

УДК 621.382:621.383

В. А. Антонова, В. Н. Борщев, А. М. Листратенко, И. Т. Тымчук

Державне підприємство Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, Харків

Разработка и исследование солнечных батарей для системы энергоснабжения украинского молодежного спутника

Надійшла до редакції 10.12.04

Проведено аналіз вихідних характеристик сонячних батарей для системи енергозабезпечення українського молодіжного супутника при використанні різних типів фотоперетворювачів, обґрунтовано оптимальний варіант конструктивно-технологічних рішень.

Основными характеристиками солнечных батарей (СБ) для космических аппаратов являются: удельная мощность по массе и площади, КПД, срок службы, удельная мощность на начало и конец срока активного существования.

Нарастивание мощности СБ за счет увеличения количества входящих в нее фотопреобразователей (ФП) можно осуществить до некоторого предела, определяемого соотношением между массой и полезной нагрузкой, а также оптимальной площадью панелей СБ. Поэтому повышение удельной мощности в первую очередь достигается за счет увеличения КПД и радиационной стойкости входящих в нее ФП.

Большинство из запущенных ранее космических аппаратов различного назначения в качестве источника питания использовали СБ на кремниевых ФП. Дальнейшее повышение эксплуатационных параметров связано с минимизацией потерь солнечной энергии, оптимизацией просветляющих покрытий, снижением толщины и увеличением размеров ФП, применением определенного профиля текстурирования на фронтальной поверхности, максимально возможным уменьшением площади контактных областей, использованием «тыльноконтактных» ФП, подгонкой спектрального состава излучения к максимуму спектральной чувствительности ФП [1, 2].

Применение в составе солнечных батарей арсенид-галлиевых фотопреобразователей обеспечивает повышение радиационной стойкости, увеличение спектрального отклика в коротковолновом диапазо-

не, а следовательно, и увеличение КПД. В условиях облучения АМ0 (облученность 1360 Вт/м^2 , $T = 28^\circ \text{C}$) серийные двухпереходные образцы GaAs-ФП со структурой $\text{InGaP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ имеют КПД $\approx 23\%$, а трехпереходные — КПД $\approx 25 \dots 26\%$ [3]. При этом использование в гетероструктурных фотопреобразователях подложек из германия обеспечивает снижение себестоимости ФП, улучшение механической прочности, и, как следствие, возможность уменьшения толщины преобразователя. Промышленный вариант СБ на Si-ФП имеет КПД $\approx 15\%$, тогда как на GaAs-ФП — 21.5% .

Целью работы являлся анализ требований к техническим характеристикам солнечной батареи, рассмотрение возможных вариантов конструктивно-технологических решений изделия, сравнительная оценка вариантов, выбор и обоснование оптимального варианта СБ.

Предварительные исходные данные, использованные для анализа вариантов компоновки СБ, таковы:

диапазон изменения напряжений	0...35 В
среднее (типовое) напряжение	33 В
диапазон изменения тока	0...2.4 А
средний (типовой) ток СБ	1.2...1.8 А
геометрические размеры СБ	660×380 мм
площадь СБ	0.25 м ²

Согласно техническим требованиям деградация мощности СБ за три года на солнечно-синхронной орбите с высотой 500—700 км и наклоном 82 и

Таблица 1. Усредненные характеристики ФП для компоновки СБ (начало САС)

