

*Н.В. ЗАМИРЕЦ, д-р техн. наук, В.Н. БОРЦОВ, д-р техн. наук,
А.М. ЛИСТРАТЕНКО, канд. техн. наук, В.А. АНТОНОВА, канд. техн. наук,
О.Н. ЗАМИРЕЦ, канд. техн. наук, Н.И. СЛИПЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук,
И.Т. ТЫМЧУК, Ю.А. ШОВКОПЛЯС, И.Т. ПЕРЕКОПСКИЙ*

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Введение

В настоящее время солнечные батареи (СБ) из фотоэлектрических преобразователей (ФП) являются основным источником электрической энергии для отечественных и зарубежных космических аппаратов (КА).

С середины 90-х годов в Украине в соответствии с тенденциями развития мировой космонавтики создаются космические платформы малого класса. Разработаны платформы двух типов МС-1 и МС-2. Солнечные батареи платформы МС-1 укомплектовывались отечественными кремниевыми ФП с КПД = 14 – 14,5%.

Однако уже при разработке солнечных батарей для космического аппарата EgyptSat-1 на платформе МС-2 впервые в Украине были применены однопереходные арсенид-галлиевые фотоэлектрические преобразователи с КПД = 19 – 20 %, более устойчивые к радиационному воздействию, термоциклированию и электроразрядным факторам, а также характеризующиеся длительным сроком эксплуатации в условиях космического полета [1–5].

С 2011 г. в Украине предполагается создание еще более высокоэффективных СБ на основе многопереходных гетероструктурных ФП (КПД ≈ 27 – 30%) и сверхлегких ($\sim 0,8 \text{ кг/м}^2$) жестких углеродопластовых каркасов для перспективных малых космических аппаратов типа "Микроспутник".

Цель работы – анализ требований к СБ для космического аппарата платформы МС-2 [5], расчет фотоэлектрических параметров СБ для удовлетворения этих требований, обоснование выбора оптимальных конструктивно-технологических решений перспективных отечественных солнечных батарей повышенной мощности.

Согласно требованиям к СБ КА на платформе МС-2, деградация мощности СБ за 5 лет активного существования не должна превышать 20 % на солнечно-синхронной орбите с параметрами: высота орбиты 668 км; наклонение орбиты 98,074 градусов; местное время прохождения нисходящего узла 10 часов 30 минут.

В реальных условиях полета КА на заданной орбите условия освещенности нельзя считать стационарными. В связи с этим при оценке температурного режима СБ необходимо использовать соотношения, учитывающие теплоемкости и теплопроводности различных элементов конструкции СБ, закон изменения во времени мощности падающего светового потока, исходную температуру в момент перехода из области тени в освещенную зону, температуру корпуса КА и другие параметры. Расчет фотоэлектрических параметров и компоновку СБ необходимо проводить для максимальной температуры T_m эксплуатации на орбите и на конец срока активного существования (САС).

Основная часть

С помощью специальной моделирующей программы проведен анализ условий функционирования СБ на орбите без учета влияния переизлучения с конструкцией КА. Для расчета использованы следующие данные: средняя удельная масса $M_{cp} = 2,2 \text{ кг/м}^2$; средняя теплоемкость $C_{cp} = 800 \text{ Дж/(кг·К)}$, интегральные коэффициенты излучения лицевой ϵ_l и тыльной ϵ_t поверхностей СБ соответственно равны 0,9 и 0,98; интегральные коэффициенты поглощения лицевой α_l и тыльной α_t поверхностей соответственно 0,88 и 0,9 [2].

Расчет динамики освещенности и температуры панели СБ для интервала 365 суток показал, что:

- максимальная относительная освещенность лицевой поверхности изменяется в диапазоне $0,92 - 0,98 E_0$, где E_0 – солнечная постоянная равная 1360 Вт/м^2 ;
- максимальная температура панели составляет $+75^\circ\text{C}$;
- минимальная температура панели составляет -71°C ;
- максимальный градиент температуры равен 14°C/мин ;
- период изменения температуры составляет $\sim 98 \text{ мин}$.

