

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ МАГНИЯ

Дашина З. А.¹

Научный руководитель – канд. техн. наук Асач А. В.¹

¹Университет ИТМО
zlata.dashina@yandex.ru

Введение

В условиях реализации международных климатических соглашений приоритетными задачами становятся декарбонизация и повышение энергоэффективности в отраслях промышленности, транспорта и энергетики. Значительный энергетический резерв скрыт в утилизации вторичного низкопотенциального тепла [1]. Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) представляют собой эффективные устройства для получения чистой энергии из отработанного тепла, тем самым способствуя снижению экологической нагрузки [2]. Традиционно в производстве среднетемпературных ТЭГ используют теллуриды висмута и свинца, но их высокая токсичность требует перехода на экологичные и безопасные аналоги, среди которых перспективными являются силициды. Они являются недорогими и нетоксичными, при этом обладают хорошими термоэлектрическими свойствами. Однако ресурсные испытания показывают, что наиболее эффективный материал *p*-ветви – твердый раствор силицида и станнида магния, подвержен деградации при температуре свыше 400 °С [3], в то время как чистый силицид магния стабильнее, но менее эффективен. Одним из способов решения этой проблемы является создание сегментированной ветви. В данной работе исследуется термоэлектрический модуль с сегментированной ветвью *n*-типа из $Mg_2Si_{0,4}Sn_{0,6}$ и Mg_2Si , и ветвью *p*-типа из $MnSi_{1,75}$. С помощью численного моделирования определено оптимальное соотношение высот сегментов *n*-ветви, построены рабочие характеристики ТЭГ. Дополнительно проведена оценка жизненного цикла разработанного генератора.

Основная часть

Численная модель описывала процессы теплопереноса и электропереноса. Геометрия модели модуля включала 127 пар термоэлектрических ветвей с поперечным сечением 4 мм² и высотой 8 мм. Конструкция ветви *n*-типа сегментирована: твердый раствор $Mg_2Si_{0,4}Sn_{0,6}$ на холодной стороне и Mg_2Si на горячей стороне, высота сегмента твердого раствора менялась от 2,4 до 6,4 мм с интервалом 0,4 мм. Материал ветви *p*-типа – $MnSi_{1,75}$. Термоэлектрические ветви соединены коммутационными пластинами из меди, закрепленными между двумя плоскими керамическими пластинами. Каждому элементу модели присваивались соответствующие материалы с необходимыми электрическими, теплофизическими и термоэлектрическими свойствами [4, 5, 6]. Термоэлектрические свойства керамических и медных пластин не учитывались. Граничные условия теплообмена были заданы в виде значения температур 115 °С на холодной и 500 °С на горячей стороне ТЭГ и адиабатическая изоляция для боковых поверхностей модуля. Места теплового контакта разнородных материалов моделировались путем задания теплофизических и геометрических свойств тонкого слоя контактного припоя. Граничные условия для электрических явлений: первый вывод на стороне материала *n*-типа использовался в качестве заземления, противоположный вывод на стороне материала *p*-типа – как электрический контакт, подключенный к внешней цепи. Для определения характеристик ТЭГ моделировалось подключение

модуля к электрической цепи с сопротивлением R , варьируемым в пределах от 1 до 20 Ом.

Выводы

В ходе исследования выполнено моделирование сегментированного силицидного термоэлектрического генератора и проведена оценка жизненного цикла данного устройства. Установлено, что применение сегментированной n -ветви дает возможность эксплуатировать генератор при температурах горячей стороны до 500 °С, недоступных для конфигурации модуля с ветвями, состоящими только из силицида магния. Численный анализ позволил определить оптимальную высоту сегмента $Mg_2Si_{0,4}Sn_{0,6}$, которая составляет 5,6 мм. При оптимальном режиме работы модуль имеет следующие параметры: сопротивление нагрузки $R = 5,0$ Ом, напряжение $U = 6,9$ В, ток $I = 1,38$ А, КПД $\eta = 5,3$ %. Полученные характеристики превосходят показатели модуля с однородной n -ветвью из Mg_2Si и соответствуют уровню коммерческих среднетемпературных ТЭГ, работающих в аналогичном температурном диапазоне.

Литература

1. Saidur R. et al. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines //Renewable and sustainable energy reviews. 2012. Т. 16. №. 8. P. 5649-5659. <https://doi.org/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. Т. 357. №. 6358. P. eaak9997. <https://doi.org/10.1126/science.aak9997>
3. Mejri M. et al. Thermal stability of $Mg_2Si_{0.55}Sn_{0.45}$ for thermoelectric applications //Journal of Alloys and Compounds. 2020. Т. 846. P. 156413. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156413>
4. Кузнецов Ю. М. и др. Синтез и термоэлектрические свойства высшего силицида марганца //Физика и техника полупроводников. 2024. Т. 58. №. 7. С. 376-380. <https://doi.org/10.61011/FTP.2024.07.59181.6350H>
5. Jung J. Y., Kim I. H. Synthesis and thermoelectric properties of n -Type Mg_2Si //Electronic Materials Letters. 2010. Т. 6. №. 4. P. 187-191. <https://doi.org/10.3365/eml.2010.12.187>
6. Guo W. et al. Improving n -type thermoelectric performance of $Mg_2Si_{0.4}Sn_{0.6}$ compounds via high pressure and Sb-doping //Journal of Alloys and Compounds. 2024. Т. 1002. P. 175366. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175366>