

ФИЗИКА ПРИБОРОВ, ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ

УДК 621.311.243

*В.Н. БОРЩЕВ, д-р техн. наук, А.М. ЛИСТРАТЕНКО, канд. техн. наук,
Н.В. ГЕРАСИМЕНКО, канд. техн. наук, Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук,
М.А. ПРОЦЕНКО, И.Т. ТЫМЧУК, А.П.КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук,
В.В.ГАВРИЛКО, канд. техн. наук*

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КОНЦЕНТРАТОРНЫХ БАТАРЕЙ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ЛИНЕЙНЫХ ЛИНЗАХ ФРЕНЕЛЯ

Введение

Аномальная работа планарных солнечных батарей в условиях космического полета является серьезной проблемой, что может существенно сократить срок эксплуатации космических аппаратов. Для систем энергоснабжения всех типов спутников обеспечение необходимой мощностью имеет решающее значение. Кроме того, системы энергоснабжения на солнечных батареях намного более дорогостоящие системы, чем любые другие системы космических аппаратов (КА). Батареи солнечные (БС) подвергаются воздействию вредных факторов космического полета больше, чем любые другие элементы, поэтому сбои в работе солнечных батарей сразу после запуска КА могут свидетельствовать о том, что конструкция и технология БС плохо отработаны, либо допущены дефекты при сборке и тестировании БС. За последние два десятилетия изготовителям высокоэнергетических КА удалось значительно увеличить срок эксплуатации КА на геостационарных орбитах. Время эксплуатации планарных БС превысило 15 лет. Несмотря на это защита БС от аномальных воздействий вредных факторов космического пространства остается серьезной проблемой. При эксплуатации в космическом пространстве солнечные батареи и, соответственно, фотопреобразователи (ФП) подвергаются воздействию радиации (радиационные пояса Земли, солнечное и космическое излучение), в результате чего происходит постепенное ухудшение их электрических характеристик.

Повышение защищенности и надежности солнечных батарей позволит снизить затраты на их эксплуатацию в составе КА в течение всего срока активного существования (САС).

Так как исследование космоса продолжает оставаться одной из главных задач ведущих мировых космических держав, солнечные электрические системы все еще остаются одними из самых важных систем для обеспечения энергией КА на околоземных орбитах и для транспортировки КА к другим планетам в нашей солнечной системе. Но при этом существуют несколько важных проблем, которые являются потенциальными препятствиями для дальнейшего широкого применения в системах электроснабжения современных КА традиционных планарных БС. Необходимо добиться значительного уменьшения радиационных повреждений БС, обеспечить возможность их функционирования при высоких напряжениях (более 300 В), а также разработать такую конструкцию БС, которая будет устойчивой к воздействиям микрометеоритов и вредным факторам космического пространства как на орбитах Земли, так и во время межпланетной транспортировки КА. При этом также имеет большое значение, чтобы БС обладала малым весом, имела высокие значения удельных мощностей по площади и массе, а также цену изготовления значительно ниже, чем традиционные планарные солнечные батареи.

Постановка задачи и цель

Достигнутый мировой технологический уровень разработок фотопреобразователей позволил развернуть в ведущих мировых космических державах промышленное производство высокоэффективных фотопреобразователей с КПД до 30 %. Такой результат стал возможным благодаря существенным успехам в области разработки и производства мультикаскадных наногетероструктурных ФП на материалах III и V групп таблицы Менделеева. Это позволило за последние два десятилетия основным производителям КА увеличить уровни мощности бортовых энергоустановок с 3 – 5 до 15 – 20 кВт. В то же время жесткая конкуренция на мировом рынке космических услуг, прежде всего в области связи, требует дальнейшего непрерывного увеличения энерговооруженности космических платформ. Ожидается, что в ближайшее время появятся солнечные элементы с КПД 33 – 35 %, а в недалекой перспективе – и более 40 %. При этом становится вполне реальным доведение энергетики космических геостационарных связных платформ до 20 – 30 кВт. Однако выполнение этой задачи приведет к значительному увеличению стоимости планарных солнечных батарей для КА таких классов из-за увеличения суммарной площади панелей БС, которая превысит барьер в 100 квадратных метров. Причина увеличения стоимости БС заключается в том, что высокая цена материалов и стоимость изготовления высокотехнологичных многопереходных солнечных элементов в настоящее время не позволяют достичь низкой стоимости космических солнечных батарей с плоскими гетероструктурными элементами, что затрудняет дальнейшее быстрое наращивание энерговооруженности современных КА. В аналогичной ситуации в свое время переход от производства кремниевых фотопреобразователей с КПД 16-17 % к производству арсенид-галлиевым фотопреобразователям с КПД до 30 % увеличил их удельную стоимость на 1 м² в четыре раза. Можно предположить, что переход к фотопреобразователям с КПД до 40 % также значительно и непропорционально увеличит их стоимость. Кроме того, при освоении новой продукции, как правило, наблюдается ее дефицит из-за недостатка производственных мощностей, что также вносит свой вклад в увеличение ее цены. Проблема может быть успешно решена при создании и использовании солнечных фотоэлектрических установок с концентраторами излучения. В этом случае размер солнечного элемента (СЭ), который размещается в фокусе концентратора, уменьшается пропорционально кратности концентрирования излучения (для БС космического назначения – в восемьдесят раз). Таким образом, радикально снижается расход дорогих полупроводниковых материалов и структур, а следовательно, и их вклад в стоимость единицы вырабатываемой мощности. Кроме того, за счет повышения КПД при облучении СЭ концентрированным солнечным излучением появляется возможность уменьшить площадь солнечных батарей или компенсировать потери в концентраторных элементах, необходимых для получения заданной единицы электрической мощности. Это дает дополнительную экономию средств, расходов на конструкцию установок, на запуск космических солнечных батарей, поддержание параметров орбиты КА и т.п. В результате стоимость единицы электрической мощности БС с концентраторами излучения будет существенно ниже, чем в случае обычных плоских БС без концентраторов, не говоря уже об экономии дефицитных полупроводниковых материалов, сокращении затрат на обеспечение экологических норм безопасности полупроводникового производства и т.п.