Расчет фотоэлектрических параметров СБ проводился для однопереходных GaAs/Ge-ФП для максимальной температуры эксплуатации на орбите $T_m = 75^\circ\text{C}$ на конец САС.

Основные усредненные параметры ФП на начало САС для условий освещенности AM0 при температуре $T = 25^\circ\text{C}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1 [2]

Изготовитель	Тип ФП	Габаритные размеры ФП, $l_{\text{ФП}} \times h_{\text{ФП}}$, смхсм	Площадь ФП, см^2	$I_{\text{кз}}$, А	$I_{\text{опт}}$, А	$U_{\text{кк}}$, В	$U_{\text{опт}}$, В	Температурные коэффициенты		
								dj/dT , $\text{мА/см}^2/^\circ\text{C}$	dU/dT , $\text{мВ/}^\circ\text{C}$	dP/dT , $\text{мВт/см}^2/^\circ\text{C}$
Е.Н.Е. (Бельгия)	Однопереходные	4х2	8	0,252	0,237	1,015	0,89	0,019	-2,00	-0,038

Световые, темновые и спектральные характеристики однопереходных Ga-As/Ge-ФП с площадью $(2 \times 4) \text{ см}^2$ приведены на рис. 1.

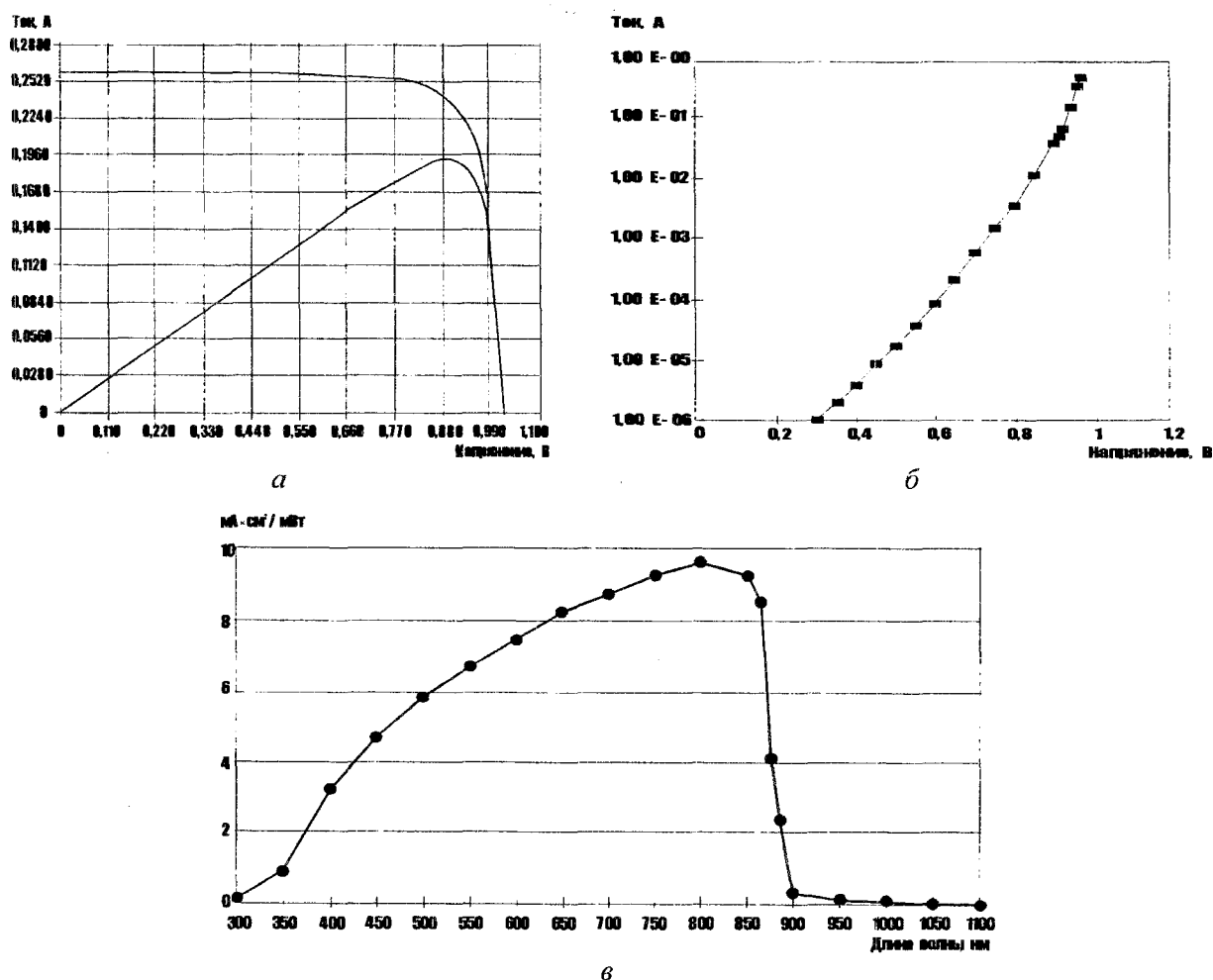


Рис.1. Характеристики однопереходных GaAs/Ge-ФП с площадью $(2 \times 4) \text{ см}^2$:
а – световая; б – темновая; е – спектральная

Так как при САС, равном 5 годам, интегральные потоки электронов не превышают $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, можно считать, что коэффициенты деградации при защите ФП радиационностойкими стеклами составляют $I/I_0=0,975$, $U/U_0=0,99$, $P/P_0=0,97$ [2].

Для расчета фотоэлектрических параметров СБ использован следующий алгоритм.

