

# Мощные фотоэлектрические преобразователи монохроматического и концентрированного солнечного излучения

Вячеслав Андреев (Санкт-Петербург)

Фотоэлектрические преобразователи на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур обеспечивают рекордные значения КПД более 56% при длине волны 0,82...0,85 мкм и плотности мощности лазерного излучения до 100 Вт/см<sup>2</sup>. Каскадные солнечные элементы на основе гетероструктур GaInP/GaAs/Ge имеют КПД более 30% при концентрированном до 100 крат солнечном излучении в условиях околоземного космического пространства. На основе каскадных солнечных элементов и линз Френеля созданы концентраторные модули для космических солнечных батарей. Результат их применения – уменьшение площади и стоимости солнечных элементов, улучшение радиационной защиты.

## ВВЕДЕНИЕ

Передача энергии по лазерному лучу актуальна для систем дистанционного энергопитания космических аппаратов лазерным излучением, передаваемым с Земли, а также при передаче лазерной энергии между космическими аппаратами и с космических солнечных батарей на Землю. Главной проблемой фотоэлектрического преобразования лазерной энергии является обеспечение достаточно высокой эффективности преобразования при оптической мощности в диапазоне 0,1...100 Вт/см<sup>2</sup>. Основными материалами для фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) излучения полупроводниковых лазеров являются: GaAs/AlGaAs-гетероструктуры с шириной запрещённой зоны активной области 1,42...1,8 эВ для излучения с длиной волны  $\lambda = 0,4...0,9$  мкм; InGaAs, антимонид галлия (GaSb) и гетероструктуры AlGaAsSb/GaSb, InGaAsP/InP с шириной запрещённой зоны фотоактивной области 0,7...1,2 эВ для излучения с  $\lambda = 0,9...1,7$  мкм. Теоретические оценки показывают, что ФЭП на основе этих материалов могут обеспечить преобразование лазерного излучения с КПД 50–65%.

Повышение требований к бортовым системам космических аппаратов приводит к необходимости создания солнечных батарей (СБ), обладающих более высокими энергетическими и эксплуатационными характеристиками с увеличенным ресурсом работы. Для создания СБ наиболее перспективными являются каскадные солнеч-

ные элементы (СЭ) из арсенида галлия и родственных ему соединений  $A_3B_5$ .

За последние 4 десятилетия накоплен большой опыт разработок [1–11] и эксплуатации космических солнечных элементов и батарей на основе AlGaAs/GaAs, AlGaInP/GaAs/Ge и других гетероструктур. Показано, что эти СБ обеспечивают увеличение КПД, удельного энергоёмкости и радиационной стойкости по сравнению с кремниевыми батареями. Это достигается за счёт уменьшения толщины широкозонного «окна» до нескольких сот ангстрем, улучшения параметров материала активной области, создания тыльных потенциальных барьеров и встроенных полей, создания встроенного брегговского зеркала.

В каскадных СЭ, выполненных на основе нескольких последовательно соединённых *p-n*-переходов в материалах с различной шириной запрещённой зоны, обеспечено существенное увеличение КПД до значений более 30% в условиях околоземного космоса (нулевая атмосферная масса – АМ0). При этом наибольшее применение получили СЭ на основе гетероструктур с тремя *p-n*-переходами: германий и арсенид галлия в качестве материалов узкозонных элементов и твёрдые растворы GaInP в качестве материала широкозонного элемента. Несмотря на большую стоимость каскадных СЭ по сравнению с кремниевыми, их использование обеспечивает приблизительно 2-кратное снижение суммарных затрат, благодаря увеличению удельного энергоёмкости, уменьшению размеров и веса СБ, уве-

личению ресурса работы СБ и снижению расхода топлива на доставку СБ на орбиту, ориентацию и стабилизацию космического аппарата (КА).

