

УДК 621.383.51

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ**А.К. Есман, Г.Л. Зыков, В.А. Потачиц***Белорусский национальный технический университет, Минск***THIN-FILM SOLAR CELL WITH A THERMOELECTRIC LAYER****A.K. Esman, G.L. Zykov, V.A. Potachits***Belarusian National Technical University, Minsk*

Рассмотрено одно из экономически оправданных решений тонкопленочного солнечного элемента на основе фотоэлектрического преобразователя $\text{CuInSe}_2\text{-CdS}$ и термоэлектрического слоя CuInSe_2 . Данная структура солнечного элемента была реализована в программном пакете COMSOL Multiphysics. При моделировании учитывались условия, близкие к эксплуатационным. Численными методами получено распределение температуры и градиентов температуры солнечного элемента. Использование термоэлектрического слоя, концентрации солнечного излучения, а также поддержания рабочей температуры фотоэлектрического преобразователя за счет термостабилизации тыльной стороны подложки позволили достичь увеличения выходной мощности солнечного элемента до 5%.

Ключевые слова: термоэлектрический слой, фотоэлектрический преобразователь, концентрированное солнечное излучение, COMSOL Multiphysics, градиент температуры.

One of the economically viable solutions of the thin-film solar cell on the basis of: the photoelectric converter, based on $\text{CuInSe}_2\text{-CdS}$, and the thermoelectric layer, based on CuInSe_2 , is considered in this paper. This construction of the solar cell is implemented in the COMSOL Multiphysics software package. During the simulation, conditions close to operational conditions were taken into account. The temperature patterns and the temperature gradient patterns of the solar cell are obtained by using numerical methods. The use of the thermoelectric layer, the solar radiation concentration as well as maintenance of the operating temperature of the photoelectric converter due to the temperature stabilization of the substrate back side made it possible to achieve an increase in the output power of the solar cell up to 5%.

Keywords: thermoelectric layer, photoelectric converter, concentrated solar radiation, COMSOL Multiphysics, temperature gradient.

Введение

Наиболее перспективными альтернативными источниками электроэнергии по-прежнему являются полупроводниковые солнечные элементы. Наиболее практически востребованными являются дешевые тонкопленочные преобразователи. Диселенид меди и индия (CuInSe_2) наиболее полно удовлетворяет требованиям применения в наземных условиях: по ширине запрещенной зоны (1,04 эВ при температуре 300 К), наличию гомо- и гетеропереходов, гибкости, высокой радиационной устойчивости, экологической безопасности, а также стоимости. Высокая способность к поглощению солнечного излучения у CuInSe_2 (более $1,5 \text{ мкм}^{-1}$ в ближней ИК и видимой области спектра) позволяет создавать высокоэффективные тонкопленочные солнечные элементы [1], [2].

Как показали эксперименты, в результате длительной эксплуатации солнечных элементов из-за действия дестабилизирующих факторов: нагревание выше температуры окружающей среды до 55°C и более, влажности воздуха и т. д. эффективность их работы снижается и сокращается срок службы [3]. Поэтому представляет интерес поиск эффективных путей, позволяющих, с одной стороны, понизить рабочую температуру

солнечного элемента, а с другой – повысить коэффициент преобразования солнечной энергии в электричество [4]–[7].

Целью данной работы является поиск путей повышения эффективности преобразования солнечного излучения (СИ) тонкопленочным полупроводниковым элементом на основе CuInSe_2 в электричество за счет использования тепловой энергии, как выделяющейся в этом элементе, так и инфракрасных (ИК) излучений: солнца и окружающей среды.

1 Конструкция солнечного элемента

Структура предлагаемого тонкопленочного солнечного элемента на основе CuInSe_2 приведена на рисунке 1.1 [5], где на полированной лицевой поверхности подложки 1, изготовленной из нержавеющей стали, с закругленными краями, последовательно расположены электрически соединенные: первый электродный слой 2, термоэлектрический слой на основе CuInSe_2 3, второй электродный слой 4, фотоэлектрический преобразователь, состоящий из слоев CuInSe_2 5 и CdS 6, а также прозрачный электрод 7.