1. Расчет параметров ФП на начало САС для максимальной температуры T_M проводится с помощью выражений:

$$U_{\text{ХХФПнач.САС}} = U_{\text{ХХ}} - \left[(T_M - T_0) \times \left| \frac{dU_{\text{нач.САС}}}{dT} \right| \right]; \quad (1)$$

$$I_{\text{КЗФПнач.САС}} = I_{\text{КЗ}} + \left[\frac{dj_{\text{нач.САС}}}{dT} (T_M - T_0) \times S_{\text{ФП}} \right]; \quad (2)$$

$$I_{\text{ОПТФПнач.САС}} = I_{\text{ОПТ}} + \left[\frac{dj_{\text{нач.САС}}}{dT} (T_M - T_0) \times S_{\text{ФП}} \right]; \quad (3)$$

$$U_{\text{ОПТФПнач.САС}} = U_{\text{ОПТ}} - \left[(T_M - T_0) \times \left| \frac{dU_{\text{нач.САС}}}{dT} \right| \right]; \quad (4)$$

$$P_{\text{ОПТ ФП нач. САС}} = I_{\text{ОПТ ФП нач. САС}} \cdot U_{\text{ОПТ ФП нач. САС}}. \quad (5)$$

Здесь $S_{\text{ФП}}$ – площадь фотопреобразователя; $T_0=25^\circ\text{C}$. Для определения параметров ФП при T_M на конец САС учитываем коэффициенты деградации.

Результаты расчета параметров ФП на начало и конец САС при максимальной температуре эксплуатации $T_M=75^\circ\text{C}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

ФП, начало САС, $T_M=75^\circ\text{C}$					ФП, конец САС, $T_M=75^\circ\text{C}$				
$U_{\text{ХХ}}, \text{В}$	$I_{\text{КЗ}}, \text{А}$	$U_{\text{ОПТ}}, \text{В}$	$I_{\text{ОПТ}}, \text{А}$	$P_{\text{ОПТ}}, \text{Вт}$	$U_{\text{ХХ}}, \text{В}$	$I_{\text{КЗ}}, \text{А}$	$U_{\text{ОПТ}}, \text{В}$	$I_{\text{ОПТ}}, \text{А}$	$P_{\text{ОПТ}}, \text{Вт}$
0,915	0,260	0,790	0,245	0,194	0,906	0,254	0,782	0,239	0,187