Для достижения наивысших значений КПД в таких ФЭП при количестве слоёв более 30, толщины ряда слоёв должны составлять 10...100 нм, что необходимо для снижения рекомбинационных и оптических потерь. Дальнейшие перспективы увеличения КПД связываются с разработкой 4- и 5-переходных каскадных СЭ, а также с использованием гетероструктур с квантовыми ямами и точками. Получение таких СЭ возможно только с применением высокопроизводительных прецизионных технологических установок МОС-гидридной и молекулярной эпитаксии и современных постростовых технологий.

Чрезвычайно важным преимуществом гетероструктурных СЭ на основе  $A_3B_5$  соединений является их способность эффективно преобразовывать более чем 100-кратно концентрированное солнечное излучение. Это позволяет снизить расход полупроводниковых материалов пропорционально степени концентрирования и, следовательно, существенно снизить стоимость «солнечной» электроэнергии. Дополнительными преимуществами при переходе к концентраторным СБ в космосе являются:

- возможность организации защиты ФЭП элементами конструкции концентрирующей системы от ионизирующих излучений;
- возможность осуществления термического фотонного и инжекционно-го отжига радиационных дефектов.

## ФЭП ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основными требованиями к ФЭП лазерного излучения являются:

- высокий КПД при выбранных длинах волн лазерного излучения;
- эффективная и надёжная работа ФЭП при высокой плотности излучения и повышенных температурах;
- эффективный отвод тепла от ФЭП без существенного увеличения массы;

- устойчивость к воздействию внешних факторов в космическом пространстве;
- возможность компенсации неравномерного распределения плотности лазерного излучения.

В качестве источника лазерного излучения предполагается использовать полупроводниковые лазеры с длиной волны излучения в диапазоне 1,6...0,8 мкм, работающие в импульсном или непрерывном режимах. Наиболее подходящими материалами для ФЭП такого излучения являются гетероструктуры AlGaAs/GaAs, антимонид галлия (GaSb) и InGaAsP.

КПД ФЭП увеличивается при увеличении мощности лазерного излучения до оптимальной величины 10...100 Вт/см<sup>2</sup> вследствие увеличения рабочего напряжения ФЭП. При дальнейшем увеличении интенсивности засветки возрастают омические потери, что приводит к снижению КПД ФЭП. Величина оптимальной плотности мощности лазерного излучения уменьшается также с увеличением площади ФЭП.

При построении реальных лазерных систем дистанционного энергопитания на большие расстояния мощность приходящего лазерного излучения может составлять менее 0,1...1,0 Вт/см<sup>2</sup>. В этом случае уменьшение необходимой площади ФЭП может быть достигнуто путём концентрирования лазерного излучения в 100...1000 раз. При этом может быть получен максимальный КПД преобразования, а площадь и стоимость ФЭП снижена пропорционально кратности концентрирования при использовании относительно дешёвых линз Френеля [4–6].

Для дальних волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) наибольшее распространение получили ФЭП на основе системы InGaAs/InP, перекрывающие спектральный диапазон излучения лазеров 1,3...1,55 мкм, в котором достигнуты минимальные оптические потери и минимальная дисперсия в оптических волокнах, что очень важно для ВОЛС большой протяжённости. Однако для ВОЛС малой протяжённости (внутриобъектных и других длиной менее 1 км) затухание излучения  $\lambda = 0,8$  мкм составляет менее 1 дБ, и потери в волокне не играют заметной роли. Таким образом, для коротких ВОЛС, а также для излучения, распространяющегося в открытом пространстве, использование ФЭП на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктуры не только приемлемо,

но и является предпочтительным для детектирования лазерного излучения с длиной волны 0,87...0,4 мкм.