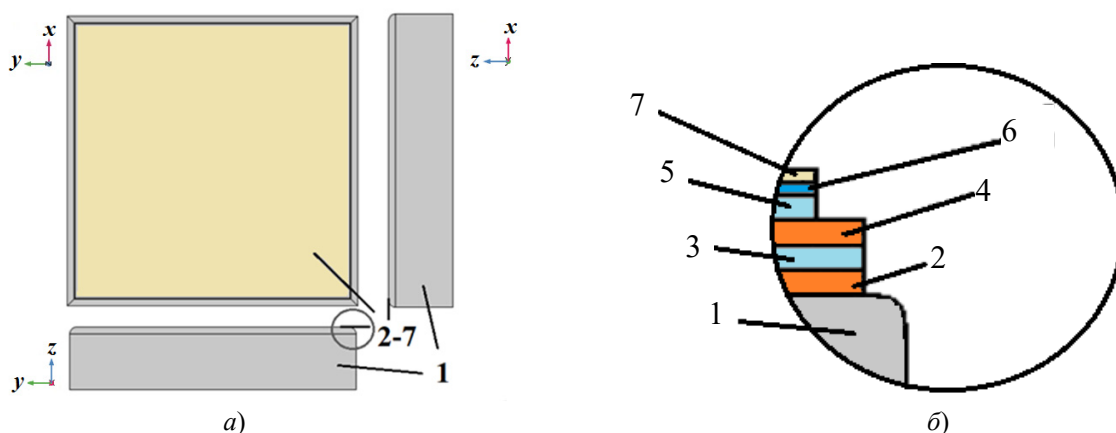


Рисунок 1.1 – Структура солнечного элемента на основе CuInSe_2 в плоскостях xy , xz , yz (а) и увеличенный его фрагмент в плоскости yz (б), где: 1 – подложка, 2 – первый электродный слой, 3 – термоэлектрический слой, 4 – второй электродный слой, 5,6 – фотоэлектрический преобразователь, 7 – прозрачный электрод

2 Алгоритм работы солнечного элемента

Входное солнечное излучение проходит сквозь прозрачный электрод 7 и видимая часть этого излучения поглощается в слоях 5, 6 фотоэлектрического преобразователя, генерируя носители электрических зарядов в слое 5 и нагревая слой 6. Часть сгенерированных зарядов, достигая p - n -перехода фотоэлектрического преобразователя, разделяется его полем, создавая фото-ЭДС между прозрачным электродом 7 и вторым электродным слоем 4. Остальная часть фотогенерированных зарядов рекомбинирует, нагревая фотоэлектрический преобразователь 5, 6. Эта тепловая энергия за счет теплопередачи нагревает второй электродный слой 4. Более того, оставшаяся инфракрасная часть входного солнечного излучения дополнительно нагревает этот слой. В тоже время торцы подложки 1 теплоизолированы, а температура её тыльной стороны стабилизировалась на уровнях $T_0 = +1^\circ\text{C}$ и $+10^\circ\text{C}$. Поэтому между первым 2 и вторым 4 электродными слоями образуется градиент температур, вызывающий появление термо-ЭДС между верхней и нижней сторонами термоэлектрического слоя 3, который является полупроводником с дырочным типом проводимости. В результате этого между первым электродным слоем 2, электрически соединенным с нижней стороной термоэлектрического слоя 3, и прозрачным электродом 7 возникает выходное напряжение солнечного элемента, состоящее из фото- и термо-ЭДС. Эффективность преобразования солнечного излучения в электричество поддерживалась на постоянном уровне за счёт стабилизации температуры фотоэлектрического преобразователя 5, 6.

3 Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование является неотъемлемым инструментом создания современных

технических объектов, так как оно позволяет значительно сократить финансовые затраты на разработку элементной базы солнечной энергетики. Более того, использование компьютерного моделирования позволяет оптимизировать производственные процессы с целью снижения энерго- и ресурсоёмкости выпускаемой продукции, улучшения её потребительских качеств и, в конечном счете, повышения её конкурентоспособности.