2. Расчет параметров СБ на начало САС для максимальной температуры эксплуатации T_M осуществляется с помощью следующих формул:

$$U_{\text{ХХ СБ нач. САС}} = U_{\text{ХХФП нач.САС}} \cdot n; \quad (6)$$

$$I_{\text{КЗ СБ нач.САС}} = 2I_{\text{КЗФП нач.САС}} \cdot m; \quad (7)$$

$$U_{\text{ОПТ СБ нач. САС}} = U_{\text{ОПТФП нач.САС}} \cdot n; \quad (8)$$

$$I_{\text{ОПТ СБ нач.САС}} = 2I_{\text{ОПТФП нач.САС}} \cdot m; \quad (9)$$

$$P_{\text{ОПТ СБ нач.САС}} = I_{\text{ОПТ СБ нач.САС}} \cdot U_{\text{ОПТ СБ нач. САС}}. \quad (10)$$

Здесь n – количество последовательно соединенных ФП для обеспечения требуемого напряжения $U_{\text{бат}}$; m – количество параллельно соединенных ФП для обеспечения требуемого тока $I_{\text{бат}} = 2 I_{\text{секц СБ}}$ для двухсекционной СБ.

3. Расчет параметров СБ на конец САС при температуре T_M проводится с использованием формул:

$$U_{\text{ХХ СБ кон. САС}} = U_{\text{ХХ СБ нач.САС}} \cdot (U/U_0); \quad (11)$$

Для удовлетворения указанных ограничений при выборе компоновки требуется решить следующие основные задачи:

- разместить на фиксированной площади необходимое количество ФП выбранного типа, требуемое для обеспечения заданных электроэнергетических характеристик СБ;
- сконфигурировать топологию электрической схемы СБ, обеспечивающую, во-первых, секционирование СБ на две идентичные секции;
- во-вторых, минимизацию магнитного момента СБ;
- определить (выбрать, предусмотреть) необходимые зазоры и элементы коммутации между ФП, модулями, секциями для обеспечения:
 - стойкости СБ к механическим нагрузкам и воздействию факторов космического пространства (термоциклирование, электризация, плазма);
 - исключения отказов в электрической схеме секций и СБ типа обрыв или короткое замыкание;
 - приемлемой технологичности изготовления СБ, существенно влияющей на ее стоимость и надежность.

Учитывая, что магнитный момент СБ равен векторной сумме магнитных моментов ее секций, минимизация суммарного магнитного момента СБ достигается, с одной стороны, обеспечением максимального равенства токов секций, а с другой – такой топологией электрических схем секций, при которой площадь контура тока каждой из секций одинакова, а направление тока в этих контурах противоположное. При выполнении этих условий векторы магнитных моментов секций одинаковы по величине, но направлены в противоположные стороны, что обеспечивает минимальный суммарный магнитный момент СБ, равный разности магнитных моментов секций.

В результате проведенного комплекса работ, обеспечившего решение всех поставленных задач, получен оптимальный вариант компоновки СБ, приведенный на рис. 2.

