= ТЕХНИКА -

УДК 621.383.51; 621.36

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ

А.К. Есман, Г.Л. Зыков, В.А. Потачиц

Белорусский национальный технический университет, Минск

IMPROVEMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF THE PHOTOVOLTAIC THERMOELECTRIC BATTERY

A.K. Esman, G.L. Zykov, V.A. Potachits

Belarusian National Technical University, Minsk

В работе рассмотрено одно из оригинальных решений фототермоэлектрической батареи, реализованной в программной среде COMSOL Multiphysics. При этом учитывались суточные и сезонные изменения температуры окружающей среды и воздействия концентрированного солнечного излучения. Рассчитаны профили распределения температуры в различных сечениях батареи, а также градиенты температуры внутри ее термоэлектрических преобразователей. Показано, что за счет термостабилизации тыльной стороны внешних электродов удалось достичь увеличения выходного напряжения до максимальных значений 0,635 и 0,78 В в январе и июле соответственно.

Ключевые слова: численное моделирование, COMSOL Multiphysics, фото- и термоэлектрические преобразователи, концентрированное солнечное излучение, градиент температуры, выходное напряжение.

The paper considers one of the original solutions of the photovoltaic thermoelectric battery, which was implemented in the COMSOL Multiphysics software environment. Furthermore, the diurnal and seasonal variations of the ambient temperature and the effects of the concentrated solar radiation were taken into account. The temperature patterns in the different sections of the battery as well as the temperature gradient patterns inside the thermoelectric converters are calculated. It is shown that the increasing of the output voltage up to maximum values of 0,635 and 0,78 V in January and July, respectively, was achieved due to the temperature stabilization of the back side of the external electrodes.

Keywords: numerical simulation, COMSOL Multiphysics, photo- and thermoelectric converters, concentrated solar radiation, temperature gradient, output voltage.

Введение

Среди альтернативных и возобновляемых экологически чистых источников энергии особое место занимают фотоэлектрические батареи [1]-[3]. Одним из возможных путей повышения их энергоэффективности является использование концентраторов солнечного излучения. Однако при этом температура фототермоэлектрической батареи значительно повышается за счет радиационного нагрева. Это может приводить к перегреву как отдельных элементов, так и всей батареи в целом, к ухудшению ее эксплуатационных характеристик и сокращению срока ее службы [4], [5]. Использование принудительного охлаждения с целью уменьшения рабочих температур увеличивает с одной стороны стоимость таких батарей, а с другой – делает их громоздкими. В настоящее время ведется поиск компромисса между повышением энергоэффективности и снижением стоимости фототермоэлектрических батарей и уменьшением их габаритов [6].

Целью статьи является разработка и реализация трехмерной модели фототермоэлектрической батареи в программной среде COMSOL Multiphysics, оптимизация ее температурных характеристик и выходного напряжения, получаемых в условиях изменения температуры окружающей среды и воздействия концентрированного солнечного излучения, а также проведение поиска путей повышения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую.

1 Конструкция солнечного элемента

Структура предлагаемой фототермоэлектрической батареи приведена на рисунке 1.1 [7].

В ней полупроводниковые фотоэлектрические элементы 1 соединены между собой через металлические слои 5 (размером ($x = 25 \div 90$) × \times (*y* = 1000) \times (*z* = 700 \div 1000) мкм, рисунки 1.1 и 1.2) из молибдена, расположенные на поверхности раздела этих элементов. Каждый из фотоэлектрических элементов 1 включает диффузионные легированные слои кремния р-типа 2 и *п-*типа 3. размером $(x = 0.8) \times (y = 1000) \times$ (z = 500) мкм каждый. Структурированные диэлектрические покрытия 4 (размером (x = 300) × \times (y = 1000) \times (z = 0,5) мкм) из TiO₂ нанесены на лицевую сторону диффузионных легированных слоев кремния р-типа 2 и п-типа 3, а также на полупроводниковый материал 6 (размером $(x = 298, 4) \times (y = 1000) \times (z = 0, 5)$ MKM), выполненный из кремния. Зеркальные покрытия 7, изготовленные из алюминия, расположены на лицевой внешней поверхности металлических слоев 5 и оптически связаны через структурированные диэлектрические покрытия 4 с диффузионными легированными слоями кремния *p*-типа 2 и *n*-типа 3, а также с полупроводниковым материалом 6 фотоэлектрических элементов 1. Термоэлектрические преобразователи 8 на основе CuInSe₂ с внешними 10 и внутренними 11 электродами из молибдена термически связаны с металлическими слоями 5 из молибдена через слои диэлектрика 9 (размером ($x = 27 \div 92$) × × (y = 1000) × (z = 1) мкм), выполненные из Al₂O₃.