Моделирование проводилось с помощью программы COMSOL Multiphysics, используемой для решения большинства научных и инженерных задач (начиная от определения геометрических параметров и описания физики и заканчивая визуализацией и сохранением полученных результатов), основанных на системе дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. Для количественной оценки повышения вырабатываемой электроэнергии предложенным тонкопленочным солнечным элементом на основе CuInSe_2 использовался модуль «Теплопередача» (Heat Transfer Module) данной программной среды. Этот модуль является специализированным инструментом для моделирования тепловых процессов в элементах электронной техники и энергетике, включая солнечные элементы, работающие в реальных условиях эксплуатации.

Для учёта солнечного излучения и излучения в окружающую среду использовались специальные опции, которые позволяют задать разный коэффициент поглощения (степень черноты) для коротковолнового (характерного для солнечного излучения) и длинноволнового (характерного для излучения окружающей среды) частей спектра. Кроме того, по географическому положению и времени суток определялось направление солнечного излучения. Угловые коэффициенты излучения рассчитывались методом полукуба или

прямым интегрированием по поверхности. Для экономии вычислительных ресурсов при моделировании использовались условия симметрии [8].

В разработанной численной трехмерной модели тонкопленочного солнечного элемента рассматривались различные условия его эксплуатации: при наличии и отсутствии теплоизоляции торцов подложки, а так же при наличии и отсутствии стабилизации температуры тыльной стороны подложки.

Расчеты выполнялись для географических координат г. Минска с учетом суточного и сезонного изменения как температуры окружающей среды, так и мощности солнечного излучения спектра AM1,5, максимальное значение которой составляло 500 кВт/м^2 [9] при использовании концентраторов [10]. Изменение температуры окружающей среды моделировалось по гармоническому закону [11]. При моделировании использовались данные о средних минимальной и максимальной месячной температурах воздуха в г. Минске с сайта <http://belmeteo.net>. Температура подложки задавалась как с учётом изменения температуры окружающей среды, так и при условии термостабилизации её тыльной стороны на уровне $T_0 = +1^\circ \text{C}$ (если температура окружающей среды равна $+1^\circ \text{C}$ и ниже) и $T_0 = +10^\circ \text{C}$ (если температура окружающей среды выше $+1^\circ \text{C}$).

Тонкопленочный солнечный элемент в процессе моделирования разбивался на конечные элементы в форме тетраэдров. Плотность сетки для каждого слоя солнечного элемента настраивалась с учетом его геометрической конфигурации путем выбора одного из девяти предустановленных режимов: от чрезвычайно точного до

чрезвычайно грубого. При необходимости использования более мелкой сетки в какой-либо области, как, например, для слоев 6 и 7 толщиной 50 нм, разбиение выполнялось вручную. Решение задачи осуществлялось с учетом изменения температуры окружающей среды. Технические средства программы позволяли визуализировать и обрабатывать расчетные числовые данные для всех рассматриваемых режимов работы тонкопленочного солнечного элемента.

4 Анализ полученных результатов

Как показали расчеты, суточное и сезонное изменение температуры и плотности мощности солнечного излучения приводит к неравномерному нагреву всех слоев солнечного элемента, как поверхностных, так и внутренних. Следует отметить, что больше всего нагреваются торцы солнечного элемента. В указанных выше условиях поверхность предложенного тонкопленочного солнечного элемента на основе CuInSe_2 без охлаждения и при отсутствии теплоизоляции торцов подложки может нагреваться до температуры в пределах от 650°C до 750°C в течение светового дня, что приводит к необратимым повреждениям. Теплоизоляция торцов подложки и стабилизация температуры её тыльной стороны на уровне $T_0 = 10^\circ \text{C}$ позволили снизить температуру поверхности тонкопленочного солнечного элемента на основе CuInSe_2 до $T \approx 14,2^\circ \text{C}$ (рисунок 4.1) и менее. Так, например, при восходе солнца её температура составляла не более $10,3^\circ \text{C}$. Также были рассчитаны профили градиента температуры рассмотренного солнечного элемента (рисунок 4.2).