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФЭП ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В условиях освещения ФЭП, когда количество сгенерированных носителей тока остаётся меньше количества основных носителей, варьирование освещённости будет означать, что прямо пропорционально изменяется и плотность фототока  $i_{\phi}$ . Поток излучения полагаем монохроматическим с  $h\nu = E_g$  (GaAs) = 1,424 эВ. Из рисунка 1 видно, что КПД увеличивается при увеличении  $i_{\phi}$ , т.е. уровня освещённости. Это происходит за счёт увеличения напряжения холостого хода ( $U_{xx}$ ) и связанного с ним увеличения напряжения в точке оптимальной нагрузки ( $U_{opt}$ ).

В диапазоне плотностей тока  $i_{\phi} = 10^{-2}...10^3$  А/см<sup>2</sup> имеет место близкая к линейной зависимость расчётного КПД от плотности фототока. При больших плотностях фототока ( $i_{\phi} > 10^3$  А/см<sup>2</sup>) начинается отклонение от линейной зависимости  $\eta = f(i_{\phi})$ , показанное штриховой кривой, вследствие того что концентрация сгенерированных носителей тока при  $i_{\phi} > 10^3$  А/см<sup>2</sup> приближается к концентрации основных носителей. При этом максимальное теоретическое значение КПД преобразования лазерного излучения ( $h\nu = 1,424$  эВ,  $\lambda = 0,87$  мкм) при  $i_{\phi} = 10^3$  А/см<sup>2</sup> составляет ~80% при 300 К.

Граничная длина волны  $\lambda_c$ , меньше которой фотоны будут поглощаться в материале ФЭП с шириной запрещённой зоны  $E_g$ , равна  $\lambda_c = 1,24 E_g$ . Фотоны с энергиями  $h\nu > E_g$  создают «горячие» носители тока, имеющие, помимо избыточной потенциальной энергии  $E_g$ , ещё и избыточную кинетическую энергию, равную разности  $h\nu - E_g$ . Однако эта кинетическая энергия быстро расходуется на нагревание кристаллической решётки (носители термализуются, т.е. приходят в тепловое равновесие с решёткой). Таким образом, в потенциальную энергию электронно-дырочных пар преобразуется лишь часть высокоэнергетичных фотонов. Значения монохроматического КПД (при  $h\nu = E_g$ ) показаны линиями 1, 2 и 3 на рисунке 2 для трёх значений фототока  $i_{\phi}$ . На этом рисунке по оси абсцисс отложена длина волны, которую в данном случае следует рассматривать как граничную длину волны для каждого полупроводникового материала. Для

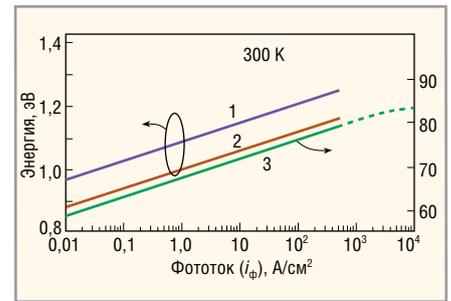


Рис. 1. Зависимость КПД и энергии лазерного излучения от уровня освещённости ФЭП:

зависимость энергетических величин  $qU_{xx}$  (1),  $qU_{opt}$  (2) и КПД (3) от плотности фототока для идеализированного p-n-перехода в GaAs; линия 3 и правая ось – зависимость КПД от плотности фототока при преобразовании монохроматического излучения с энергией квантов  $h\nu = E_g$

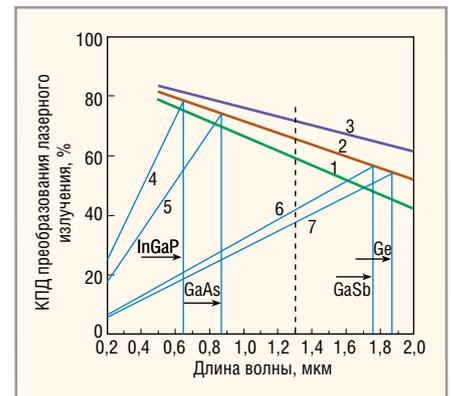
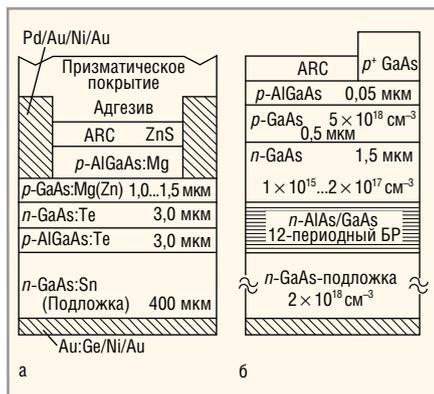


