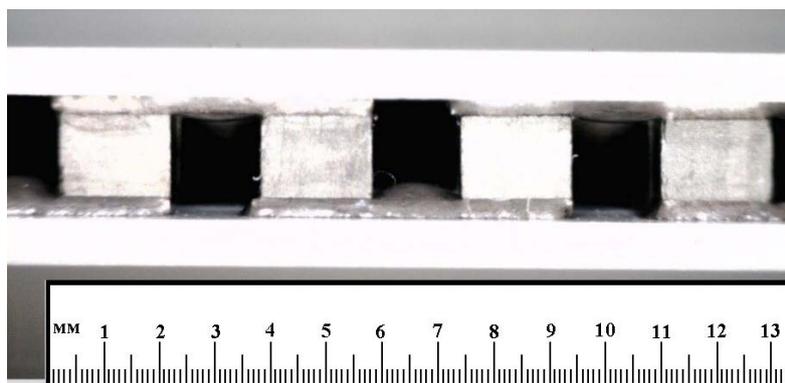


Рис. 2. Стандартный термоэлектрический модуль ТВ-31-2.0-1.5 промышленного производства

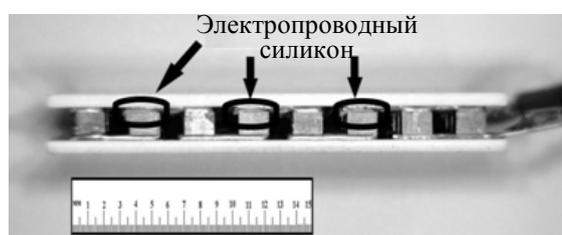


Рис. 3. Термоэлектрический модуль ТВ-31-2.0-1.5, собранный с электропроводным силиконом на холодных саях

Испытания ТЭМ

После сборки и шлифовки проведен ряд сравнительных испытаний экспериментального и стандартного ТЭМ ТВ-31-2.0-1.5 на измерительных установках (рис. 4) производства ООО «Криотерм».

ТЭМ были установлены «горячей» стороной на радиаторы установки. Между ТЭМ и радиаторами поместили термопрокладку для обеспечения наилучшего термоконтакта. На «холодную» сторону модуля установили алюминиевую тепловую нагрузку размером 40×40×4 мм, также поместив термопрокладку между модулем и нагрузкой. В отверстие в пластине тепловой нагрузки установили термопару типа L для измерения температуры. На тепловую нагрузку установили текстолитовую термоизоляцию, на которую поместили прижимную шайбу для обеспечения равномерного распределения давления прижимного винта. Сверху установили общую термоизоляцию для изолирования ТЭМ от окружающей среды. Далее установили крепления, и через динамометрическую отвертку обеспечили равномерный прижим всех ТЭМ. Затем установили температуру параметров цикла от 40 до 90 °С, после чего задали температуру включения вентилятора охлаждения через соответствующий канал терморегулятора.



Рис. 4. Установка термоциклирования

Параметры ТЭМ и результаты испытания после 1200 циклов представлены в таблице.

Параметры термоэлектрических модулей после измерений

Параметры	ТВ-31-2.0-1.5 Стандартный	ТВ-31-2.0-1.5 Экспериментальный
Ток нагрузки, А	0,69	0,69
Напряжение нагрузки, В	20	20
Сопротивление, Ом	0,23	0,23
Мощность нагрузки, Вт	0,12	0,12
Температура «горячей» стороны ТЭМ, °С	27,03	26,85
Температура «холодной» стороны ТЭМ, °С	-42,22	-34,95
Максимальная разница температур «горячей» и «холодной» стороны (при 27 °С), °С	69,24	61,86
Максимальная холодильная мощность, Вт	28,3	24,5

Из полученных результатов можно сделать вывод, что разница между характеристиками экспериментального и промышленного ТЭМ составляет приблизительно 10 %, что не является критичным.

После измерений производительности оба ТЭМ проверили на тепловизоре Testo. На рис. 5 выделены холодильные области ТЭМ. На экспериментальном ТЭМ можно заметить небольшие белые пятна, что характеризует уменьшение холодильной мощности в данных областях, вызванное, в частности, погрешностями сборки ТЭМ. В целом изображения с тепловизора подтверждают работоспособность обоих ТЭМ.

После испытания оба ТЭМ снова проверили на тепловизоре.