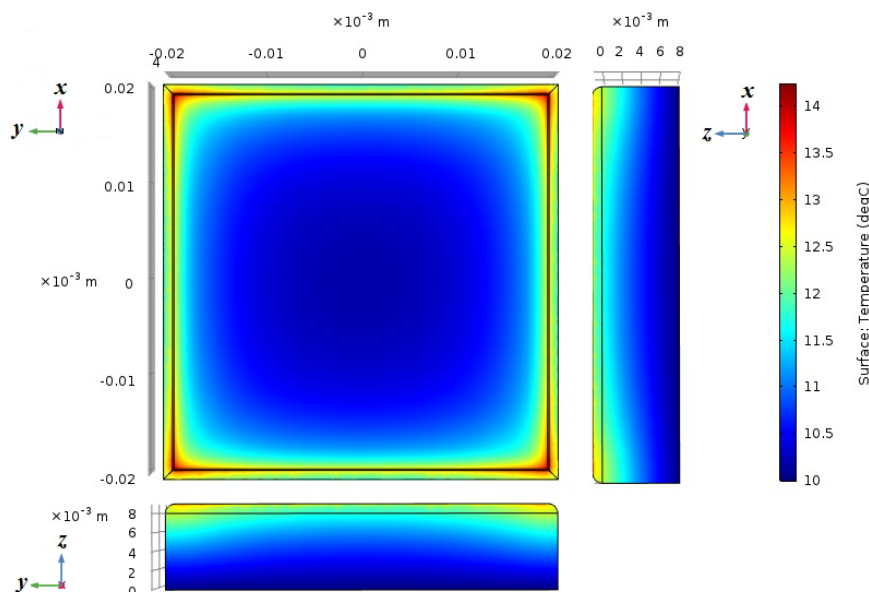


Рисунок 4.1 – Профили распределения температуры в 12 часов 30 минут в середине июля на поверхностях (плоскости xy , xz , yz) тонкопленочного солнечного элемента на основе CuInSe_2 со стабилизацией температуры $T_0 = 10^\circ \text{C}$ тыльной стороны подложки при наличии теплоизоляции торцов подложки