Характеристика	Изготовитель								
	E. N. E (Бельгия), CESI (Италия)							ГП НИТИП (Украина)	
	Тип ФП								
	GaAs 3-п*		GaAs 2-п*		GaAs1-п*			Si	
Габариты ФП, см	3.6×4.4	4.1×4.24	3.6×4.4	4.1×4.24	2×4	4.1×4.24	4×8	2×4	1.52×4.6
Толщина ФП, мкм	160±20	160±20	160±20	160±20	160±20	160±20	160±20	320±20	320±20
Удельная масса, кг/м ²	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.8—0.1	0.7—0.8	0.7—0.8
$I_{кз}$, А	0.241	0.265	0.235	0.258	0.252	0.554	1.023	0.33	0.285
$J_{кз}$, мА/см ²	15.38	15.385	15.00	15.00	31.5	32.16	32.22	41.25	40.00
$I_{опт}$, А	0.220	0.241	0.225	0.247	0.237	0.509	0.957	0.306	0.265
$J_{опт}$, мА/см ²	14.031	13.99	14.35	14.34	29.62	29.55	30.15	38.25	37.85
$U_{хх}$, В	2.5	2.517	2.35	2.35	1.015	1.015	1.024	0.62	0.61
$U_{опт}$, В	2.16	2.218	2.08	2.08	0.89	0.89	0.896	0.52	0.51
$P_{опт}$, Вт	0.48	0.53	0.47	0.51	0.21	0.45	0.86	0.16	0.14
$P_{уд}$, Вт/м ²	303	310	298	298	263	263	270	199	193
КПД, %	23	23	22	22	19.2	19.2	19.6	14.6	14.2
$dU_{хх}/dT$, мВ/°С	—	—	—	—	—	—	-1.94	-1.85	-2.00
$dU_{опт}/dT$, мВ/°С	-6	-6	-4.5	-4.5	-2.00	-2.00	-2.00	-1.85	-2.00
$dj_{кз}/dT$, мА/см ² /°С	0.009	0.009	0.0116	0.0116	0.025	0.025	0.025	0.015	0.02
$dj_{опт}/dT$, мА/см ² /°С	0.006	0.006	0.0093	0.0093	0.019	0.019	0.0196	0.019	0.02
$dP_{опт}/dT$, мВт/см ² /°С	0.087	0.11	0.042	0.042	0.038	0.038	0.038	0.035	0.04
Ориентировочная стоимость, \$ США	160	—	—	—	90	150	—	25	25

* 3-п, 2-п, 1-п — трех-, двух- и однопереходные ФП

Таблица 2. Данные о деградации параметров ФП

Параметр	Изготовитель				
	E. N. E (Бельгия), CESI (Италия)			ГП НИТИП (Украина)	
	Тип ФП				
	GaAs 3-п*	GaAs 2-п*	GaAs 1-п*	Si	
флюенс $5 \cdot 10^{14}$ см ⁻²	$I_{опт}/I_{опт0}$	0.98	0.95	0.83	0.79
	$U_{опт}/U_{опт0}$	0.98	0.94	0.97	0.92
	$P_{опт}/P_{опт0}$	0.91	0.85	0.81	0.73
флюенс 10^{15} см ⁻²	$I_{опт}/I_{опт0}$	0.87	0.90	0.79	0.75
	$U_{опт}/U_{опт0}$	0.94	0.93	0.92	0.87
	$P_{опт}/P_{опт0}$	0.82	0.835	0.73	0.66

* 3-п, 2-п, 1-п — трех-, двух- и однопереходные ФП

98° не должна превышать 20 %. Согласно данным [2] и в соответствии с нашими оценочными расчетами температурного режима для такой высоты и конкретных значений оптических коэффициентов максимальная равновесная рабочая температура панели ФП составляет 65° С.

Выбор компоновки и расчет электрических характеристик СБ проводился для одно-, двух-, трех-

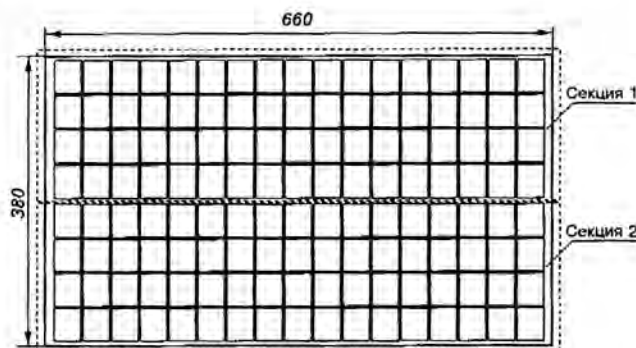
переходных арсенид-галлиевых фотопреобразователей фирмы E. N. E (Бельгия), CESI (Италия) и кремниевых фотопреобразователей производства ГП НИТИП (Харьков). Усредненные минимальные характеристики фотопреобразователей и сводные данные о температурных коэффициентах параметров ФП приведены в табл. 1. Сводные данные о коэффициентах деградации ФП без защитного

