

*В.Н. БОРЩЕВ, д-р техн. наук, А.М. ЛИСТРАТЕНКО, канд. техн. наук,
Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук, Н.В. ГЕРАСИМЕНКО, канд. техн. наук,
Е.С. ГЛУШКО*

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ КОНЦЕНТРАТОРНАЯ БАТАРЕЯ СОЛНЕЧНАЯ НА ПЛОСКИХ ФОКЛИНАХ

Введение

Достижения в области высокоэффективных многопереходных солнечных элементов (СЭ) на гетероструктурах из материалов типа $A^{III}B^V$ открыли новые возможности в генерировании энергии, за счет преобразования солнечного излучения, но эти возможности привели к необходимости решения новых задач, как технических, так и экономических из-за сложности изготовления таких СЭ и их высокой стоимости.

Возможность снижения расхода полупроводниковых дорогостоящих материалов типа $A^{III}B^V$ в СЭ при использовании концентрированного солнечного излучения позволяет не только существенно снизить стоимость концентраторных батарей солнечных (БС) по сравнению с обычными планарными БС, но и при этом сохранить, а в некоторых случаях и значительно улучшить их энергетические параметры.

В настоящее время концентрирование солнечного света активно и широко исследуется для использования в наземных системах энергоснабжения. Применение концентрированного солнечного излучения в космических солнечных БС также представляет большой интерес, однако исследования в этой области проводятся в недостаточном объеме и еще не достигли своих предельных возможностей.

Из множества существующих способов концентрирования солнечного излучения наиболее приемлемыми считаются для использования в условиях космического пространства два способа: концентрирование солнечного излучения с помощью концентраторов желобкового типа и оптических концентраторных систем на линейных линзах Френеля.

В концентраторных системах желобкового типа (рис. 1, *а*) концентрирование солнечного излучения осуществляется с помощью двух плоских рефлекторов, которые располагаются вдоль длинных сторон панели БС и обеспечивают равномерное распределение отраженного солнечного света на панели БС. Этот способ концентрации используется в низкоэнергетических концентраторах с коэффициентом концентрации света менее чем 3:1 и не требует дополнительных средств охлаждения СЭ.

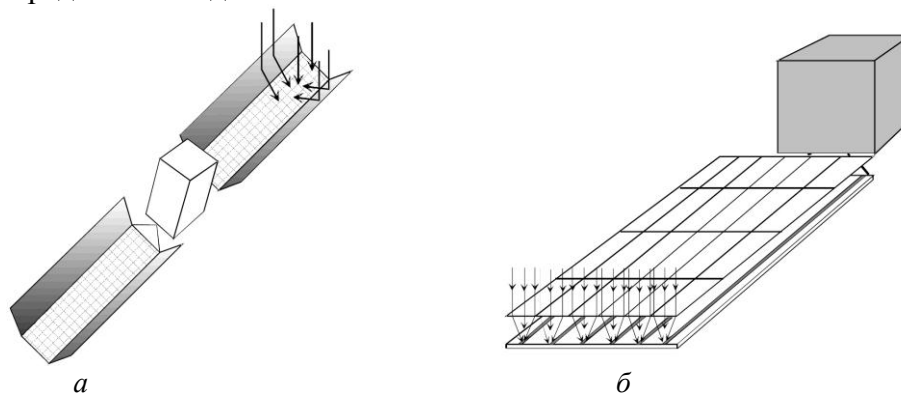


Рис. 1. Концентрирование солнечного излучения с помощью концентраторов:
а – желобкового типа и *б* – оптических концентраторных систем на линейных линзах Френеля

Другой способ концентрирования, с помощью линейных линз Френеля, используется в системах со средней концентрацией от 6:1 до 25:1. В таких системах линзы Френеля концентрируют солнечное излучение на солнечные элементы, которые занимают только часть солнечной батареи (рис. 1, б). При этом может быть достигнута экономия СЭ по площади, массе и стоимости до 50 – 85 % по сравнению с планарными БС [1].