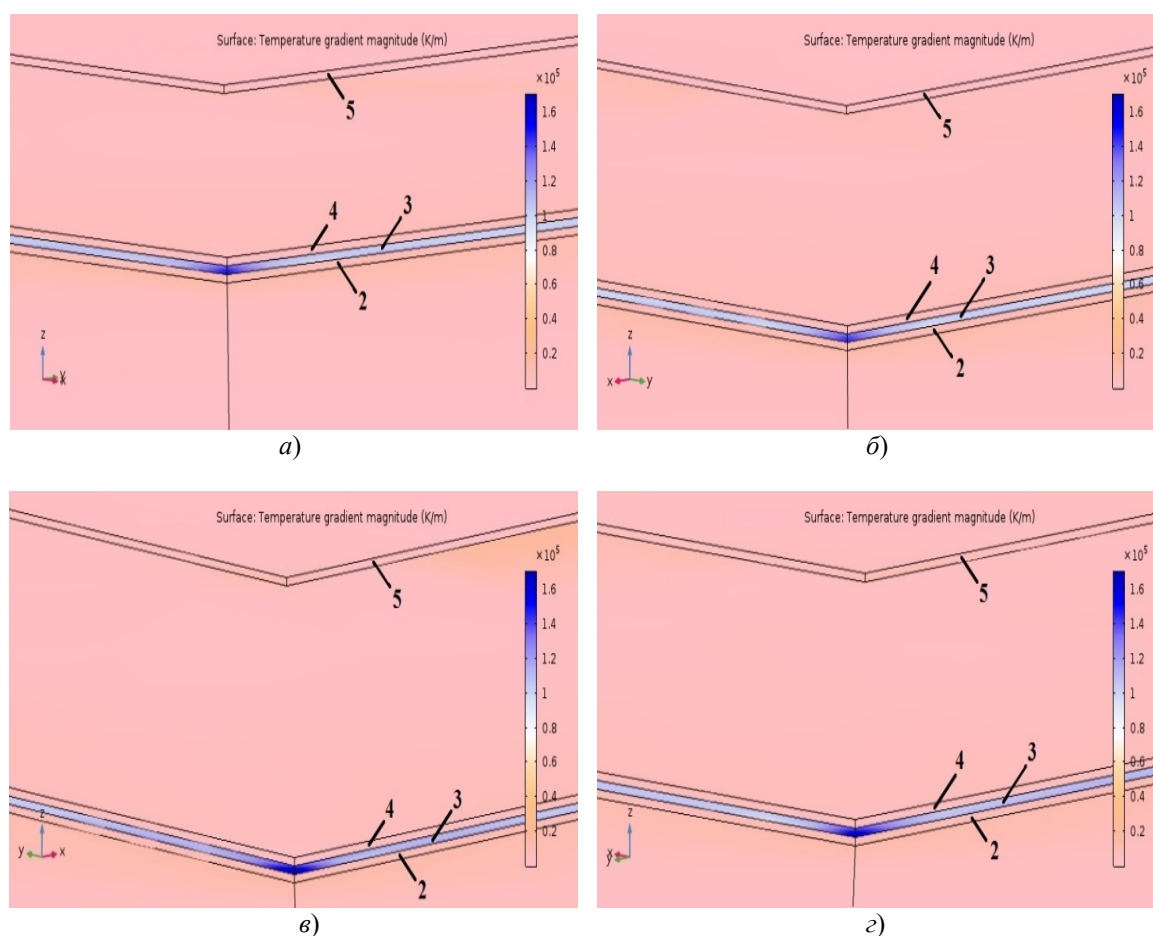


Рисунок 4.2 – Увеличенный фрагмент профилей распределения градиентов температуры в 12 часов 30 минут в середине июля с северо-восточной (а), северо-западной (б), юго-восточной (в) и юго-западной (г) сторон тонкопленочного солнечного элемента на основе CuInSe_2 со стабилизацией температуры $T_0 = 10^\circ \text{C}$ тыльной стороны подложки при наличии теплоизоляции торцов подложки

Согласно полученным результатам, градиент температуры достигает своего максимального значения $\sim 1,7 \times 10^5 \text{ K/m}$ на нижней границе раздела термоэлектрического слоя с юго-восточной стороны около 12 часов 30 минут, а затем – с юго-западной стороны около 14 часов. С северо-востока и северо-запада градиенты температуры на данной границе раздела ниже и составляют соответственно $\sim 1,5 \times 10^5 \text{ K/m}$. Поэтому в дальнейшем целесообразно приводить результаты расчетов только для юго-восточной стороны солнечного элемента, так как там имеем максимальный градиент температур. Увеличение толщины слоев CuInSe_2 до 3 мкм приводит лишь к незначительному снижению градиента температуры на границе раздела первый электродный слой / термоэлектрический слой до $\sim 1,65 \times 10^5 \text{ K/m}$.

Как показали расчеты, минимальная разность температур на границах раздела термоэлектрического слоя наблюдалась в январе $\sim 0,07^\circ \text{C}$ (кривая 4), а максимальная – в июле $\sim 0,17^\circ \text{C}$ (кривая 1) (рисунок 4.3, а). В апреле

и октябре разности температур на границах раздела термоэлектрического слоя соответственно составили $\sim 0,15^\circ \text{C}$ (кривая 2) и $\sim 0,11^\circ \text{C}$ (кривая 3) (рисунок 4.3 б). Максимальные значения градиентов температуры термоэлектрического слоя при этом были равны $\sim 1,70 \times 10^5 \text{ K/m}$ (кривая 1) в июле, $\sim 1,54 \times 10^5 \text{ K/m}$ (кривая 2) в апреле, $\sim 1,16 \times 10^5 \text{ K/m}$ (кривая 3) в октябре и $\sim 0,83 \times 10^5 \text{ K/m}$ (кривая 4) в январе (рисунок 4.4). Как показали расчеты, градиент температуры термоэлектрического слоя в течение года изменяется в пределах от $\sim 1,7 \times 10^5 \text{ K/m}$ до $\sim 0,8 \times 10^5 \text{ K/m}$ (кривая 2) и от $\sim 1,55 \times 10^5 \text{ K/m}$ до $\sim 0,51 \times 10^5 \text{ K/m}$ (кривая 3) соответственно на верхней и нижней границах раздела термоэлектрического слоя (рисунок 4.5). При этом амплитуда выходного напряжения, генерируемого термоэлектрическим слоем тонкопленочного солнечного элемента на основе CuInSe_2 , изменяется в пределах от 2,1 мВ (в декабре) до 5,2 мВ (в июне – июле) (кривая 1) (рисунок 4.5).