Рис. 2. Зависимость КПД ФЭП от длины волны лазерного излучения:

Максимальные значения монохроматического КПД для величин фототока  $i_{\phi} = 0,1; 1,0$  и  $10$  А/см<sup>2</sup> (линии 1, 2, 3 соответственно) в зависимости от граничной длины волны полупроводникового материала ФЭП; 4, 5, 6, 7 – КПД преобразования энергии монохроматического излучения для идеализированных ФЭП на основе InGaP, GaAs, GaSb и Ge соответственно в зависимости от длины волны преобразуемого излучения

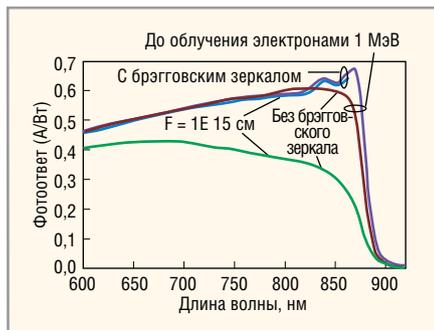
каждого материала значения КПД преобразования более коротковолнового по сравнению с  $\lambda_c$  излучения должны быть уменьшены в  $\lambda/\lambda_c$  раз, что в качестве примера изображено четырьмя наклонными прямыми для материалов InGaP (4) GaAs (5), GaSb (6) и Ge (7) при  $i_{\phi} = 1,0$  А/см<sup>2</sup>.

Максимум для КПД идеализированного ФЭП лазерной энергии на основе каждого из выбранных материалов увеличивается с увеличением плотности фототока, т.е. с увеличением мощности лазерного излучения, и уменьшается с увеличением длины волны лазерного излучения. При этом для лазерного излучения с энергией 0,8...0,87 мкм опти-

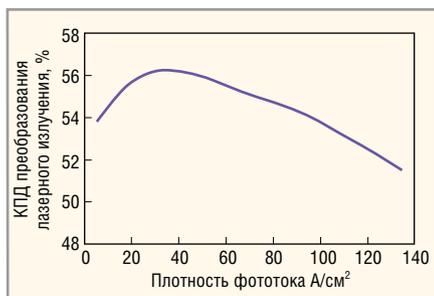


**Рис. 3. Гетероструктура преобразователей лазерного излучения на основе GaAs:**

а – с призматическим покрытием, б – с внутренним брэгговским отражателем



**Рис. 4. Спектр фотоответа в AlGaAs/GaAs ФЭП двух типов: с брэгговскими отражателями (БО) и без БО до облучения электронами 1 МэВ и после облучения дозой  $10^{15} \text{ см}^{-2}$**



**Рис. 5. КПД преобразования в зависимости от плотности фототока для GaAs-элемента ( $d_a = 2 \text{ мм}^2$ ) при засветке лазером с длиной волны излучения 820 нм**

мальным материалом для изготовления ФЭП является GaAs, а для лазерного излучения с длиной волны 1,55 мкм оптимальными являются полупроводники GaSb и твёрдые растворы InGaAsP, InGaAs (теоретическое КПД ~45%).