Из-за выделяемого тепла при концентрации ≥ 10 крат второй способ требует применения дополнительных специальных средств, которые могут значительно усложнить конструкцию приемника концентрированного солнечного излучения и всей конструкции солнечной батареи в целом. При этом преимущества в энергетической эффективности могут быть сведены к минимуму из-за недостаточной надежности, низкой долговременной стабильности работы БС и дополнительных затрат на их изготовление. Поэтому, с точки зрения простоты реализации и возможности дальнейшего совершенствования, в настоящее время по-прежнему представляет интерес конструкции концентраторных БС желобкового типа или другими словами БС с концентраторными системами на плоских фоклинах с однократным отражением. Улучшение удельных энергетических параметров таких БС возможно за счет создания облегченных ($0,6 - 0,8 \text{ кг/м}^2$) углепластиковых каркасов, многопереходных арсенид-галлиевых солнечных элементов с КПД до 30 % и более, плоских рефлекторов на основе новых материалов с высоким коэффициентом зеркального отражения ($\geq 95\%$), а также изготовления гибко-жестких приемников солнечного излучения, собранных на основе легких алюминий-полиимидных гибких коммутационных плат и высокотехнологичных 3D-процессов сборки с использованием инновационной технологии chip-on-flex (кристалл на гибкой плате) и применении процессов ультразвуковой сварки.

Как было сказано выше, в настоящее время появилась возможность использования в БС высокоэффективных многопереходных солнечных элементов на гетероструктурах из материалов типа $A^{III}B^V$. Однако цена таких СЭ остается в течение продолжительного времени очень высокой и составляет не менее 8 – 10 Евро за см^2 . Это обстоятельство делает актуальным применение концентрированных БС в космических системах электроснабжения, которые позволяют не только повысить КПД БС, но также при правильном выборе конструктивно-технологических решений и материалов улучшить их удельные энерго-экономические показатели и устойчивость к воздействию вредных факторов космического пространства.

Одним из таких конструктивно-технологических решений является солнечная концентраторная батарея созданная компанией EBLEEngineering's(США), получившая название «CellSaver» (рис. 2) [2]. «CellSaver» – это БС, на панели которой поочередно расположены ряды плоских фоклинов и солнечных элементов и которая позволяет значительно сократить затраты на дорогостоящие СЭ при ее изготовлении.