В случае применения БС с концентраторами на КА имеется возможность значительно сократить объемы производства дорогостоящих полупроводниковых структур и элементов, необходимых для удовлетворения нарастающего энергопотребления в космосе. В результате современные проблемы космической энергетики могут быть решены в значительно более короткие сроки в тех странах, где имеется существенное отставание в создании необходимых производственных мощностей изготовления дорогостоящих наногетероструктурных солнечных элементов.

В то же время в США, где существующие мощности изготовления многопереходных гетероструктурных СЭ вполне могут обеспечить требуемый объем производства планарных

космических БС с такими элементами на ближайшую перспективу, в последние годы также уделяется все большее внимание разработкам и созданию БС с линзовыми концентраторами. Объясняется это, в частности, тем, что, как ожидается, в не столь отдаленном будущем, когда при создании солнечных космических электростанций потребуется на один-два порядка увеличить ежегодное производство высокоэффективных солнечных батарей, использование БС с концентраторами позволит решить эту проблему. Причем эту проблему можно будет решить без увеличения расхода дефицитных и дорогих полупроводниковых материалов и объема выпуска многопереходных гетероструктур и обеспечить при этом значительную экономию на стоимости фотогенерирующей части БС. Особенно эффективно концентраторная космическая техника может быть использована на рубеже 2015 – 2020 гг., когда, как ожидается, появятся высокоэффективные солнечные элементы третьего поколения. К солнечным элементам третьего поколения относят солнечные элементы с квантовыми точками. В работе [1] теоретически было показано, что введение квантовых точек (КТ) узкозонного полупроводникового материала (например, InAs) в солнечный элемент, изготовленный из широкозонного полупроводникового материала (например, GaAs), позволяет достичь эффективности более 70 % за счет суммирования энергии двух длинноволновых квантов света, которые не поглощаются в материале широкозонного полупроводника, а поглощаются материалом КТ. Теоретический анализ показывает, что утилизация длинноволновой и коротковолновой части спектра солнечного излучения с помощью КТ в дальнейшей перспективе позволит достичь эффективности солнечных элементов близкой к термодинамическому пределу 90 % [2].

В настоящее время нет оснований предполагать, что СЭ третьего поколения будут стоить меньше, чем гетероструктурные многопереходные СЭ с КПД более 30 %. Может оказаться, что высокотехнологичные наукоемкие СЭ с квантовыми точками с КПД более 70 % будут значительно дороже. К тому же, понадобится не один год, чтобы создать промышленные мощности для их производства в необходимом для космической отрасли количестве планарных БС. В этих условиях концентраторные солнечные панели смогут оказать достойную конкуренцию традиционным плоским БС не только по цене за 1 Вт и удельной массе, но и значительно улучшить параметры солнечных панелей по удельной выходной мощности по площади и массе. Как уже упоминалось выше, концентраторные солнечные панели позволяют существенно снизить такой важный экономический показатель как удельная стоимость.

Таблица 1

Тип каркаса	Типопредставители БС	Энергетические и технические параметры БС на начало САС, АМО, +25 ⁰ С			Удельная стоимость БС, к€/м ²	Удельная стоимость БС, €/Вт
		Степень концентрации, крат	Удельная мощность по площади, Вт/м ²	Удельный вес, кг/м ²		
1. Объемный углепластиковый каркас	Инновационное конструктивно-технологическое решение концентраторной БС в объемном гофрированном каркасе	x8	~310	~1,8	~40÷50	~130÷160
2. Углесотопластиковый каркас	Современная планарная БС на трехпереходных арсенид-галлиевых СЭ с КПД до 30%	x1	~360	~2,5÷2,8	~100÷110	~280÷310

По сравнению с традиционными планарными БС (табл. 1) этот показатель может быть снижен почти в два раза за счет уменьшения площади дорогостоящих СЭ на 85 % (более чем

в шесть раз), а также за счет применения недорогих материалов в конструкции концентраторной системы. При этом стоимость арсенид-галлиевых СЭ в фотогенерирующей части (ФГЧ) концентраторной панели также будет меньше, чем в планарных БС, почти в 6 раз. Типовые крупногабаритные арсенид-галлиевые солнечные планарные батареи для высокоэнергетичных платформ КА при выходной мощности на начало САС около 25 кВт имеют общую площадь порядка 100 квадратных метров. Для создания солнечной батареи такой площади финансовые затраты составят около 11 миллионов евро (это при оптимистическом подходе, на самом деле цена может быть значительно выше – в 1,5-2 раза), в то время как аналогичная концентраторная БС обойдется всего в четыре миллиона евро при стоимости до 130 евро/Вт (табл.2). Для такой планарной БС потребуется около 90000 евро на приобретение многопереходных СЭ, а для концентраторной БС для этих целей будет достаточно всего около 15000 евро при ориентировочной цене СЭ 10 евро за квадратный сантиметр.