**Теоретический предел КПД ФЭП на основе GaAs и GaSb для излучения лазеров, выполненных на основе различных материалов при  $i_{\phi} = 1 \text{ А/см}^2$**

Материал лазера	Лазер Длина волны, нм	КПД фотодетекторов	
		ФЭП на основе GaAs	ФЭП на основе InGaAs и GaSb
AlGaInP	650	55	20
AlGaAs	840	75	27
YAG:Nd	1060	–	35
InGaAsP	1300	–	40
InGaAsP	1550	–	45

Значения КПД на рисунке 2 и в таблице рассчитаны в предположении нулевых оптических потерь излучения на отражение света от поверхности ФЭП и на затенение контактами и нулевых рекомбинационных потерях фотогенерированных электронно-дырочных пар до их разделения *p-n*-переходом. Не учитывались также потери, связанные с протеканием в объёме *p*- и *n*-области ФЭП фотогенерированных носителей тока. При учёте этих потерь реально достижимыми в GaAs ФЭП являются значения КПД = 60–65% при  $\lambda = 0,82...0,85 \text{ мкм}$  и  $i_{\phi} = 10...50 \text{ А/см}^2$ .

Лазеры, предназначенные для передачи энергии от Земли в космос и из космоса на Землю, должны излучать в спектральных диапазонах, характеризующихся минимальным поглощением земной атмосферы. Минимальная длина волны этих лазеров, вследствие поглощения озоновым слоем и сильным рэлеевским рассеянием коротковолнового излучения, равна 350 нм. Максимальная длина волны ( $\lambda_{\text{макс}}$ ) лазеров определяется длинноволновым краем поглощения рассматриваемых ФЭП:  $\lambda_{\text{макс}} = 870 \text{ нм}$  для GaAs ФЭП и ~1700 нм для GaSb и InGaAs ФЭП.

В таблице приведены предельные теоретические значения ФЭП излучения различных лазеров на основе GaAs и GaSb. Максимальный КПД передачи лазерной энергии может быть получен в системе с лазером на основе AlGaAs ( $\lambda = 840 \text{ нм}$ ) и ФЭП на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур.

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ALGaAs/GaAs ФЭП ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

ФЭП лазерного излучения на основе GaAs имеют следующие преимущества:

- GaAs ФЭП имеют меньшие значения темновых токов, вследствие большей ширины запрещённой зоны – 1,4 эВ в GaAs (0,75 эВ в InGaAs, изопериодичном с InP) и, следовательно, меньшие шумы и лучший порог фоточувствительности;
- GaAs ФЭП имеют большее значение КПД. Теоретическое значение КПД в GaAs ФЭП, работающем в фотовольтаическом

режиме (без внешнего напряжения) для мощного ( $10^2...10^3 \text{ Вт/см}^2$ ) лазерного излучения ( $\lambda = 0,85 \text{ мкм}$ ) превышает 75% (40% в InGaAs ФЭП для  $\lambda = 1,3 \text{ мкм}$ );

- GaAs ФЭП имеют лучшую стабильность температурного коэффициента КПД  $\eta_r = -1,4 \times 10^{-3} \text{ град}^{-1}$  при плотности фототока 30 А/см<sup>2</sup> (в 1,8 раза меньше, чем в ФЭП на основе Si и в 3 раза меньше, чем в InGaAs ФЭП).

Структуры ФЭП на основе GaAs, выращенные методом жидкостной эпитаксии, показаны на рисунке 3. Они состоят из: *n*-GaAs базы (3 мкм); *p*-GaAs эмиттера ( $p = (0,2...2,0) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , легированный Mg, Ge и Zn, 1,0...1,5 мкм); *p*-Al<sub>0,85</sub>Ga<sub>0,15</sub>As «окна» (Mg, Ge, Zn, 0,05...5,0 мкм) (см. рис. 3а). Эти структуры были оптимизированы для работы с лазерами мощностью до 200 Вт/см<sup>2</sup>. Элементы должны иметь низкое слоевое сопротивление, что обеспечивалось увеличением толщины уровня легирования *p*-GaAs эмиттера (сохраняя достаточную диффузионную длину электронов в этом слое) и *p*-AlGaAs «окна».