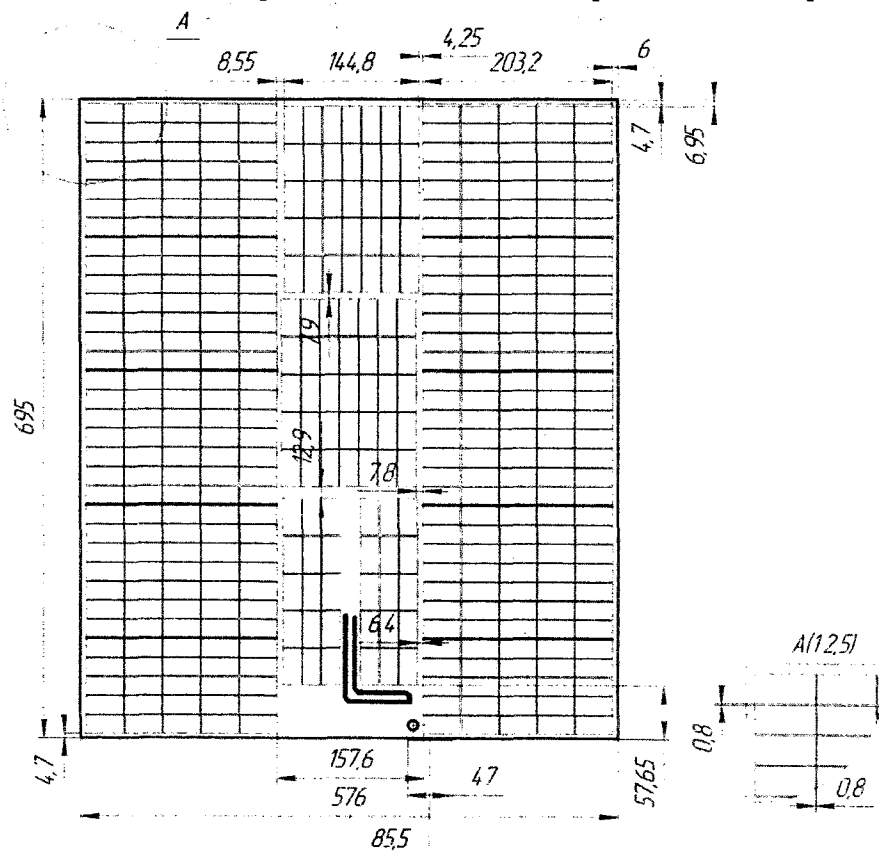


Рис. 2. Схема расположения ФП на каркасе СБ с габаритными размерами 695 ммх576 мм

Сборка СБ на жестком углесотопластовом каркасе впервые в Украине выполнялась с помощью единичных ячеек ФП и модулей ФП.

Ячейка представляла собой ФП с присоединенными к контактным площадкам с фронтальной стороны серебряными выводами и приклеенным защитным стеклом. Сборка модуля заключалась в последовательно-параллельном соединении между собой нескольких (8 – 12 шт) единичных ячеек сваркой расщепленным электродом. Сборка СБ (рис. 3) заключалась в приклейке модулей ФП на жесткое основание и присоединении выводов к коммутационным шинам. Достоинством этого варианта конструкции СБ является уменьшение количества расположенных на панели коммутационных шин, что позволяет повысить коэффициент заполнения СБ фотопреобразователями.

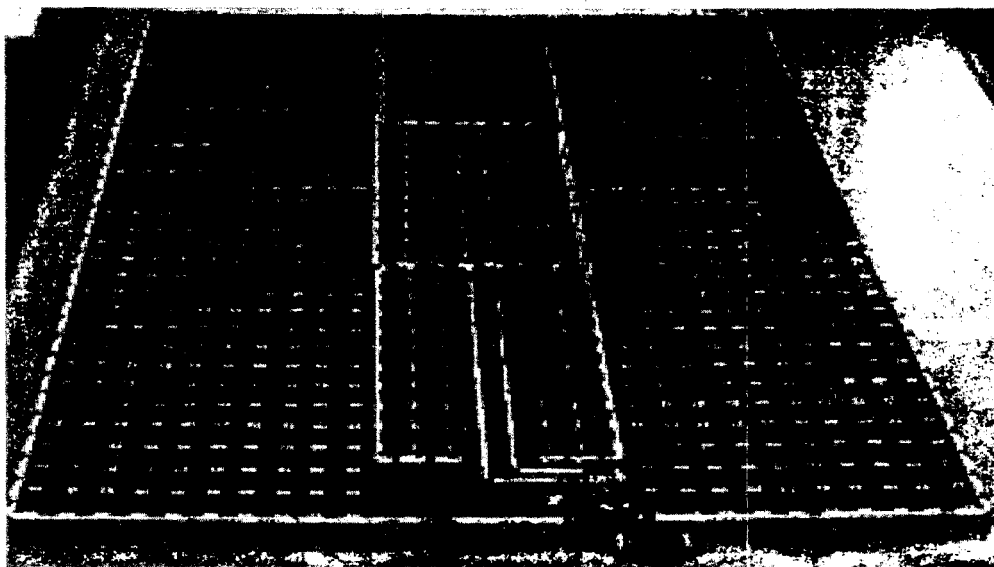


Рис.3. Опытный образец солнечной батареи

Для солнечных батарей будущих отечественных КА перспективным является применение разработанных технических решений с использованием инновационной „Chip-on-Flex”-технологии [6, 7], еще более эффективных (КПД $\approx$ 27 – 30 %) трехпереходных арсенид-галлиевых ФП и модулей ФП на гибком алюминий-полиимидном носителе (рис. 4).