Таблица 2

Тип БС	Программа выпуска БС		
	100м ²	1000 м ²	10000м ²
	Стоимость, млн €	Стоимость, млн €	Стоимость, млн €
Планарная БС	11,0	110,0	1100,0
	В том числе стоимость СЭ, млн €	В том числе стоимость СЭ, млн €	В том числе стоимость СЭ, млн €
	0,09	0,9	9,0
Концентраторная БС	4,0	40,0	400,0
	В том числе стоимость СЭ, млн €	В том числе стоимость СЭ, млн €	В том числе стоимость СЭ, млн €
	0,015	0,15	1,5

Как следует из сравнения стоимостных параметров концентраторных БС и традиционных планарных БС космического назначения (табл. 2), при программе выпуска планарных БС общей площадью 1000 м² для высокоэнергетичных КА в количестве 10 штук потребуется ориентировочно около 110 млн евро, в то время как для концентраторных БС на это уйдет всего лишь 40 млн евро. То есть, концентраторная технология позволит высвободить средства для создания дополнительно около 1700 м² концентраторных солнечных батарей. Если потребуется увеличить программу выпуска БС еще на порядок, то концентраторных солнечных батарей можно будет выпустить на 17000 м² больше чем планарных БС при одних и тех же общих затратах.

Таким образом, проведенный оценочный анализ затрат на производство солнечных батарей на основе концентраторной и традиционной планарной технологий позволяет сделать вывод о высокой экономичности концентраторных БС по сравнению с планарными БС. Особенно значимым это преимущество может стать в близкой перспективе, когда будут разработаны и изготовлены промышленные образцы СЭ с КПД 40 – 60 % и появится возможность еще более уменьшить удельную стоимость на Вт концентраторных БС по сравнению с планарными БС.

Цель выполненной работы – разработка инновационных подходов к созданию экономичных, коммерчески привлекательных, высокоэффективных радиационно-стойких концентраторных БС космического назначения на основе концентрирующих линейных линз Френеля, способных защитить солнечные элементы батарей от воздействия техногенного космического мусора с использованием облегченных углекомпозитных конструкций, недорогих, легкодоступных и широко применяемых материалов.

Полученные результаты

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 [3].

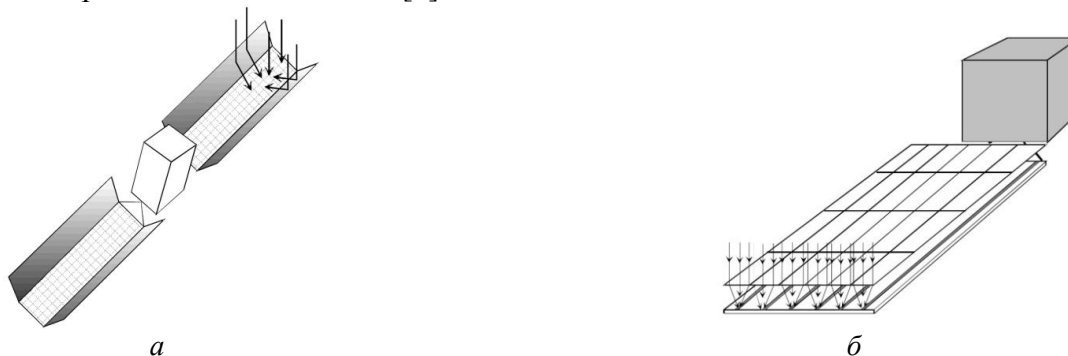


Рис. 1. Способы концентрирования солнечного излучения в БС

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 [4].

Конструкция концентраторных БС на линзах Френеля позволяет решить большинство из описанных выше проблем и обеспечить более надежную защиту фотогенерирующей части приемников солнечного излучения по сравнению с планарными БС за счет:

- более высокой устойчивости к воздействию радиации;
- высокому сроку активного существования на радиационноопасных орбитах;
- более высокой устойчивости к воздействию атомарного кислорода;
- более высокой степени защищенности фотогенерирующей части БС от воздействия космического мусора и микрометеоритов;
- возможности создания высоковольтных БС (более 100 В) с высокой степенью защиты от воздействия вредных факторов космического пространства;
- возможности создания малоразмерных высоковольтных БС (250 – 300 В) для прямого электропитания маломощных ионно-плазменных реактивных двигателей;
- возможности применения в КА различных функциональных назначений, в т.ч. на значительно удаленных от Солнца расстояниях.

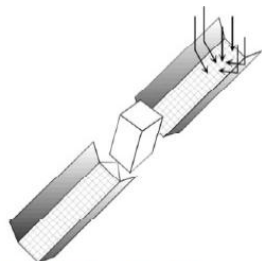
Для более полного понимания конструктивных особенностей и получения сравнительных характеристик авторами был проведен анализ уже существующих конструкций концентраторных БС на линзах Френеля и их параметров (табл. 3, рис. 2).

Начиная с 1986 г. ENTECH SOLAR, Inc. и NASA (США) разрабатывают и повышают качество космических фотовольтаических батарей с использованием концентраторных технологий на основе эффекта рефракции. В отличие от технологий, использующих концентрацию солнечного излучения за счет отражения, концентраторы на линзах Френеля позволяют

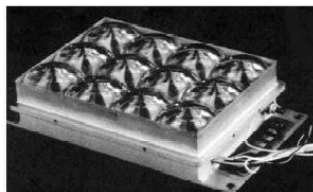
за счет своей конфигурации минимизировать влияние геометрических ошибок, дают возможность обеспечить их качество при изготовлении, сборке и работе на орбите.

В начале 1990-х годов первая космическая концентраторная батарея на основе эффекта рефракции была разработана и прошла летные испытания при проведении PASP Plus миссии в 1994 – 1995 гг. [5].