Таблица 3. Варианты компоновки и параметры БС с размерами основания 660×380 мм

ФП	Характеристика компоновки			Параметры	Начало эксплуатации		Флюенс $5 \cdot 10^{14}$ см ⁻²		Флюенс 10^{15} см ⁻²		Особенности компоновки			
	количество ФП в цепочке	количество цепочек	количество ФП		25° С	65° С	25° С	65° С	25° С	65° С	$l_{ц}$	$b_{ц}$	$l_{д}$	$l_{м}$
GaAs 3-п* 3.6×4.4 см	17	8	136	$U_{опт}$, В	36.72	32.64	35.99	31.91	34.52	30.44	636.0	362.5	12.0	5.8
				$I_{опт}$, А	1.76	1.80	1.72	1.76	1.53	1.57				
				$P_{опт}$, Вт	64.63	58.59	62.07	56.15	52.85	47.67				
GaAs 3-п* 4.1×4.24 см	15	8	120	$U_{опт}$, В	33.27	29.67	32.60	29.00	31.27	27.67	636.0	349.7	12.0	10.1
				$I_{опт}$, А	1.93	1.97	1.89	1.93	1.68	1.72				
				$P_{опт}$, Вт	64.14	58.35	61.60	55.92	52.46	47.49				
GaAs 2-п* 3.6×4.4 см	17	8	136	$U_{опт}$, В	35.36	32.30	33.24	30.18	32.88	29.82	636.0	362.5	12.0	5.8
				$I_{опт}$, А	1.80	1.85	1.71	1.76	1.62	1.67				
				$P_{опт}$, Вт	63.65	59.60	56.84	52.97	53.27	49.66				
GaAs 2-п* 4.1×4.24 см	15	8	120	$U_{опт}$, В	31.20	28.50	29.33	26.63	29.02	26.32	636.0	349.7	12.0	10.1
				$I_{опт}$, А	1.98	2.03	1.88	1.93	1.78	1.83				
				$P_{опт}$, Вт	61.65	57.73	55.05	51.31	51.60	48.11				
GaAs 1-п* 2×4 см	30	8	240	$U_{опт}$, В	26.70	24.30	25.90	23.50	24.56	22.16	643.5	330.5	8.3	16.5
				$I_{опт}$, А	1.90	1.90	1.57	1.58	1.50	1.50				
				$P_{опт}$, Вт	50.62	46.20	40.76	37.10	36.79	33.31				
GaAs 1-п* 4.1×4.24 см	15	8	120	$U_{опт}$, В	26.70	24.30	25.90	23.50	24.56	22.16	636.0	349.7	12.0	10.1
				$I_{опт}$, А	2.04	2.04	1.69	1.70	1.61	1.61				
				$P_{опт}$, Вт	54.36	49.61	43.77	39.84	39.51	35.77				
GaAs 1-п* 4×8 см	30	2	60	$U_{опт}$, В	26.88	24.48	26.07	23.67	24.73	22.33	621.0	324.5	19.5	18.5
				$I_{опт}$, А	1.91	1.92	1.59	1.59	1.51	1.52				
				$P_{опт}$, Вт	51.45	46.98	41.42	37.73	37.39	33.88				
Si 2×4 см	29	8	232	$U_{опт}$, В	15.60	13.20	14.35	11.95	13.57	11.17	622.0	330.5	19.0	16.5
				$I_{опт}$, А	2.45	2.45	1.76	1.77	1.84	1.84				
				$P_{опт}$, Вт	38.19	32.38	25.30	21.13	24.92	20.57				
Si 1.52×4.605 см	38	6	228	$U_{опт}$, В	19.89	16.77	18.30	15.18	17.30	14.18	633.1	283.8	13.5	32.1
				$I_{опт}$, А	2.12	2.12	1.67	1.68	1.59	1.59				
				$P_{опт}$, Вт	42.17	35.63	30.65	25.49	27.51	22.62				

* 3-п, 2-п, 1-п — трех-, двух- и однопереходные ФП;

$l_{ц}$ — длина цепочки (стринга) последовательно соединенных ФП; $b_{ц}$ — ширина, занимаемая параллельно соединенными цепочками; $l_{д}$ — расстояние от краев панели по длине; $l_{м}$ — расстояние от краев панели по ширине, а также расстояние между секциями.