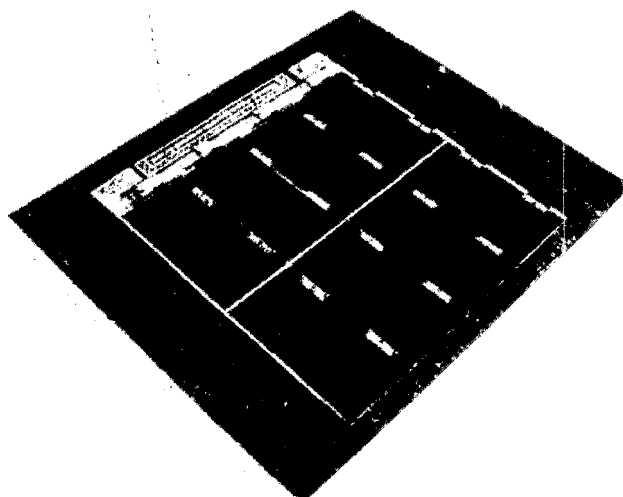


Рис. 4. Макетный образец модуля ФП на гибком носителе

Применение группового метода сборки модулей ФП на одном носителе одновременно служащим механическим основанием модуля и коммутационным элементом ФП в модуле

позволяет использовать автоматизированное оборудование для ультразвуковой сварки элементов коммутации гибкого модуля с контактными площадками ФП и, соответственно, уменьшить трудоемкость сборки модулей на 30 – 40 %.

Необходимо отметить высокую эластичность и механическую прочность при изгибе и других механических воздействиях системы алюминий-полиимид в лакофольговом диэлектрике. Для уменьшения деформаций, вызываемых циклическими изменениями температуры, в алюминиевой фольге платы, соединяемой с тыльными контактами ФП, формируются перфорационные отверстия, согласованные с шагом точек сварок или кратной ему величины. Для исключения разрушения элементов коммутации в модулях гибкие контакты к фронтальным контактными площадкам ФП выполняются с учетом необходимого запаса длины. Конфигурация коммутационных элементов в алюминиевой фольге и слое полиимида выполняется методами фотолитографии, что обеспечивает высокую точность получения размеров. Кроме того, в процессе сборки модуля полностью исключаются короткие замыкания в цепях солнечных элементов, так как все коммутирующие элементы платы изолированы друг от друга слоями полиимида, а сопротивление изоляции элементов коммутации проверяется до сборки гибкого носителя с ФП.

В космосе СБ окружает плазма, что может приводить к возникновению в солнечных элементах аномально высоких токов утечки с соответствующим снижением выходной мощности солнечных батарей. Изоляция слоями полиимида поверхности алюминиевых гибких контактов – компенсаторов для последовательного соединения ФП – приводит к увеличению полного сопротивления, что значительно снижает токи утечки и вероятность короткого замыкания через плазму.

В качестве материала элементов коммутации, как указано выше, применяется алюминий, что имеет ряд преимуществ по сравнению с серебром. Как известно, из металлов наименее стойким по отношению к атомарному кислороду является серебро, которое очень часто используется в качестве материала для межэлементных соединений в конструкциях СБ. Окисные пленки, образующиеся на поверхности серебра, характеризуются высокими внутренними напряжениями, что приводит к их отслаиванию. В результате, наряду с потерей массы материала имеет место также и загрязнение окружающего пространства частицами окислов серебра. Алюминиевая фольга обладает физико-химическими свойствами, препятствующими коррозии. Окисная пленка на алюминии надежно предохраняет его от дальнейшего окисления при воздействии атомарного кислорода среды.