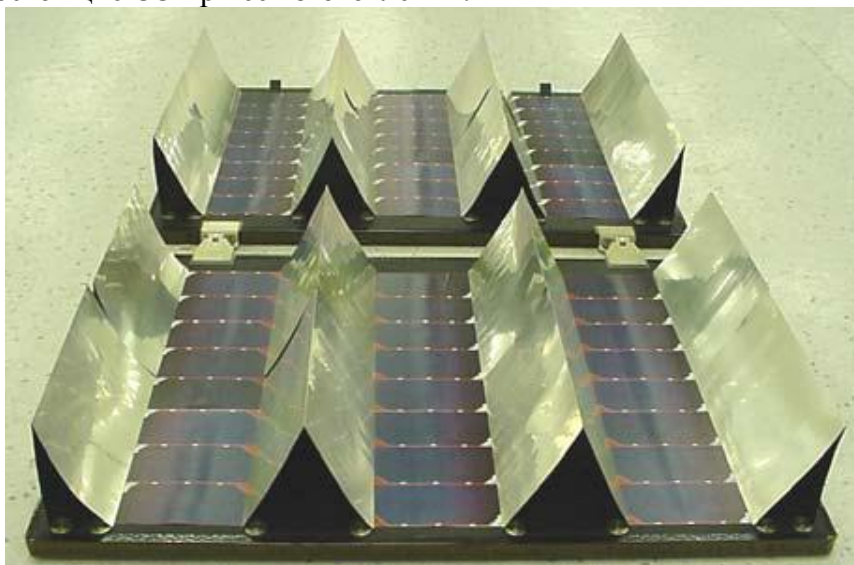


Рис. 2. CellSaver солнечная концентраторная панель

Такая конструкция БС позволила специалистам компании EBLEEngineering's обеспечить двухкратную концентрацию солнечного излучения и найти оптимальный компромисс для улучшения ее эффективности, массовых и стоимостных параметров батареи без сложных систем отвода тепла от солнечных приемников и ориентации БС. При этом обеспечивается сокращение расходов на изготовление БС почти на 25 %, экономия затрат на солнечные элементы более, чем на 50 %. Достигаются большие значения приемлемых углов разориентации БС: $\pm 12^\circ$ по ширине фоклинов и $\pm 24^\circ$ по их длине. Также было обеспечено уменьшение массы БС до 20 % по сравнению со стандартными планарными солнечными батареями.

Задача, которая решалась авторами при выполнении данной работы, заключалась в исследовании прототипа концентраторного солнечного модуля на основе плоских фоклинов с улучшенной оптической эффективностью. Основным элементом плоского концентратора, представляющего собой линейную конструкцию, являются плоские светоотражающие поверхности, которые выполняют первоочередную роль в эффективности концентрирующей системы в целом. Для того чтобы обеспечить равномерное распределение освещенности по панели солнечной батареи, рефлекторы должны быть идеально плоскими, так как любая неравномерность поверхности снижает энергетический выход панели. Но при этом плоские фоклины, что особенно важно, сохраняют исходное значение среднего коэффициента концентрации при невысокой точности ориентации осей отражателей на Солнце [3].

Практически уникальным в своем роде материалом с направленным отражением считается алюминий. При качественной полировке его поверхности, коэффициент его отражения может превышать 80 %, но алюминий в чистом виде очень быстро тускнеет, окисляясь на воздухе. В связи с этим необходимо принимать дополнительные меры для защиты алюминиевых отражателей от непосредственного контакта с воздухом. Вариантов выполнения такой защиты металлов от быстрого окисления предостаточно. Самыми известными и чаще всего используемыми методами можно считать альзакирование и электрохимическое полирование (анодирование). В 1994 году компания ALANOD (Германия) смогла создать материал нового поколения MIRO[®] с покрытием, нанесенным методом вакуумного напыления (PVD), обеспечивающим отражение 95 % света при полном отсутствии искажений цветности и интерференции. Это позволило обеспечить серьезный прорыв в технологии. Ранее коэффициент светоотражения анодированного алюминия не превышал 87 %. В 2003 году ALANOD усовершенствовал процесс нанесения слоев на алюминиевую полосу, для увеличения коэффициента общего отражения до 98%. Для этих целей была специально построена линия вакуумной обработки, предназначенная исключительно для нанесения серебра и производства продукта с уникальными свойствами – MIRO-SILVER [4].

Стоимость этого нового материала на три порядка меньше ($\sim 0,02-0,03$ евро/см²), чем стоимость высокоэффективных гетероструктурных многопереходных СЭ (~ 10 евро/см²). Поэтому разработка новых конструктивно-технологических решений концентраторных солнечных модулей типа CellSaver с применением в качестве плоских рефлекторов нового материала MIRO-SILVER может не только существенно улучшить оптическую эффективность концентраторной системы (до 2,5 – 3 крат) и, соответственно, увеличить удельные мощностные показатели БС, но и при этом обеспечить снижение затрат на ее изготовление.

Таким образом, целью выполненной работы являлось создание представительских тестовых образцов нового усовершенствованного варианта концентраторных батарей типа CellSaver с плоскими фоклинами, выполненными из фольги с полированным алюминием и из материала типа Miro-Silver 4270 AG (Mirohighreflective 95) с коэффициентом зеркального отражения более 95 %, а также сравнительные исследования их фотоэлектрических и оптических параметров.