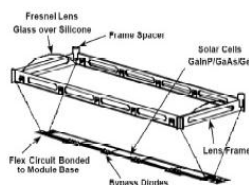
Эта батарея состояла из нескольких испытательных ячеек. В испытательных ячейках использовались миникупольные линзы Френеля компании ENTECH SOLAR Inc., которые устанавливались над приемником солнечного излучения компании Boeing, представляющим собой тандемные механически соединенные многопереходные солнечные элементы, установленные один над другим (GaAs над GaSb). Каждая миникупольная точечнофокусная линза Френеля имела многослойное защитное покрытие компании Boeing и OCLI, обеспечивающее защиту от космического ультрафиолетового (УФ) излучения и атомарного кислорода. Линзы были изготовлены очень тонкими и легкими. Тандемные солнечные элементы также были выполнены малых размеров, что позволило обеспечить снижение их веса и стоимости. Данная конструкция концентраторной солнечной батареи на силиконовых линзах Френеля подтвердила свои высокие характеристики, радиационную стойкость и долговременную стабильность.



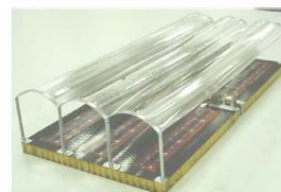
Концентраторные СБ с плоскими концентраторами желобкового типа (Low-Concentration Ratio (LCR) США, 1990 г)



Концентраторный модуль с миникупольными линзами Френеля, Entech Inc., США, 1990 г



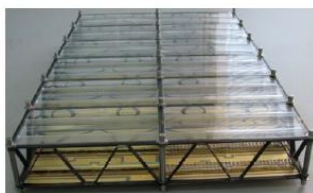
Концентраторный модуль SCARLET, Entech Inc., США, 1998 г



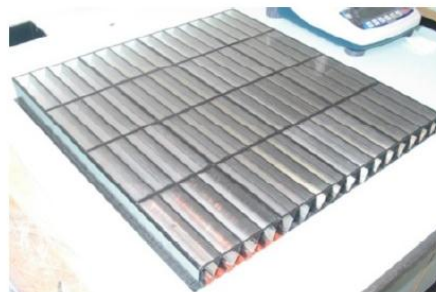
Концентраторный модуль Rigid-panel SLA на каркасе типа «картина в раме», Entech Inc., США, 2006-2010 г.



Концентраторный модуль космического назначения разработки ФТИ им.А.Ф. Иоффе, Россия, 2005 г



Макет фрагмента панели СБ с линейными линзовыми концентраторами солнечного излучения, ФТИ им.А.Ф. Иоффе, Россия, 2012 г.



Макетный образец солнечного концентраторного модуля на линейных линзах Френеля разработки ГП НИТИП, Харьков, Украина, 2013 г.

Рис. 2. Лучшие существующие аналоги концентраторных солнечных модулей и БС на жестких каркасах

В середине 1990-х годов ENTECH, Inc. и NASA разработали новый концентраторный модуль на линейных линзах Френеля, который достаточно легко изготовить и имеет низкую стоимость [6]. Используя непрерывный рулонный процесс, компания 3М смогла освоить массовое производство силиконовых линз Френеля в любых необходимых количествах.

В 1994 г. ABLE Engineering Company присоединилась к разработчикам линейных линз Френеля и возглавила разработку концентраторных модулей SCARLET (Solar Concentrator Array using Refractive Linear Element Technology).

В SCARLET были использованы линзы Френеля из силикона, ламинированного на защитное стекло, обеспечивающее защиту от космического УФ излучения и атомарного кислорода. На солнечной батарее SCARLET была получена удельная мощность по площади

более 200 Вт/м^2 и удельная мощность по массе более 45 Вт/кг , при угле разориентации на Солнце $\pm 2^\circ$ без существенных потерь по мощности (не более 10 %). После трех лет полета, мощность оставалась в пределах $\pm 2\%$ от расчетной.

Rigid-panel STRETCHED LENS ARRAY (SLA) – концентраторная батарея с растянутыми линзами Френеля – это дальнейшее развитие солнечной батареи SCARLET, содержащая основные элементы концентраторных солнечных батарей, такие как многопереходные солнечные элементы, силиконовые линейные линзы Френеля и углекомпозитный плоский радиатор, но при этом позволяющий отказаться от таких массивных элементов как арочные стекла и рамки, удерживающие линзы Френеля, полоски, на которых располагались солнечные элементы приемников и, самое главное, сотовые панели.

В 2002 г. команда, занимающаяся разработкой и совершенствованием новой SLA солнечной батареи, достигла существенного прогресса в SLA технологии, включая успешное изготовление и испытания четырехпанельного прототипа крыла солнечной батареи [7]. Солнечные панели прототипа крыла БС включали фотовольтаические приемники, использующие трехпереходные солнечные элементы. Эти приемники были полностью герметизированы, чтобы иметь возможность работать в условиях высоковольтной космической плазмы. SLA батареи на жестких панелях позволили достичь на начало САС следующие основные параметры:

- рабочее напряжение – $> 100 \text{ В}$;
- удельная мощность по массе – $> 180 \text{ Вт/кг}$;
- удельная мощность по площади – $> 300 \text{ Вт/м}^2$;
- экономия площади и массы солнечных элементов – $> 85\%$;
- экономия удельной стоимости по сравнению с планарными БС – 50 – 75 %.

По сравнению с обычными планарными неконцентраторными фотовольтаическими батареями SLA технология и присущие ей преимущества позволяют существенно уменьшить массу и реально уменьшить стоимость БС. Кроме того, проведенные испытания сверхтонких силиконовых линз Френеля с защитным покрытием от УФ излучения (1800 термоциклов от -180°C до $+120^\circ\text{C}$) подтвердили их срок эксплуатации до 20 лет при условиях, эквивалентных геостационарной орбите. Испытания на воздействие УФ излучения, а также протонов и электронов, эквивалентные сроку эксплуатации силиконовых линз на геостационарной орбите в течение 10 лет, показали незначительные изменения коэффициента пропускания линз в диапазоне излучения $0,3 - 0,5 \text{ мкм}$ (уменьшение менее 10 %). Применение в конструкции SLA жесткой углепластиковой панели типа «картина в раме» позволило уменьшить массу концентраторной SLA батареи на 50 % и достичь удельной массы $\sim 1,7 \text{ кг/м}^2$. Арочная форма линейных линз Френеля обеспечивает максимальную оптическую эффективность (92 %) и максимальные допуски на угловые погрешности формы поверхности линз. Эта версия SLA предлагает реальное увеличение мощности солнечных батарей до 20 кВт при минимальных затратах на изготовление и при минимальных массагабаритных характеристиках.