Выполнение вышеописанных работ будет базироваться на комплексе отечественных достижений в области физики, техники и высоких технологий при использовании опыта России, Европейского союза и США, что обеспечит создание СБ со следующими основными параметрами на начало САС:

- удельная мощность по площади – 380 – 400 Вт/м²;
- удельная мощность по массе – > 100 Вт/кг;
- удельная масса – 2,0 – 2,5 кг/м².

Заключение

В соответствии с техническими требованиями на солнечную батарею проведен расчет фотоэлектрических параметров СБ на основе современных однопереходных GaAs/Ge-ФП. Для выбранных типопредставителей ФП обоснована оригинальная схема компоновки с учетом технологических ограничений, обеспечивающая необходимую магнитную чистоту СБ и максимальное заполнение рабочей поверхности каркаса, а следовательно, и максимальную выходную мощность.

Предложены для будущих отечественных КА перспективные решения СБ на основе инновационной технологии изготовления солнечных модулей с использованием высокоэффективных (КПД ≈ 27 – 30 %) трехпереходных арсенид-галлиевых ФП на гибком алюминий-полиимидном лакофольговом диэлектрике.

Применение группового метода сборки, а именно – сборки нескольких (8 – 12 шт) фотопреобразователей на одном гибком алюминий-полиимидном носителе с использованием автоматизированного оборудования для ультразвуковой сварки элементов коммутации гибкого носителя с контактными площадками ФП упрощает процесс сборки и, соответственно, уменьшает трудоемкость на 30 – 40 %.

Список литературы: 1. *Борцов В.Н.* Модуль фотопреобразователей на основе полиимидного носителя для солнечных батарей космического применения / В.Н. Борцов, В.А. Антонова, А.М. Листратенко, И.Т. Тымчук // *Технология приборостроения*. – 2002. – №1. – С.19-21. 2. *Антонова В.А.* Разработка и исследования батарей для системы энергоснабжения украинского молодежного спутника / В.А. Антонова, В.Н. Борцов, А.М. Листратенко, И.Т. Тымчук // *Космічна наука та технологія*. – 2005. – Т.11. – №3/4. – С. 92-95. 3. *Борцов В.Н.* Расчетные исследования каркасов панелей солнечных батарей космического аппарата / В.Н. Борщев, В.А. Антонова, А.М. Листратенко, С.М. Школьный // *Вестник ХПИ*. – 2005. – №47. – С.21-29. 4. *Борцов В.Н.* Оценка напряженно-деформированного состояния элементов солнечных батарей космического назначения на сотовых каркасах / В.Н. Борщев, В.А. Антонова, А.М. Листратенко, Н.В. Замирец, Д.Г. Белов, С.М. Школьный, Г.В. Буеров, В.А. Жупинский, С.К. Киприч, М.А. Проценко // *Технология приборостроения*. 2005. – №2. – С.18-22. 5. *Замирец Н.В.* Конструктивно-технологические решения солнечной батареи космической платформы МС-2 / Н.В. Замирец, Т.Н. Литвишко, В.Н. Борцов, Д.Г. Белов, Ф.М. Телевной, А.М. Листратенко, В.А. Жупинский // *Технологические системы*. – 2005. – №5-6 (31-32). – С. 23-28. 6. *Замирец Н.В.* Алюминиевая “Chip-on-flex” (COF) технология в радиационном приборостроении / Н.В. Замирец, В.Н. Борщев, А.М. Листратенко, В.А. Антонова, Л.П. Семенов, М.А. Проценко, И.Т. Тымчук // *Технология приборостроения*. – 2007. – №2. – С.3-9. 7. *Патент України на винахід № 85333* Спосіб виготовлення гнучкого модуля сонячної батареї / В.М. Борщев, О.М. Листратенко, В.А. Антонова, І.Т. Тимчук, Г.В. Буеров, Я.Я. Костишин, М.А. Проценко. Дата реєстрації 12.01.2009 р.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 12.03.2011