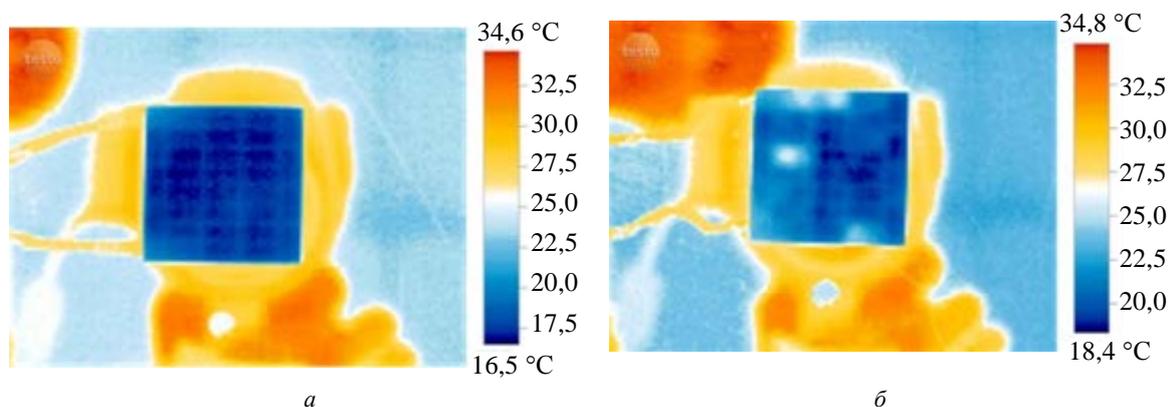


Рис. 5. Стандартный (а) и экспериментальный (б) термоэлектрические модули ТВ-31-2.0-1.5 на тепловизоре перед температурным циклированием

Заключение

В исследовании оценены конструкция, производительность и рабочие характеристики термоэлектрического охлаждающего модуля, собранного с использованием демпфирующего элемента в виде электропроводного силикона на холодных спаях ветвей термоэлектрических элементов *n*-типа. Разница между параметрами промышленного и экспериментального термоэлектрических модулей составляет не более 10 %, из чего можно считать эксперимент удачным. Недостатки можно списать на несовершенство технологии сборки подобных термоэлектрических модулей и, как следствие, недостаточных площадей контактов электропроводного силикона с ветвями термоэлектрических элементов и контактными шинами термоэлектрических модулей, что видно из термограммы тепловизора. В целом, как показывают результаты испытаний модулей, подобная конструкция и технология сборки термоэлектрических модулей являются работоспособными и их можно применять для сборки более производительных термоэлектрических модулей на основе силицидов с ветвями термоэлементов, имеющими разные коэффициенты теплового расширения на элементах *p*- и *n*-типа.

Литература

- Amatya R., Ram R.J. Trend for thermoelectric materials and their Earth abundance // *Journal of Electronic Materials*. 2012. V. 41. N 6. P. 1011–1019. doi: 10.1007/s11664-011-1839-y
- LeBlanc S., Yee S.K., Scullin M.L., Dames C., Goodson K.E. Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. V. 32. P. 313–327. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.030

References

- Amatya R., Ram R.J. Trend for thermoelectric materials and their Earth abundance. *Journal of Electronic Materials*, 2012, vol. 41, no. 6, pp. 1011–1019. doi: 10.1007/s11664-011-1839-y
- LeBlanc S., Yee S.K., Scullin M.L., Dames C., Goodson K.E. Material and manufacturing cost considerations for thermoelectric. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 32, pp. 313–327. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.030