Тем не менее, рассмотренная конструкция концентраторной БС на основе растянутых на арках силиконовых линз Френеля имеет некоторые серьезные недостатки:

- для силиконовых линз Френеля на арочных держателях необходимы специальные высокотехнологичные устройства для раскрытия, натяжения гибких силиконовых мембран, закрепленных на арочных держателях, и фиксации арочных держателей линз;
- закрепление и удерживание гибких силиконовых мембран только с двух коротких сторон арочными держателями и свободное незакрепленное состояние длинных прямых сторон может приводить к существенному изменению формы поверхности линзы при воздействии циклически изменяемой температуры и неконтролируемом раскрытии и фиксации арочных держателей с линзами Френеля;
- в предстартовом сложенном положении панелей БС концы линз закрепленных на арочных держателях выдвинуты наружу из сложенных панелей и подвержены риску быть поврежденными;

- значительный крутящий момент на прижимных петлях при раскрытии панелей БС из сложенного положения увеличивают ударные нагрузки на торцы панелей арочных держателей;

- процессы монтажа арочных держателей на поверхности панелей, закрепление краев гибких силиконовых линз Френеля на арочных держателях требуют применения прецизионной технологической оснастки и существенно усложняют процесс сборки концентраторных БС, а также увеличивают рассовмещения компонентов приемников солнечного излучения и линз Френеля.

В работе [8] описан концентраторный модуль, разработанный в ФТИ им. А.Ф.Иоффе (Россия) в 2005 г. Модуль базируется на линейных линзах Френеля и фотоприемниках с использованием GaInP/GaAs/Ge трехпереходных солнечных элементов. Модуль состоит из четырех линейных линз Френеля с оптической эффективностью от 82 до 84 %, которые выполнены из силиконового полимера на ударопрочном радиационно-стойком, защищающем от воздействия УФ излучения, стекле толщиной 200 мкм. Солнечные элементы, предназначенные для использования в линейках фотоприемников, имели эффективность от 23 до 24 % (при АМО, 25°C) при геометрической концентрации солнечного излучения 6 – 9 крат. Корпус модуля изготавливался из перфорированного материала толщиной 0,5 мм, металлизированного медью.

В описанной конструкции концентраторного модуля приемлемый угол разориентации, при котором гарантируется потеря мощности не более 10 % от номинального значения, составляет $\pm 1^\circ$. Применение дополнительной вторичной оптики в виде полуцилиндрических стеклянных линз, устанавливаемых на фотоприемную поверхность СЭ, позволяет улучшить приемлемый угол разориентации до $\pm 2^\circ$ вокруг оси, параллельной микропризмам линейной линзы Френеля.

Проведенный анализ технических решений рассмотренных выше аналогов концентраторных модулей показал, что концентраторный модуль типа Rigid-panel STRETCHED LENS ARRAY (SLA) на каркасе типа «картина в раме», описанный в [7], и SLA технология с присущими ей преимуществами позволяют существенно уменьшить массу и реально уменьшить стоимость БС по сравнению с обычными планарными не концентраторными фотовольтаическими батареями (табл. 3).

По отношению к стратегическим вызовам в отечественных космических технологиях предлагаемые в данной работе новые подходы по созданию концентраторных солнечных модулей являются по своей сути инновационными и позволяют в относительно сжатые сроки разработать доступные и надежные способы изготовления высокоэффективных экономичных концентраторных солнечных батарей космического назначения, не уступающих лучшим мировым аналогам.

Разработка базируется на следующих основных положениях и идеях:

1. В условиях космоса в качестве концентраторов солнечного излучения наиболее перспективным является применение линейных линз Френеля с кратностью концентрации (6 – 10). Это позволяет обеспечивать относительно точное слежение за Солнцем только вокруг одной оси, параллельной микропризмам линейных линз Френеля, и не требует специальных дополнительных средств охлаждения солнечных элементов в БС.

2. Выполнение прецизионного преломляющего профиля плоских линейных линз Френеля из прозрачного силикона на радиационностойких стеклах с антиотражающими покрытиями, защищающими линзы от воздействия ультрафиолетового излучения.

3. Применение безадгезивных алюминий-полиимидных гибких лакофольговых диэлектриков и использование самых современных многопереходных высокоэффективных $A^{III}B^V$ солнечных элементов открывают возможность создания трехмерных гибко-жестких концентраторных приемников, удовлетворяющих высоким требованиям к массогабаритным характеристикам, напряжениям пробоя, объему, компоновке и технологии сборки солнечных модулей и батарей на их основе.

Таблица 3

Тип каркаса	Типо-представители БС	Энергетические и технические параметры на начало САС, АМ0, 25°С				Удельная стоимость БС, К€/м ²
		Степень концентрации	Удельная мощность по площади, Вт/м ²	Удельный вес, кг/м ²	Приемлемый угол разориентации	
Концентраторные БС с плоскими концентраторами желобкового типа	Low-Concentration Ratio (LCR) США, 1990г.	×(2,5÷3,0)	~350	>4	±6°	~90÷100
Концентраторные БС с линзами Френеля	Углесотопластиковый каркас	×8	~200	>3,0	±2°	~60÷70
	Углесотопластиковый каркас	×8	~300	~3	±2°	~50÷60
	Каркас «картина в раме»	×8	~300	~1,8	±2°	~60÷70
	Объемный каркас	×8	~280	-	±2°	-
	Объемный углепластиковый каркас	×(8÷10)	~300	-	±2°	-
	Объемный углепластиковый каркас	×8	~310	~1,8/2,3	±3,5°	~40÷50
Углесотопластиковый каркас	Современные планарные БС на трехпереходных GaAs солнечных элементах с КПД = 30%	×1	~360	~2,5÷2,8		~100÷110

4. Разработка высокотехнологичных облегченных объемных углепластиковых жестких гофрированных каркасов и несущих конструкций БС, которые обеспечат сохранение в целом распределенного характера преобразования солнечного излучения и теплообмена (как в системах без концентрированного излучения).