Компоновка СБ с размерами основания 660×380 мм трехпереходными GaAs-ФП с размерами 36×44 мм

стекла после воздействия потока электронов с энергией $E = 1$ МэВ и плотностью $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² и 10^{15} см⁻² приведены в табл. 2.

Расчеты электрических характеристик и компоновка СБ с размерами 660×380 мм проводились для максимальной температуры ($T = 65^\circ \text{C}$) на конец срока эксплуатации на орбите.

Расчитанные варианты компоновки СБ приведены в табл. 3. При расчетах учитывались коэффициенты деградации ФП без защитных стекол, что приводит к получению заниженных значений параметров на конец срока эксплуатации расстояние между фотопреобразователями (зазор) выбрано равным 1.5 мм.

На рисунке приведена схема компоновки СБ трехпереходными GaAs-ФП с размерами 36×44 мм.

Анализ полученных вариантов решений приводит к следующим выводам.

1. Наиболее полно удовлетворяют техническим требованиям и имеют повышенную радиационную стойкость СБ на основе трехпереходных ФП со структурой $\text{InGaP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$, которые обеспечивают удельную мощность 300—310 Вт/м². Более целесообразно использование трехпереходных фотопреобразователей с размерами 3.6×4.4 см, так как на конец срока активного существования солнечная батарея наиболее полно удовлетворяет требованиям по напряжению и по мощности.

2. Использование двухпереходных арсенид-галлиевых ФП дает несколько заниженные характеристики батарей, однако при этом уменьшается ее стоимость.

3. Солнечные батареи на однопереходных GaAs-ФП имеют еще более низкие технические характеристики. При этом количество ФП в цепочке увеличивается, процесс сборки усложняется, надежность устройства снижается. Однако при этом значительно снижается стоимость СБ.

4. Применение кремниевых ФП при размерах сотового основания панели СБ 660×380 мм не обеспечивает технических требований как по напряжению, так и по мощности, однако возможно их использование в СБ меньшей мощности.

Таким образом, оптимальным вариантом разрабатываемой солнечной батареи для системы энергоснабжения украинского молодежного спутника является СБ с использованием трехпереходных ФП со структурой $\text{InGaP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ фирмы E. N. E (Бельгия), CESI (Италия). Для усовершенствования конструктивно-технологических решений возможно использование клеевых композиций фирм Dow Corning, Nucil Technology (США), защитных стекол фирмы THALES (Великобритания), методов

микроконтактной и УЗ-сварки в процессе сборки СБ.

Предварительная оценка весовых характеристик СБ при использовании вышеописанных материалов и комплектующих показала, что удельная масса СБ без каркаса при использовании трехпереходных ФП составляет 1.4...1.5 кг/м², а вес СБ на каркасе — 0.55...0.57 кг.

Предложенный конструктивно-технологический вариант решения СБ на основе трехпереходных GaAs-ФП обеспечит технические характеристики солнечных батарей космического применения на уровне лучших мировых образцов; удельный вес СБ — 2—2.2 кг/м²; КПД СБ для условий АМО — не менее 23 %; срок эксплуатации — не менее 10 лет.

1. Антонова В. А., Боршев В. Н., Копач В. Р. и др. Перспективные конструкторско-технологические решения монокристаллических кремниевых фотопреобразователей космического назначения // Радиотехника.—2002.—Вып. 125.—С. 110—116.
2. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Пер. с англ. — М.: Энергоиздат, 1983.—360 с.
3. High-efficiency GaInP₂/GaAs/Ge dual and triple junction solar cells for space application // 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. — Vienna, Austria, 1998.—P. 3534—3539.

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF SOLAR BATTERIES FOR THE SOLAR ENERGY SYSTEM OF THE UKRAINIAN YOUTH SATELLITE

*V. A. Antonova, V. N. Borshev, A. M. Listratenko,
I. T. Tymchuk*

An analysis of output characteristics of solar batteries for the solar energy system of the UKRAINIAN YOUTH SATELLITE is carried out with the use of various types of solar cells&