3. Zheng X.F., Liu C.X., Yan Y.Y., Wang Q. A review of thermoelectrics research – recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. V. 32. P. 486–503. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.053
4. Zaitsev V.K., Fedorov M.I., Gurieva E.A., Eremin I.S., Konstantinov P.P., Samunin A.Y., Vedernikov M.V. Highly effective $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ thermoelectrics // *Physical Review B*. 2006. V. 74. N 4. Art. 045207.
5. Bashir M.B.A., Mohd Said S, Sabri M.F.M., Shnawah D.A., Elsheikh M.H. Recent advances on $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ materials for thermoelectric generation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. V. 37. P. 569–584. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.060
6. Gao P., Berkun I., Schmidt R., Luzenski M., Lu X., Bordon Sarac P., Case E., Hogan T.P. Transport and mechanical properties of high-ZT $Mg_{2.08}Si_{0.4-x}Sn_{0.6}Sb_x$ thermoelectric materials // *Journal of Electronic Materials*. 2014. V. 43. N 6. P. 1790–1803. doi: 10.1007/s11664-013-2865-8
7. Khan A.U., Vlachos N.V., Hatzikraniotis E., Polymeris G.S., Lioutas C.B., Stefanaki E.C., Paraskevopoulos K.M., Giapintzakis I., Kyratsi T. Thermoelectric properties of highly efficient Bi-doped $Mg_2Si_{1-x-y}Sn_xGe_y$ materials // *Acta Materialia*. 2014. V. 77. P. 43–53. doi: 10.1016/j.actamat.2014.04.060
8. Федоров М.И. Термоэлектрические силициды: прошлое, настоящее и будущее // *Термоэлектричество*. 2009. № 2. С. 53–64.
9. Engstrom I., Lonnberg B. Thermal expansion studies of the group IV-VII transition-metal disilicides // *Journal of Applied Physics*. 1988. V. 63. N 9. P. 4476–4484. doi: 10.1063/1.340168
10. Gelbstein Y., Tunbridge J., Dixon R., Reece M., Ning H., Gilchrist R., Summers R., Agote I., Lagos M.A., Simpson K., Rouaud C., Feulner P., Rivera S., Torrecillas R., Husband M., Crossley J., Robinson I. Physical, mechanical, and structural properties of highly efficient nanostructured n- and p-silicides for practical thermoelectric applications // *Journal of Electronic Materials*. 2014. V. 43. N 6. P. 1703–1711. doi: 10.1007/s11664-013-2848-9
11. Sondergaard M., Christensen M., Borup K.A., Yin H., Iversen B.B. Thermoelectric properties of the entire composition range in $Mg_2Si_{0.9925-x}Sn_xSb_{0.0075}$ // *Journal of Electronic Materials*. 2013. V. 42. N 7. P. 1417–1421. doi: 10.1007/s11664-012-2282-4
12. Bourgois J., Tobola J., Chaput L., Zwolenski P., Berthebaud D., Gascoin F., Recour Q., Scherrer H. Study of electron, phonon and crystal stability versus thermoelectric properties in Mg_2X ($X = Si, Sn$) compounds and their alloys // *Functional Materials Letters*. 2013. V. 6. N 5. Art. 1340005. doi: 10.1142/S1793604713400055
13. Tani J., Takahashi M., Kido H. J. Fabrication of oxidation-resistant β -FeSi₂ film on Mg₂Si by RF magnetron-sputtering deposition // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. V. 488. N 1. P. 346–349. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.08.128
14. Tani J., Takahashi M., Kido H. Thermoelectric properties and oxidation behaviour of Magnesium Silicide // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2011. V. 18. Art. 142013. doi: 10.1088/1757-899X/18/14/142013
15. Nemoto T., Iida T., Sato J., Sakamoto T., Nakajima T., Takanashi Y. Power generation characteristics of Mg₂Si uni-leg thermoelectric generator // *Journal of Electronic Materials*. 2012. V. 41. N 6. P. 1312–1316. doi: 10.1007/s11664-012-1963-3
16. Nemoto T., Iida T., Sato J., Sakamoto T., Hirayama N., Nakajima T., Nakajima T., Takanashi Y. Development of an Mg₂Si unileg thermoelectric module using durable Sb-doped Mg₂Si legs // *Journal of Electronic Materials*. 2013. V. 42. N 7. P. 2192–2197. doi: 10.1007/s11664-013-2569-0
17. Nemoto T., Iida T., Sato J., Suda H., Takanashi Y. Improvement in the durability and heat conduction of uni-leg thermoelectric modules using n-type Mg₂Si legs // *Journal of Electronic Materials*. 2014. V. 43. N 6. P. 1890–1895. doi: 10.1007/s11664-013-2897-0
18. Skomedal G., Holmgren L., Middleton H., Eremin I.S., Isachenko G.N., Jaegle M., Tarantik K., Vlachos N., Manoli M., Kyratsi T., Berthebaud D., Truong N.Y.D., Gascoin F. 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
3. Zheng X.F., Liu C.X., Yan Y.Y., Wang Q. A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 32, pp. 486–503. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.053
4. Zaitsev V.K., Fedorov M.I., Gurieva E.A., Eremin I.S., Konstantinov P.P., Samunin A.Y., Vedernikov M.V. Highly effective $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ thermoelectric. *Physical Review B*, 2006, vol. 74, no. 4, art. 045207.