5. Разработка автоматизированной «Chip on flex» (COF) технологии сборки солнечных модулей на основе ультразвуковой сварки обеспечит возможность повышения надежности и снижения трудоемкости их изготовления за счет полного исключения проволочной коммутации и упрощения сборочных процессов.

6. Разработка конструкции гибко-жестких солнечных приемников на алюминий-полиимидных носителях и углепластиковых теплопроводных платах, которые выполняют одновременно функции гибкой основы, крепежного элемента, коммутирующей платы с контактными площадками с антикоррозийными покрытиями, эффективного теплоотвода, а также обеспечивают высокую стойкость к воздействию механических нагрузок и уменьшение деформаций, вызываемых циклическими изменениями температуры.

Инновационная полностью алюминиевая «Chip on flex» технология сборки солнечных приемников имеет ряд неоспоримых преимуществ, которые могут быть применены как передовые компоненты критичных технологий космического назначения. Эта технология позволяет обеспечить увеличение плотности монтажа, повышение надежности и снижение трудоемкости процессов за счет полного исключения проволочной коммутации, уменьшение габаритных размеров и объема сборочных узлов, трехмерную компоновку, минимизацию массы изделий, минимизацию емкостных характеристик, увеличение радиационной стойкости [9].

Для экспериментальных и физических исследований были разработаны и изготовлены действующие макетные образцы (рис. 3) прототипа концентраторного модуля БС, так называемые тестовые структуры качества (ТСК) [10].

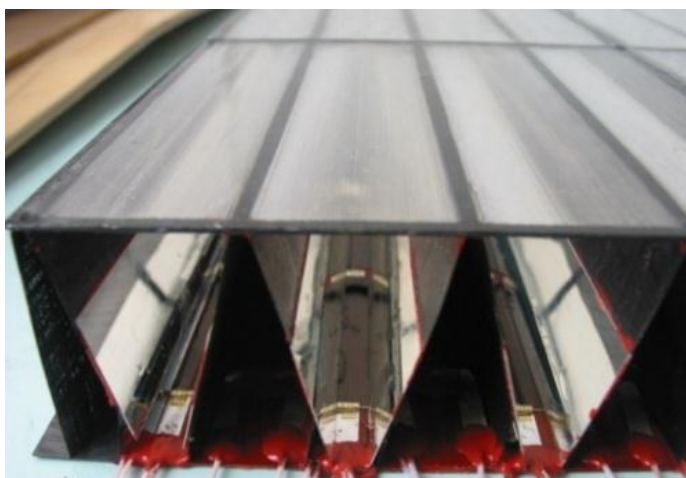


Рис. 3. Тестовая структура качества концентраторного модуля на линейных линзах Френеля

Образцы ТСК содержали гофрированный жесткий углепластиковый каркас с тонким углепластиковым теплопроводным основанием-радиатором, линейные силиконовые линзы Френеля, держатели для фиксации плоских линз Френеля, высокоэффективные многопереходные солнечные элементы с радиационно стойкими защитными покрытиями, линейки приемников солнечного излучения с защитой от воздействия космической плазмы, вторичные оптические элементы в виде плоских фоклинов. В приемниках концентрированного солнечного излучения ТСК были использованы высокоэффективные трехпереходные арсенид-галлиевые СЭ с КПД 25 % и СЭ с КПД 28 %, которые были изготовлены компанией CESI (Милан, Италия) [11].

Как было сказано выше, наиболее перспективным видом оптических концентраторов для космических фотоэлектрических модулей являются линейные линзы Френеля малой массы из силиконовых полимеров. Вызвано это выдающимися свойствами силиконовых полимеров [12]:

- нейтральные силиконовые полимеры при полимеризации не выделяют агрессивные вещества;

- силиконовые полимеры способны продолжительно работать в самом широком диапазоне температур (стандартно от -45°C до $+200^{\circ}\text{C}$, а в некоторых случаях от -80°C до $+300^{\circ}\text{C}$;

- силиконовые полимеры обладают хорошей адгезией, которая основана на их химических свойствах;

- силиконы занимают лидирующие позиции в отношении обеспечения электроизоляции, а также обладают хорошими диэлектрическими показателями, не зависящими от внешних условий;

- относительное удлинение (сжатие) силиконовых полимеров достигает 700 %. Это позволяет с легкостью поглощать (демпфировать) удары и вибрации. Поэтому силиконы не допускают отрыва компонентов, деформации, разрушения конструкции при больших количествах термоциклов в широком диапазоне воздействия отрицательных и положительных значений температуры;

- большинство широко применяемых полимерных адгезивов обладают прочностью 10 – 20 кгс/см². Силиконовые же полимеры имеют прочность 25 – 30 кгс/см², а некоторые более 70 кгс/см².

Тем не менее, разработка конструкции, выбор материалов и создание технологии изготовления матрицы для формирования полимерных силиконовых линейных линз Френеля, а также разработка технологии изготовления силиконовых линз Френеля и создание способов их защиты от воздействия атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолета являются одними из самых сложных проблем в космической концентраторной технике. В свою очередь, решение этих проблем является и самым продолжительным этапом работы, который требует дополнительных наукоемких исследований и испытаний.