Рисунок 1.1 – Структура фототермоэлектрической батареи:

- 1 фотоэлектрический элемент,
- 2 и 3 диффузионные легированные слои кремния *p* и *n*-типа,
- 4 структурированное диэлектрическое покрытие из TiO₂,
- 5 металлический слой из молибдена,
- 6 полупроводниковый материал из кремния,
- 7 зеркальное покрытие из алюминия,
- 8-термоэлектрический преобразователь на основе CuInSe₂,
- 9 слой диэлектрика на основе Al₂O₃,
- 10 и 11 внешний и внутренний электроды из молибдена



Рисунок 1.2 – Снимок экрана программной среды COMSOL Multiphysics, на котором показано разбиение фототермоэлектрической батареи на конечные элементы в форме тетраэдров

2 Алгоритм работы фототермоэлектрической батареи

Фототермоэлектрическая батарея работает следующим образом. Входное солнечное излучение, падающее на поверхность структурированного диэлектрического покрытия 4, проникает через него непосредственно (лучи I на рисунке 1.1) и после отражения от зеркального покрытия 7 (лучи II на рисунке 1.1). Поэтому, благодаря просветляющему действию структурированного диэлектрического покрытия 4, это излучение практически полностью поступает внутрь фотоэлектрических элементов 1 и поглощается в них, вызывая фотогенерацию носителей зарядов. Одна часть полученных зарядов разделяется полями *p-n* переходов фотоэлектрических элементов 1, создавая фото-ЭДС, а другая – рекомбинирует, нагревая полупроводниковый материал 6. Тепловая энергия полупроводникового материала 6 за счет теплопередачи нагревает металлические слои 5 по отношению к температуре окружающей среды. В результате внутри термоэлектрических преобразователей 8 появляется градиент температуры, так как внешние электроды 10 находятся при температуре окружающей среды, вызывая появление соответствующей термо-ЭДС тем самым повышая КПД устройства.

3 Компьютерное моделирование

Для моделирования характеристик предлагаемой фототермоэлектрической батареи использовалась программная среда COMSOL Multiphysics, которая позволяет учитывать все из заданных и/или изменяемых параметров при решении большинства прикладных задач. Моделирование проводилось с помощью модуля «Теплопередача» (Heat Transfer Module) данной программной среды [8]-[10], в которой была реализована численная модель фототермоэлектрической батареи и рассчитаны её характеристики при наличии и отсутствии стабилизации её температуры. Наличие термостабилизации означает, что температура внешних электродов 10 поддерживается равной температуре окружающей среды. Расчеты выполнялись для географических координат г. Минска. При моделировании учитывались усредненные суточные и сезонные изменения как энергии солнечного излучения, так и температуры окружающей среды, а также плотность мощности солнечного излучения спектра AM1,5, максимальные значения которой варьировались в пределах от 1 до 500 кВт/м² при использовании концентраторов. В климатологии обычно рассматривается суточный ход температуры воздуха, осредненный за многолетний период, когда непериодические изменения температуры взаимно погашаются и кривая суточного хода близка к синусоидальной.

Таким образом, фототермоэлектрическая батарея в процессе моделирования разбивалась

на конечные элементы в форме тетраэдров (рисунок 1.2). Плотность сетки для каждого её слоя настраивалась с учетом геометрической конфигурации тетраэдров путем выбора одного из девяти предустановленных режимов: от чрезвычайно точного до чрезвычайно грубого. При необходимости использования более мелкой сетки в какой-либо области разбиение выполнялось вручную. Технические средства программы позволяли обрабатывать и визуализировать расчетные числовые данные для всех рассматриваемых режимов работы фототермоэлектрической батареи.

4 Анализ полученных результатов

Согласно полученным результатам, при эксплуатации фототермоэлектрической батареи без термостабилизации в условиях изменения температуры окружающей среды и плотности мощности солнечного излучения происходит её неравномерный нагрев. Увеличение плотности мощности солнечного излучения, максимальное значение которой варьируется в пределах 1 кВт/м² $\leq P_{max} \leq 500$ кВт/м², приводит к изменетемпературы фототермоэлектрической нию батареи в пределах от 36,5° С до температур, соответствующих выходу её из строя. Как следует из [1], [11], рабочие температуры фототермоэлектрических батарей в различных системах могут изменяться в пределах от 25° С до 60° С в зависимости от используемых материалов, конструктивных особенностей и концентрации солнечного излучения. Стабилизация температуры тыльной стороны внешних электродов фототермоэлектрической батареи на уровне температуры окружающей среды позволяет снизить температуру фототермоэлектрической батареи (до 22,8° С в январе (рисунок 4.1, a) и до $48,2^{\circ}$ С в июле (рисунок 4.1, б) при $P_{max} = 500 \text{ кBt/m}^2$) и, в частности, температуру термоэлектрического преобразователя (до -0,7° С в январе и до 24,7° С в июле при $P_{max} = 500 \text{ кBr/m}^2$) и увеличить (в ~ 10 раз в июле и в ~ 20 раз в январе) градиент температуры внутри термоэлектрических преобразователей (кривые 2 и 2', рисунок 4.2). Следует отметить, что существенный градиент температуры возникает внутри термоэлектрических преобразователей независимо от температуры окружающей среды.