Полученные результаты

Для экспериментальных и физических исследований были изготовлены два представительских образца концентраторной БС, так называемые тестовые структуры качества (ТСК).

Каждый образец ТСК содержал стеклосотопластовый каркас, гибкую коммутационную плату на основе алюминий-полиимидного носителя с солнечными элементами, соединенными последовательно, и плоский фоклин. В приемниках концентрированного солнечного излучения ТСК были использованы высокоэффективные трехпереходные арсенид-галлиевые СЭ с интегрированными защитными диодами с КПД 25 % и фотоэлектрическими параметрами при условиях АМО, $T=25\pm 2$ °С, для 1 см^2 фоточувствительной поверхности СЭ (табл.1, рис.3). СЭ были изготовлены компанией CESI (Милан, Италия) [5].

Таблица 1

- напряжение холостого хода, V , не менее	2,5;
- удельный ток короткого замыкания, mA/cm^2 , не менее	17,8;
- средний КПД, %, не менее	25,2;
- напряжение в точке максимальной мощности, V	2,2;
- удельный ток в точке максимальной мощности, mA/cm^2 , не менее	15,2;
- максимальная мощность, W/cm^2	0,03;
- FF, %	75

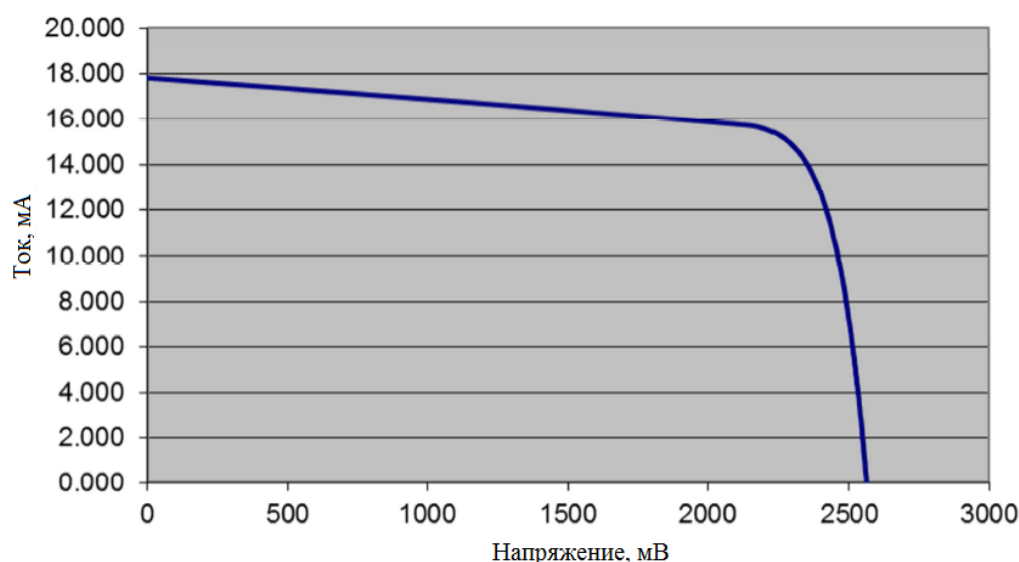


Рис. 3. ВАХ СЭ для 1 см^2 фоточувствительной поверхности СЭ(АМО) [5]

Исследуемые тестовые структуры качества конструктивно не отличались между собой. Различия были только в типах зеркализованных материалов плоских отражателей фоклина. На рис. 4, 5 представлены результаты измеренных спектральных коэффициентов отражения материала типа Miro-Silver 4270 AG (Mirohighreflective95) и полированной фольги из алюминия А5 99,3 (ISO 209-1), $h=200$ мкм.