Поэтому с целью проверки и подтверждения правильности выбранных конструктивно-технологических решений и материалов макетный образец концентраторного модуля БС был подвергнут воздействиям механических нагрузок и циклического изменения температуры, в том числе квазистатическим поперечным (10g) и продольным (15g) перегрузкам, а также температурным перегрузкам в диапазоне от -170°C до $+150^{\circ}\text{C}$. До и после испытаний проводился визуальный контроль МО и контроль электрических параметров действующих демонстраторов приемников солнечного излучения. Каждый фотоприемник включал два параллельно соединенных ФП на основе трехпереходных арсенид-галлиевых фотопреобразователей с размерами 5x40x0,16мм.

Измерения фотоэлектрических параметров действующих приемников проводили как на имитаторе солнечного излучения, мощность и спектр которого соответствуют условиям в околоземном космическом пространстве АМО (1367 Вт/м²), так и в натуральных условиях при солнечном излучении в ясный день на воздухе для суммарной падающей мощности ~850 Вт/м².

Удельная мощность фотоприемников с первичной и вторичной оптикой в модуле, при измерении фотоэлектрических характеристик в натуральных условиях (суммарный поток солнечного излучения ~850 Вт/м²) составила 168 Вт/м². При оценочном пересчете эффективности на условия АМО (1367 Вт/м² солнечного излучения) удельная электрическая мощность в концентраторном модуле составила не менее 270 Вт/м².

Следует также отметить, что образцы изготовленных демонстраторов приемников солнечного излучения в составе МО испытания на воздействие циклического изменения температуры с последующим воздействием квазистатических нагрузок (20g) и синусоидальных вибраций (20g) успешно выдержали. При этом изменения внешнего вида МО не происходи-

ло, признаков критерия отказа СЭ не отмечено, помутнения линз Френеля не наблюдаются, наличия деградации в УЗ-соединениях после испытаний не установлено.

На основе анализа полученных результатов испытаний можно сделать вывод о том, что предложенные новые подходы к проектированию макетных образцов концентраторных солнечных модулей на основе объемных углепластиковых каркасов и технологии их сборки обеспечивают необходимые электрические характеристики приемников солнечного излучения. Для условий АМ0 при $T=25^{\circ}\text{C}$ на начало срока активного существования разработанный модуль имеет следующие характеристики: удельный вес каркаса – $0,62 \text{ кг/м}^2$; оценочный удельный вес модуля $<2,2 \text{ кг/м}^2$; оценочная удельная мощность по массе $>120 \text{ Вт/кг}$; оценочная удельная мощность по площади $>270 \text{ Вт/м}^2$.

Однако разработанная конструкция матрицы для линз Френеля из кремнийорганического компаунда Elastosil S 690 не позволила обеспечить требуемое качество при изготовлении линейных линз Френеля с оптической эффективностью более 80 %.

Для получения высокой оптической эффективности линейных линз Френеля кроме высоких требований к оптической прозрачности материала линз предъявляются жесткие требования к качеству поверхностей сформированных линз и конфигурации элементов топологии линз Френеля, а следовательно, и к формообразующей матрице для линз Френеля. Задачей дальнейшего проведения исследований является создание такого способа изготовления линз Френеля для концентраторных фотоэлектрических модулей, который обеспечивает улучшение их оптической эффективности до 90 % и одновременно позволяет снизить их массу. Выполнить поставленную задачу по разработке и изготовлению матрицы для высокоэффективных композитных линз Френеля в углепластиковой рамке и с защитным стеклом достаточно сложно, однако только в этом случае возможно достижение необходимых параметров концентраторных солнечных модулей на уровне лучших мировых достижений (табл. 4). Приведена сравнительная оценка основных технико-экономических показателей предложенного концентраторного модуля с лучшим мировым аналогом (Rigid-panel Stretched Lens Array (SLA) (Entech Inc., США, 2006 – 2010 гг).

Таблица 4

Технико-экономический показатель	Значение параметра разработки	Сравнение с аналогом			Значение параметра аналога
		Выше	=	Ниже	
1. Срок активного существования (САС), лет	15		<input checked="" type="checkbox"/>		15
2. Удельная мощность по площади на начало САС, Вт/м^2	290 – 310	<input checked="" type="checkbox"/>			280 – 300
3. Удельный вес (без рефлекторов/с рефлекторами), кг/м^2	1,8/2,3		<input checked="" type="checkbox"/>		~1,8
4. Приемлемый угол разориентации, град.	$\pm 3,5$	<input checked="" type="checkbox"/>			$\pm 2,0$
5. Степень концентрации, крат	8		<input checked="" type="checkbox"/>		8 – 10
6. Удельная стоимость, к€/м^2	40 – 50	<input checked="" type="checkbox"/>			~60,0

Для подтверждения ожидаемых параметров инновационной концентраторной БС на силиконовых линейных линзах Френеля в объемном гофрированном углепластиковом каркасе необходимо дальнейшее комплексное проведение следующих инновационных разработок:

- исследования, выбор материалов, разработка конструкции и способа изготовления матрицы для формирования микрогеометрии поверхности силиконовых линейных линз Френеля с коэффициентом концентрации 8 – 10 крат;

- исследования и разработка способов изготовления композитной концентраторной плоской силиконовой линзовой панели в углепластиковой рамке, покрытой защитным стеклом от воздействия вредных факторов космического пространства с оптической эффективностью более до 90 %;

- разработка конструкции и технологии изготовления вторичных оптических элементов типа «плоский фоклин» на основе нового поколения светоотражающих материалов с интегральным коэффициентом отражения солнечного излучения не менее 95 % для приемников концентрированного солнечного излучения позволяющих обеспечить приемлемый угол разориентации не менее $\pm 3,5^\circ$;