Расчеты позволили оценить на сколько отличается количество падающей солнечной радиации на юго-восточную и юго-западную стороны фототермоэлектрической батареи между собой и на остальные стороны. При этом юговосточная сторона это количество солнечной радиации получает около 12 часов дня, а югозападная сторона – около 14 часов дня. Это приводит к тому, что без учета облачности максимальные градиенты температуры достигаются сначала с юго-восточной стороны (в 12 часов дня), а затем – с юго-западной стороны (около



Рисунок 4.1 – Профили распределения температуры в фототермоэлектрической батарее в сечениях, параллельных плоскости YZ, в 12 часов дня в серединах января (*a*) и июля (б) в условиях воздействия концентрированного солнечного излучения, максимальное значение плотности мощности которого составляло 500 кВт/м²

14 часов). С северо-восточной и северо-западной сторон градиенты температуры ниже на ~ 12%. В работе приведены только зависимости градиентов температуры для юго-восточной стороны термоэлектрических преобразователей. Для всех остальных сторон зависимости градиентов температуры аналогичны, только смещены по времени (северо-западная и юго-западная стороны) и/или максимальные значения градиентов температуры ниже (северо-восточная и северо-западная стороны).



Рисунок 4.2 – Зависимости максимальных значений градиента температуры внутри термоэлектрических преобразователей фототермоэлектрической батареи при отсутствии (кривые 1 и 1') и наличии (кривые 2 и 2') стабилизации температуры тыльной стороны внешних электродов в серединах января (кривые 1' и 2') и июля (кривые 1 и 2) от плотности мощности солнечного излучения, максимальные значениями которых варьируются от 1 до 500 кВт/м²

Как следует из проведенных расчетов, максимальные значения градиента температуры как в середине января $(2,5 \times 10^6 \text{ K/m})$, так и в середине июля (2×10⁶ К/м) достигаются около 12 часов дня при воздействии концентрированного солнечного излучения, максимальное значение мощности которого плотности составляло 500 кВт/м². В январе максимальные значения градиента температуры на ~ 20 % выше, чем в июле (рисунок 4.2), что обусловлено, с одной стороны, наличием стабилизации температуры тыльной стороны внешних электродов фототермоэлектрической батареи на уровне температуры окружающей среды, которая в январе ниже, чем в июле, и, с другой стороны, воздействием концентрированного солнечного излучения на все элементы фототермоэлектрической батареи в течение светового дня. Однако вследствие того, что световой день в июле больше, чем в январе, суммарный энергетический выигрыш, получаемый в течение суток в июле внутри термоэлектрического преобразователя фототермоэлектрической батареи, оказывается больше, чем в январе.

Кроме того, варьируя высотой (z = 0, 7...1, 0 мм) и шириной (x = 25...90 мкм) металлических слоев 5, были получены их оптимальные значения z = 1, 0 мм (рисунок 4.3, a) и x = 25 мкм (рисунок 4.3, δ) (с точки зрения получения максимально возможных значений градиента температуры внутри термоэлектрического преобразователя). Все зависимости, приведенные на рисунке 4.3, a, получены при ширине металлических слоёв 5 x = 40 мкм, а зависимости, приведенные на рисунке 4.3, δ , получены при высоте металлических слоёв 5 z = 0,75 мм. Как видно из полученных зависимостей на рисунке 4.3, градиент температуры в январе (кривые 1' и 2',



Рисунок 4.3 – Зависимости градиента температуры между обеими поверхностями термоэлектрического преобразователя фототермоэлектрической батареи от высоты (*a*) и ширины (*б*) её металлических слоёв в середине июля (кривые 1 и 2) и января (кривые 1' и 2') при плотностях мощности солнечного излучения, максимальные значения которых равны 1 (кривые 1 и 1') и 2 (кривые 2 и 2') кВт/м²

рисунок 4.3, б) больше (~10%), чем в июле (кривые 1 и 2, рисунок 4.3, а).

Достигнутые максимальные значения градиентов температуры (рисунок 4.2) между внутренними и внешними электродами термоэлектрических преобразователей фототермоэлектрической батареи при воздействии на нее концентрированного солнечного излучения с $P_{max} =$ = 500 кВт/м² приводят к тому, что разность потенциалов, генерируемая между этими электродами, в январе и июле также достигает около 12 часов дня максимальных значений, которые соответственно равны 81 и 65 мВ. Суммарная генерируемая разность потенциалов в течение суток (при $P_{max} = 500$ кВт/м²) в середине января и июля составляет ~ 0,635 и 0,78 В соответственно.