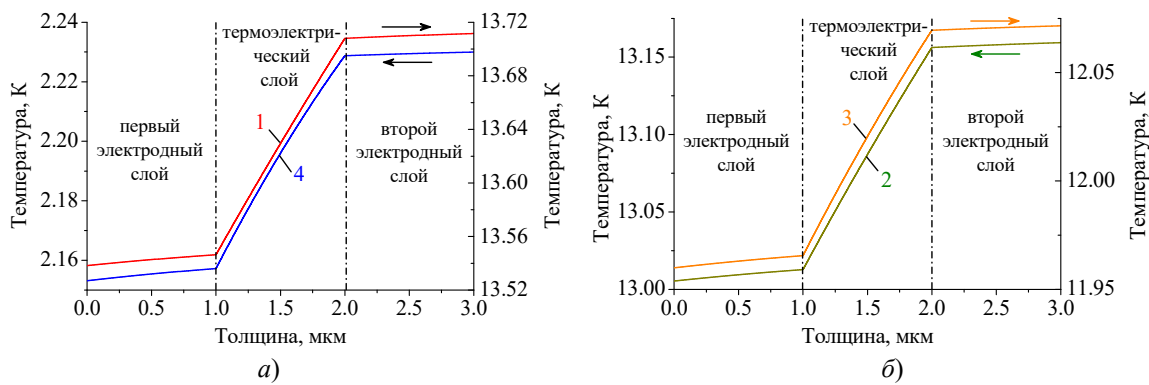


Рисунок 4.3 – Профили распределения температуры в первом электродном слое (толщина 0-1 мкм), термоэлектрическом слое (толщина 1-2 мкм) и втором электродном слое (толщина 2-3 мкм) с юго-восточной стороны в 12 часов 30 минут в середине июля (1) (а), апреля (2) (б), октября (3) (б) и января (4) (а)

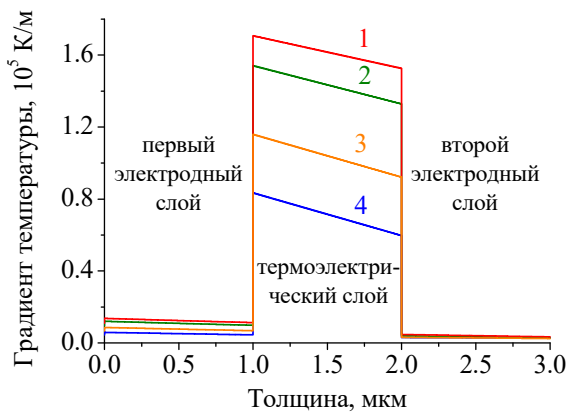


Рисунок 4.4 – Профили распределения градиента температуры в первом электродном слое (толщина 0–1 мкм), термоэлектрическом слое (толщина 1–2 мкм) и втором электродном слое (толщина 2–3 мкм) с юго-восточной стороны в 12 часов 30 минут в июле (1), апреле (2), октябре (3) и январе (4)