Измерения проводились в диапазоне длин волн от 0,3 до 1,0 мкм с шагом 20 нм. Измерения проводились с использованием Государственного первичного эталона единиц спектральных коэффициентов прямого пропускания, зеркального и диффузного отражения, который обеспечивает изменения в диапазоне длин волн от 0,2 до 25 мкм (ДЕТУ 11-09-08, г. Харьков, Украина, Харьковский государственный научно-исследовательский институт метрологии, ХГНИИМ).

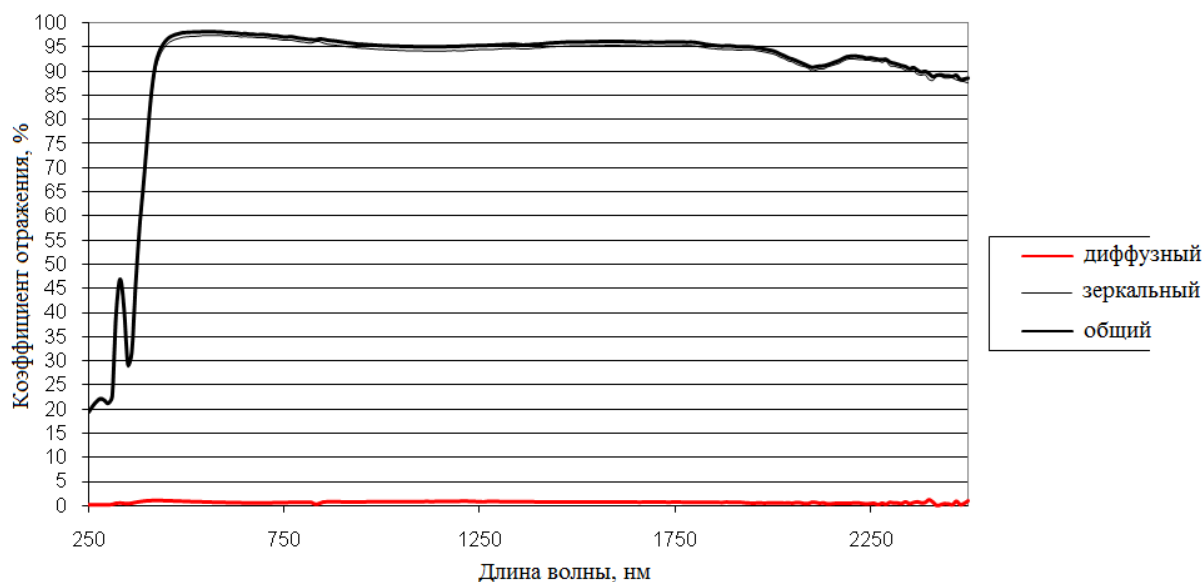


Рис. 4. Спектральная отражательная способность плоского отражателя из материала Miro-Silver 4270 AG ($h=200$ мкм) компании ALANOD (Германия)