5. Bashir M.B.A., Mohd Said S, Sabri M.F.M., Shnawah D.A., Elsheikh M.H. Recent advances on $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ materials for thermoelectric generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 37, pp. 569–584. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.060
6. Gao P., Berkun I., Schmidt R., Luzenski M., Lu X., Bordon Sarac P., Case E., Hogan T.P. Transport and mechanical properties of high-ZT $Mg_{2.08}Si_{0.4-x}Sn_{0.6}Sb_x$ thermoelectric materials. *Journal of Electronic Materials*, 2014, vol. 43, no. 6, pp. 1790–1803. doi: 10.1007/s11664-013-2865-8
7. Khan A.U., Vlachos N.V., Hatzikraniotis E., Polymeris G.S., Lioutas C.B., Stefanaki E.C., Paraskevopoulos K.M., Giapintzakis I., Kyratsi T. Thermoelectric properties of highly efficient Bi-doped $Mg_2Si_{1-x-y}Sn_xGe_y$ materials. *Acta Materialia*, 2014, vol. 77, pp. 43–53. doi: 10.1016/j.actamat.2014.04.060
8. Fedorov M.I. Thermoelectric silicides: past, present and future. *Journal of Thermoelectricity*, 2009, vol. 2, pp. 51–60.
9. Engstrom I., Lonnberg B. Thermal expansion studies of the group IV-VII transition-metal disilicides. *Journal of Applied Physics*, 1988, vol. 63, no. 9, pp. 4476–4484. doi: 10.1063/1.340168
10. Gelbstein Y., Tunbridge J., Dixon R., Reece M., Ning H., Gilchrist R., Summers R., Agote I., Lagos M.A., Simpson K., Rouaud C., Feulner P., Rivera S., Torrecillas R., Husband M., Crossley J., Robinson I. Physical, mechanical, and structural properties of highly efficient nanostructured n- and p-silicides for practical thermoelectric applications. *Journal of Electronic Materials*, 2014, vol. 43, no. 6, pp. 1703–1711. doi: 10.1007/s11664-013-2848-9
11. Sondergaard M., Christensen M., Borup K.A., Yin H., Iversen B.B. Thermoelectric properties of the entire composition range in $Mg_2Si_{0.9925-x}Sn_xSb_{0.0075}$. *Journal of Electronic Materials*, 2013, vol. 42, no. 7, pp. 1417–1421. doi: 10.1007/s11664-012-2282-4
12. Bourgois J., Tobola J., Chaput L., Zwolenski P., Berthebaud D., Gascoin F., Recour Q., Scherrer H. Study of electron, phonon and crystal stability versus thermoelectric properties in Mg_2X ($X = Si, Sn$) compounds and their alloys. *Functional Materials Letters*, 2013, vol. 6, no. 5, art. 1340005. doi: 10.1142/S1793604713400055
13. Tani J., Takahashi M., Kido H. J. Fabrication of oxidation-resistant β -FeSi₂ film on Mg₂Si by RF magnetron-sputtering deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 488, no. 1, pp. 346–349. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.08.128
14. Tani J., Takahashi M., Kido H. Thermoelectric properties and oxidation behaviour of Magnesium Silicide. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2011, vol. 18, art. 142013. doi: 10.1088/1757-899X/18/14/142013
15. Nemoto T., Iida T., Sato J., Sakamoto T., Nakajima T., Takanashi Y. Power generation characteristics of Mg₂Si uni-leg thermoelectric generator. *Journal of Electronic Materials*, 2012, vol. 41, no. 6, pp. 1312–1316. doi: 10.1007/s11664-012-1963-3
16. Nemoto T., Iida T., Sato J., Sakamoto T., Hirayama N., Nakajima T., Nakajima T., Takanashi Y. Development of an Mg₂Si unileg thermoelectric module using durable Sb-doped Mg₂Si legs. *Journal of Electronic Materials*, 2013, vol. 42, no. 7, pp. 2192–2197. doi: 10.1007/s11664-013-2569-0
17. Nemoto T., Iida T., Sato J., Suda H., Takanashi Y. Improvement in the durability and heat conduction of uni-leg thermoelectric modules using n-type Mg₂Si legs. *Journal of Electronic Materials*, 2014, vol. 43, no. 6, pp. 1890–1895. doi: 10.1007/s11664-013-2897-0
18. Skomedal G., Holmgren L., Middleton H., Eremin I.S., Isachenko G.N., Jaegle M., Tarantik K., Vlachos N., Manoli M., Kyratsi T., Berthebaud D., Truong N.Y.D., Gascoin F. 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

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

Авторы

Касьянов Александр Александрович – ведущий инженер-конструктор, ООО «Криотерм», 197348, Санкт-Петербург, Российская Федерация; аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация ORCID ID: 0000-0001-7042-6670, kas.43@mail.ru

Исаченко Григорий Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация; доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 14066141100, ORCID ID: 0000-0002-1763-4224, g.isachenko@mail.ioffe.ru

Самусевич Ксения Леонидовна – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-1379-3746, k.l.samusevich@gmail.com

Authors

Alexander A. Kasianov – Leading design engineer, Kryotherm Company, LLC, 197348, Saint Petersburg, Russian Federation; postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-7042-6670, kas.43@mail.ru

Grigoriy N. Isachenko – PhD, Senior scientific researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 14066141100, ORCID ID: 0000-0002-1763-4224, g.isachenko@mail.ioffe.ru

Kseniya L. Samusevich – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-1379-3746, k.l.samusevich@gmail.com