- разработка инновационной “Chip-on-flex” технологии сборки приемников концентрированного солнечного излучения на алюминий-полиимидных носителях и трехпереходных высокоэффективных арсенид-галлиевых солнечных элементах с интегрированными защитными диодами с КПД до 30 %;

- разработка конструкции арсенид-галлиевых приемников солнечного излучения на алюминий-полиимидных носителях, выполняющих одновременно функции гибкой основы, крепежного элемента, коммутирующей платы, и эффективного теплоотвода (тепловое сопротивление между тыльным контактом солнечного элемента и углепластиковой подложкой не более $15^\circ\text{C}/\text{Вт}$);

- исследование и разработка технологии автоматизированной ультразвуковой сварки гибких плоских выводов из алюминиевой фольги с антикоррозионными покрытиями к фронтальным и тыльным контактам арсенид-галлиевых солнечных элементов;

- исследование и разработка технологии герметизации солнечных элементов и межэлементных соединений от воздействия космической плазмы;

- разработка конструкции и технологии изготовления сверхлегкого высокотехнологичного углепластикового гофрированного объемного каркаса с удельным весом $0,6 - 0,8 \text{ кг/м}^2$.

Заключение

Основной задачей выполненной работы являлось проведение анализа существующих концентраторных модулей и разработка новых подходов по созданию экономичных, коммерчески привлекательных, высокоэффективных радиационно-стойких концентраторных батарей космического назначения на основе силиконовых концентрирующих линейных линз Френеля, способных защитить солнечные элементы батарей от воздействия техногенного космического мусора и микрометеоритов, а также облегченных конструкций несущих каркасов модулей с применением недорогих и широко используемых материалов.

1. В результате выполнения работы был создан и исследован макетный образец модуля короткофокусной (30 – 40 мм) концентраторной БС, конструкция которой максимально приближена к традиционным схемам развертывания и конструкционным параметрам существующих планарных космических БС и которая обеспечивает возможность их применения в составе существующих и перспективных КА нового поколения.

2. Получен патент Украины на полезную модель [10].

3. Выполненная работа позволила обеспечить: высокую стабильность физико-механических характеристик объемного углепластикового каркаса БС, повышение показателей его механической прочности и жесткости, уменьшение деформаций и минимизацию прогиба панелей солнечной батареи вызываемых циклическими изменениями температуры, увеличение приемлемого угла разориентации солнечной батареи, снижение деградации электрических характеристик и повышение надежности в эксплуатации, упрощение технологии сборки солнечных концентраторных модулей и батарей, снижение показателей удельного веса и удельной стоимости, повышение выходной удельной мощности.

4. Разработанный макет концентраторного модуля для условий АМ0 при $T=25^\circ\text{C}$ на начало срока активного существования показал следующие удельные характеристики: удельный вес каркаса – $0,62 \text{ кг/м}^2$; оценочный удельный вес модуля $< 2,2 \text{ кг/м}^2$; оценочная удельная мощность по массе $> 120 \text{ Вт/кг}$; оценочная удельная мощность по площади $> 270 \text{ Вт/м}^2$.

5. Подтверждены преимущества концентраторных солнечных батарей по сравнению с планарными БС, в том числе: низкая удельная стоимость (более чем в два раза); уменьшение площади дорогостоящих солнечных элементов на 85 % (более чем в шесть раз); низкая удельная масса; более высокая защищенность от воздействия радиации.

6. 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 160 – 170 Вт/кг. При этом конструкция концентраторных БС может быть максимально приближена к традиционным схемам развертывания 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. *A.S. Brown, M.A. Green* A new a look at the impurity photovoltaic effect // 17rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2001 Munich, Germany. P. 250 – 253. 2. *M.A. Green* Third Generation Photovoltaic: Solar Cell for 2020 and Beyond // Physics E 14. – 2002. – P. 65 – 70. 3. *Борщев В.Н., Листратенко А.М., Слипченко Н.И., Герасименко Н.В., Глушко Е.С.* Высокоэффективная космическая концентраторная батарея солнечная на плоских фоклинах // Радиотехника. – 2014. – Вып. 177. – С. 86 – 93. 4. *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. 5. *M.F. Piszczor, L.M. Fraas, M.J. O'Neill* The mini-Dome Fresnel Lens Photovoltaic Concentrator Array: Current Status of Component and Prototype Panel Testing // 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – 1990. – P1271. 6. Patent US N5,344,497 МПК H01L 31/052, “Line-Focus Photovoltaic Module Using Stacked Tandem-Cells”. Publication date – 06.09.1994. 7. *Mark J. O'Neill, A.J. McDanal, Henry W. Brandhorst. Jr* Advances in the stretched lens array (SLA) technology // 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC) Paris-June 2004. 8. *M.Z. Shvarts, O.I. Chosta et al,* Space Fresnel lens concentrator modules with triple-junction solar cells // 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference and Exhibition, 2005, Florida. 9. *Замирец Н.В., Борщев В.Н., Листратенко А.М., Антонова В.А., Семенов Л.П., Проценко М.А., Тымчук И.Т.* Алюминиевая “Chip on flex” (COF) технология в радиационном приборостроении // Технология приборостроения. – 2007. – №2. – С.3 – 9. 10. Патент Украины на полезную модель №81665 «Солнечный концентраторный короткофокусный модуль». Дата регистрации 10.07.2013г. / *Борщев В.Н., Листратенко А.М. и др.* 11. CESI Spa [Электронный ресурс]. – Режим доступа www.cesi.it. 12. *Савельев А.* Выбор силиконовых клеев-герметиков для сборки электроники // Электронные компоненты Украины. 2011. – №1/2. – С.50 – 52.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 24.02.2015