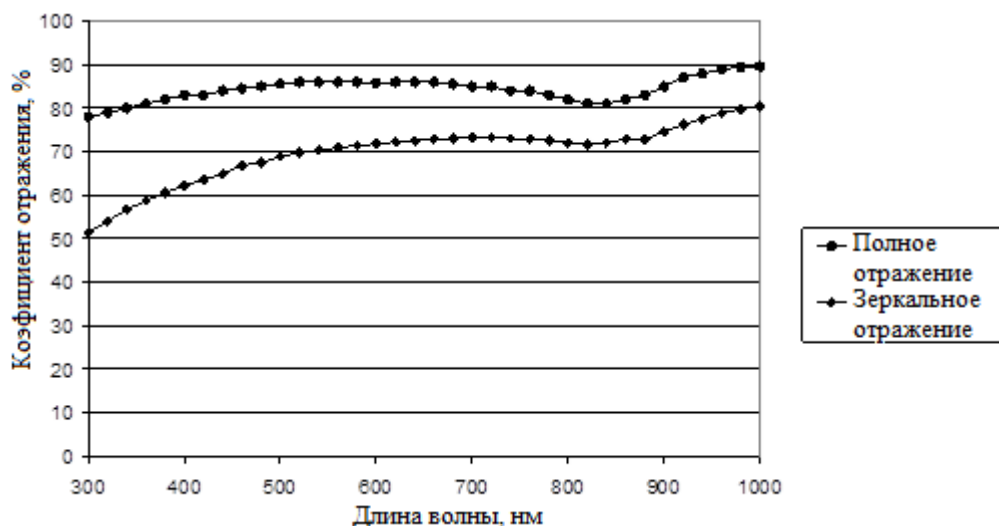


Рис. 5. Спектральная отражательная способность полированной фольги из алюминия A5 99,3 (ISO 209-1), $h=200$ мкм

Сравнительные исследования спектральных коэффициентов отражения фольги типа MIRO-SILVER 4270 AG подтвердили высокие отражающие параметры этого материала. Общий коэффициент отражения находится в диапазоне 95 – 98 % в интервале длин волн от 0,3 до 1 мкм. При этом общий коэффициент отражения у полированной фольги из алюминия A5 не превышает 85 %. Кроме того, MIRO-SILVER 4270 AG практически не отражает солнечное излучение в ультрафиолетовом диапазоне, поэтому концентраторы на его основе не будут концентрировать ультрафиолетовое излучение на солнечные элементы и, следовательно, в отличие от полированного алюминия концентрированное ультрафиолетовое излучение не приведет к ускоренному старению и помутнению защитных стекол на солнечных элементах и к старению адгезивных слоев в приемниках солнечного излучения.

В процессе выполнения работы были проведены аналитические расчеты для определения максимального коэффициента концентрации солнечного излучения при оптимальном соотношении угла наклона и высоты отражающей поверхности для плоских фоклинов с покрытием из фольги типа MIRO-SILVER 4270 AG (рис. 6, а) и полированной фольги из алюминия марки A5 (рис. 6, б).

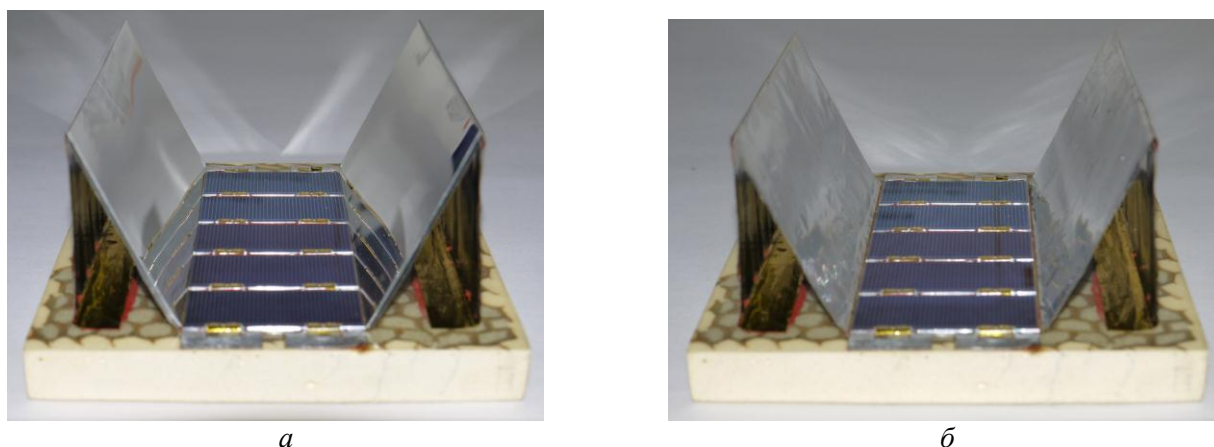


Рис. 6. Концентраторные модули с плоским фоклином на основе: *а* – материала типа MIRO-SILVER 4270 AG и *б* – полированной фольги из алюминия марки А5

Расчет коэффициента концентрации осуществлялся исходя из геометрических составляющих, представленных на рис. 7.