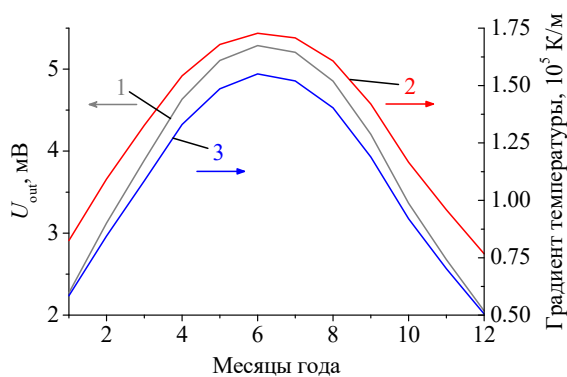


Рисунок 4.5 – Амплитуда выходного напряжения (1), генерируемого термоэлектрическим слоем, и градиенты температуры солнечного элемента CuInSe₂ с теплоизоляцией торцов подложки на верхней (2) и нижней (3) границах раздела термоэлектрического слоя с юго-восточной стороны в течение года

Как видно из зависимостей, приведенных на рисунке 4.4, градиент температуры имеет максимальное значение на нижней границе раздела термоэлектрического слоя CuInSe₂ независимо от времени года, а также температуру окружающего воздуха и верхней поверхности прозрачного электрода. За счет термостабилизации тыльной стороны подложки и теплоизоляции торцов подложки можно оптимизировать рабочую температуру фотоэлектрического преобразователя в реальных условиях эксплуатации.

Закключение

Компьютерный эксперимент показал, что амплитуда выходного напряжения, генерируемого термоэлектрическим слоем тонкопленочного солнечного элемента на основе CuInSe₂, изменяется в пределах от 2,1 мВ (в декабре) до 5,2 мВ (в июне и июле). Это означает, что выбором рабочей точки на вольт-амперной характеристике указанного солнечного элемента, за счет использования термоэлектрического слоя, можно получить увеличение его выходной мощности до 5%. Более того, при стабилизации температуры подложки и наличии концентратора солнечного излучения можно достичь ещё более существенного увеличения выходной мощности рассматриваемого солнечного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марончук, И.И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И.И. Марончук, Д.Д. Санникович, В.И. Марончук // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – № 2. – С. 105–123.
2. Новиков, Г.Ф. Солнечные преобразователи третьего поколения на основе Cu-In-Ga-(S, Se) / Г.Ф. Новиков, М.В. Гапанович // Успехи физических наук. – 2017. – Т. 187, № 2. – С. 173–191.
3. Davis, M.W. Prediction of building integrated photovoltaic cell temperatures / M.W. Davis,

A.H. Fanney, B.P. Dougherty // J. Sol. Energy Eng. – 2001. – Vol. 123, № 2. – P. 200–210.

4. Есман, А.К. Повышение энергоэффективности тонкопленочных солнечных элементов на основе соединения $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ / А.К. Есман, В.А. Потачиц, Г.Л. Зыков // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 1 (26). – С. 30–33.

5. Способ изготовления тонкопленочного солнечного элемента: пат. 20481 Респ. Беларусь: МПК Н 01L 31/18, Н 01L 31/0264 / А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л. Зыков и др.; дата публ. 30.10.2016.

6. Есман, А.К. Моделирование характеристик солнечного элемента на основе CuInSe_2 / А.К. Есман, Г.Л. Зыков, В.А. Потачиц // Приборостроение – 2018: материалы 11-й Международной научно-технической конференции, 14–16 ноября 2018 года, Минск, Республика Беларусь / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 279–281.

7. Ali, O.A. CuInSe_2 (CIS) as a light absorption layer of photovoltaic solar cells / O.A. Ali // American Journal of Nanotechnology. – 2016. – № 7 (1). – P. 13–19.

8. Analyze thermal effects with the Heat Transfer Module. USA, COMSOL, Inc. – Mode of access: <https://www.comsol.com/heat-transfer-module>. – Date of access: 05.12.2019.

9. Алферов, Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, вып. 8. – С. 937–948.

10. A review of solar photovoltaic concentrators / M. Khamooshi [et al.] // International Journal of Photoenergy. – 2014. – Vol. 2014. – P. 958521–1–17.

11. Хромов, С.П. Метеорология и климатология: учебник. – 7-е изд. / С.П. Хромов, М.А. Петросянц. – М.: Изд-во Моск. ун-та: Наука, 2006. – С. 212–214.

Поступила в редакцию 11.12.19.