Заключение

Разработанная и реализованная трехмерная модель предложенной фототермоэлектрической батареи позволила рассчитать и оценить ее температурные характеристики и выходные напряжения в условиях суточных и сезонных изменений, как энергии солнечного излучения, так и температуры окружающей среды, а также воздействия концентрированного солнечного излучения АМ1,5. Максимальные значения плотности мощности изменялись в пределах от 1 до 500 кВт/м². Стабилизация температуры тыльной стороны внешних электродов фототермоэлектрической батареи на уровне температуры окружающей среды позволяет уменьшить неравномерность нагрева поверхности, снизить температуру фототермоэлектрической батареи (до +22.8° С в январе и до +48.2° С в июле при максимальных значениях плотности мощности $P_{max} = 500 \text{ кBt/m}^2$ концентрированного солнечного излучения) и увеличить (в ~ 7,6 раз в июле и в ~ 10,9 раз в январе) градиент температуры

внутри термоэлектрических преобразователей. Согласно полученным расчетам, максимальные значения градиента температуры термоэлектрического преобразователя фототермоэлектрической батареи в январе на ~ 20% выше, чем в июле. Однако суммарный энергетический выигрыш, получаемый в течение суток в июле внутри термоэлектрического преобразователя фототермоэлектрической батареи, оказывается больше, чем в январе. При этом амплитуда выходного напряжения, генерируемого термоэлектрическим преобразователем, достигает около 12 часов дня максимальных значений: ~ 81 мВ в январе и 65 мВ в июле. Суммарная амплитуда выходного напряжения фототермоэлектрической батареи, генерируемого термоэлектрическим преобразователем в течение суток, в серединах января и июля составляет 0,635 и 0,78 В соответственно. Проведенный анализ показал, что рассмотренная фототермоэлектрическая батарея в условиях интенсивного солнечного излучения позволяет не только увеличить энергоотдачу с единицы площади, поднять КПД, но и оптимизировать её конструкцию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Burger, T. Thermophotovoltaic energy conversion: materials and device engineering. In: Nanoscale Energy Transport. Emerging phenomena, methods and applications / T. Burger, C. Sempere, A. Lenert. – London: IOP Publushing LTD, 2020. – Chapter 17. - P. 17-1-17-26.

2. *Ultu*, *Z*. Thermophotovoltaic applications in waste heat recovery systems: example of GaSb cell / Z. Ultu // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2020. – Vol. 15, № 2. – P. 277–286.

3. *Ferrari*, *C*. Thermo-Photo-Voltaic generator development / C. Ferrari, F. Melino // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 45. – P. 150–159.

Проблемы физики, математики и техники, № 3 (48), 2021

4. Saxena, P. COMSOL simulation of heat distribution in perovskite solar cells: coupled opticalelectrical-thermal 3-D analysis / P. Saxena, N.E. Gorji // IEEE Journal of Photovoltaics. -2019. - Vol. 9, $N \ge 6. - P. 1693-1698.$

5. Cotfas, P.A. Comprehensive review of methods and instruments for photovoltaic-thermoelectric generator hybrid system characterization / P.A. Cotfas, D.T. Cotfas // Energies. – 2020. – Vol. 13, N 22. – P. 6045-1–6045-32.

6. *Raut, P.D.* Recent developments in photovoltaic-thermoelectric combined system / P.D. Raut, V.V. Shukla, S.S. Joshi // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, № 4. – P. 2619–2627.

7. Фототермоэлектрическая батарея: пат. 19928 Респ. Беларусь: МПК Н 01L 31/05 / А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л. Зыков и др.; дата публ. 20.02.2016.

8. Analyze thermal effects with the Heat Transfer Module. COMSOL, Inc. USA [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.comsol.com/ heat-transfer-module. – Date of access: 09.03.2021. 9. Simulation of tandem thin-film solar cell on the basis of CuInSe₂ / A.K. Esman, V.K. Kuleshov, V.A. Potachits, G.L. Zykov // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений CHГ. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 385–395.

10. Тонкопленочный солнечный элемент с использованием термоэлектрического слоя / А.К. Есман, Г.Л. Зыков, В.А. Потачиц, В.К. Кулешов // Проблемы физики, математики и техни-ки. – 2020. – № 1 (42). – С. 39–44.

11. Temperature regulation of photovoltaic module using phase change material: a numerical analysis and experimental investigation / H. Mahamudul [et al.] // International Journal of Photoenergy. – 2016. – Vol. 2016. – P. 5917028-1– 5917028-8.

Поступила в редакцию 02.04.2021.