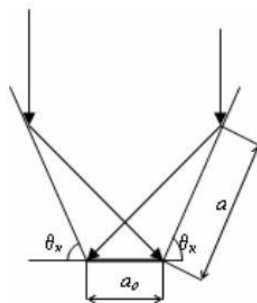


Рис. 7. Схема отражения падающих лучей фоклином

Выражение для среднего коэффициента концентрации имеет вид [6]:

$$K_C = 1 + N \sum_{n=1}^{n_k} (-1)^n R_C^n \cos 2n\theta_k,$$

где N – число граней концентратора; R_C – коэффициент отражения.

Геометрический коэффициент концентрации имеет вид:

$$K_k = 1 + R_C N \frac{a}{a_0} \cos \theta_k,$$

a – ширина отражающей поверхности; a_0 – ширина приемника излучения; θ_k – угол наклона отражающей поверхности.

В конструкции типа плоский фоклин геометрические размеры рефлекторов лимитированы тем, что ширина жесткого рефлектора ограничена сверху шириной солнечных элементов, заложенных в стрингах приемников панели солнечной батареи. Этот факт ограничивает коэффициент концентрации солнечного излучения, так как конструкция концентраторных панелей БС должна быть максимально приближена к традиционным схемам разворачивания и конструкционным параметрам (толщина панели должна быть не более 30 – 40 мм) обычных планарных космических БС.

При фиксированной высоте концентратора 40мм, ширине приемника a_0 , равной 30 мм (длина СЭ), оптимальные значения ширины отражающей поверхности и угла наклона зеркала будут составлять 52,2 мм и 50° для материала MIRO-SILVER 4270 AG и полированной фольги из алюминия А5 с коэффициентом отражения 0,96 и 0,8 соответственно (рис. 8).

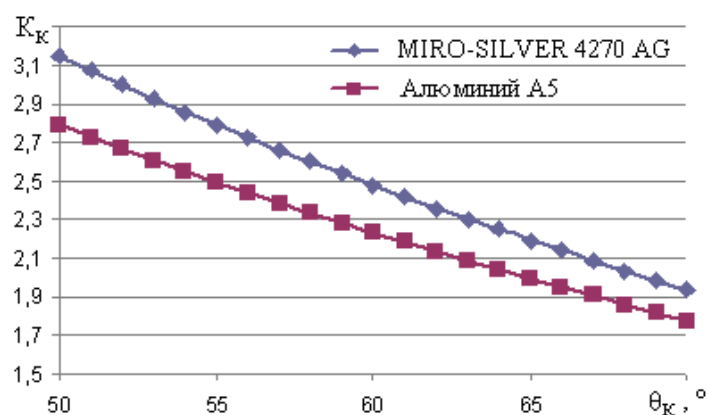


Рис. 8. Зависимость коэффициента концентрации от угла наклона отражающей поверхности для разных типов материала

Из графика (рис. 8) следует, что при ограничении высоты фоклина равной 40 мм геометрический коэффициент концентрации K_k уменьшается с увеличением угла наклона отражающей поверхности в связи с уменьшением ширины отражающей поверхности. При оптимальном соотношении угла наклона и ширине отражающей поверхности коэффициент концентрации для материала MIRO-SILVER 4270 AG будет на 12 % больше, чем для полированной фольги из алюминия марки А5. Таким образом, дальнейшие расчеты энергетических параметров концентраторного модуля проводились нами только для фоклина из материала MIRO-SILVER 4270 AG, так как данный материал обеспечивает более высокую оптическую эффективность концентрирующей системы.

При выбранном соотношении геометрических размеров элементов концентраторного тестового модуля его площадь составила 107 см^2 , из которых на приемник солнечного излучения приходится всего 33 см^2 , т. е. фотогенерирующая часть концентраторной БС с плоскими фоклинами почти в три раза меньше, чем у планарной БС.

Проведенный расчет для условий АМО возможной величины удельной выходной мощности по площади тестового концентраторного модуля с плоским фоклином с выбранными оптимальными геометрическими размерами, максимальным коэффициентом концентрации (3,1) и выбранными солнечными элементами (КПД 25 %) подтвердил высокие значения удельной выходной мощности по площади концентраторного модуля, которая составила более 300 Вт/м^2 .

Сравнительный анализ фотоэлектрических параметров концентраторных БС и стандартных планарных БС показал возможность реализации концентраторных модулей с плоскими фоклинами ни в чем не уступающими планарным БС по энергетическим показателям. В табл.2 приведены ориентировочные результаты сравнительных расчетов при условиях АМО, $T=25\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, для 1 м^2 БС.

Таблица 2

№	Характеристики БС	Концентраторная БС	Планарная БС
1	Количество СЭ (30x20 мм), шт/м ²	468	1500
2	Выходная мощность по площади для АМО, Вт/м ²	302	270
3	Стоимость концентраторов + СЭ, €/м ²	28400	-
4	Стоимость СЭ, €/м ²	28080	90000
5	Коэффициент заполнения СЭ 1 м ² БС	0,28	0,9

Как следует из табл. 2, у выбранной конструкции концентраторной БС для получения удельной мощности сравнимой с удельной мощностью планарной БС требуется почти в три раза меньшее количество СЭ. Стоимость основных материалов 1 м^2 концентраторной БС

также меньше более, чем в три раза по сравнению с планарной БС. При этом затраты на плоские рефлекторы фоклинов, которые занимают основную часть площади концентраторной БС, практически не влияют на ее общую стоимость.

Заключение

1. Подтверждена принципиальная возможность создания нового усовершенствованного варианта концентраторных батарей типа CellSaver с плоскими фоклинами, выполненными из материала типа Miro-Silver 4270 AG (Mirohighreflective 95) с коэффициентом зеркального отражения более 95 %, с улучшенными удельными фотоэлектрическими и оптическими параметрами.

2. Новая конструкция концентратора на плоских фоклинах позволила реализовать трехкратную концентрацию солнечного излучения и обеспечить:

- удельную мощность по площади не менее $300 \text{ Вт}/\text{м}^2$;
- экономию затрат на солнечные элементы более, чем в три раза;
- снижение стоимости основных материалов прототипа БС более, чем в три раза.

3. Дальнейшие работы по снижению удельных энергетических параметров БС по массе будут направлены на разработку и создание объемных каркасов из облегченных углепластиковых композитов, которые позволят достичь величины выходной удельной мощности по массе концентраторной БС не менее $75 \text{ Вт}/\text{кг}$, что соответствует мировому уровню современных планарных БС космического назначения. При этом конструкция концентраторных БС может быть максимально приближена к традиционным схемам разворачивания и конструкционным параметрам обычных планарных космических БС и позволит обеспечить возможность их применения в составе существующих и перспективных космических аппаратов широкого применения, не требующих точной ориентации на Солнце.

Список литературы: 1. *Serge Habraken, Jean- Marc Defise, Jean – Paul Collete, Pierre Rochus, Pierre-Alexis D’odemont and Michael Hogge. Space Solar Arrays and Concentrators // Materials of 51st International Astronautical Congress 2-6 Oct 2000 / Rio de Janeiro-Brazil.* 2. *M. Eskenazi Design, Analysis and Testing of the CellSaver Concentrator for Spacecraft Solar Arrays // Materials of IEEE PVSC, May 2002.* 3. *Гуревич Е.В. Губин С.В. Применение голографического концентратора солнечного излучения в гибридном солнечном приемнике // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №2(89). – С. 90 – 95.* 4. www.alanod.com. 5. www.cesi.com. 6. *Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. – Л. : Наука, 1989. – С. 310.*

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 05.04.2014