Методом МОС-гидридной эпитаксии были изготовлены также структуры ФЭП с внутренним брэгговским рефлектором (БР) (см. рис. 3б). В этих элементах наблюдалось увеличение фотоответа (см. рис. 4) в длинноволновой части спектра ( $\lambda = 820...880 \text{ нм}$ ), вызываемое сильным отражением (до 96%) от БР в спектральной области 820...900 нм. В структурах с БР удалось также значительно улучшить радиационную стойкость за счёт реализованной возможности уменьшения толщины (до 1...1,5 мкм) базового слоя *n*-GaAs и снижения за счёт этого количества радиационных дефектов, генерируемых в этом слое.

Эксперименты с лазерами большой плотности излучения в диапазоне 50...300 Вт/см<sup>2</sup> проводились на элементах с площадью облучения  $d_a = 2 \text{ мм}^2$ . Расстояние между полосами контактной решётки в этих элементах было 0,1 или 0,05 мм; ширина полос была 4...6 мкм при их толщине 2...3 мкм.

В лучших образцах был достигнут фотоответ 0,62...0,67 А/Вт при  $\lambda = 820...870 \text{ нм}$  (см. рис. 4). В GaAs-элементах с призматическим покрытием был получен высокий внешний квантовый выход 94–96%. Напряжение холостого хода увеличивалось от 1,1...1,15 В при  $P_{\text{лаз}} = 5 \text{ Вт/см}^2$  до 1,2...1,26 В при  $P_{\text{лаз}} = 200 \text{ Вт/см}^2$ . При  $\lambda = 820 \text{ нм}$  был получен КПД = 56% при плотности фототока  $i_{\phi} = 30...40 \text{ А/см}^2$  (см. рис. 5) и 52% при  $i_{\phi} = 130 \text{ А/см}^2$ .

Сохранение высокого значения КПД при увеличении мощности лазерного излучения до  $P_{\text{лаз}} > 200 \text{ Вт/см}^2$  возможно за счёт уменьшения сопротивления растекания во фронтальных слоях ФЭП и создания более густой контактной сетки без увеличения степени затенения освещаемой поверхности.

### **ФЭП КОНЦЕНТРИРОВАННОГО СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

СБ являются основным источником энергии КА. Анализ тенденций развития информационных и энергетических космических систем, условий и сроков их функционирования позволяет сформулировать и ранжировать требования к характеристикам перспективных СЭ и СБ для таких систем.

Основное требование – повышение КПД СЭ и плотности вырабатываемой мощности ( $\text{Вт/м}^2$ ) СБ. Для низкоорбитальных КА повышение КПД необходимо для снижения площади СБ, без чего невозможно обеспечить требуемую длительность существования КА на орбите из-за тормозящего действия остаточной атмосферы.

Для средне- и высокоорбитальных КА повышение КПД СЭ также имеет очень важное значение, так как сокращение площади позволяет уменьшить массу СБ, необходимую для получения требуемой электрической мощности, и, как следствие, снизить стоимость запуска КА.

Второе по значимости требование – повышение устойчивости СЭ и СБ к действию факторов космического пространства. Выполнение этого требования имеет большое значение для успешного функционирования КА, размещаемых на любых орбитах. В частности, в случае низкоорбитальных КА необходимо обеспечить устойчивость СБ к действию термоциклов и атомарного кислорода. Для СБ КА, которые должны работать на ГСО (геостационарная орбита) и орбитах, проходящих через радиационные пояса Земли, наиболее важно обеспечить высокую устойчивость полупроводниковых СЭ к действию частиц высоких энергий – электронов и протонов.

Третье требование, значимость которого возрастает по мере увеличения высоты орбиты КА, – высокая удельная мощность СБ ( $\text{Вт/кг}$ ), которая, очевидно, зависит от КПД и радиационной стойкости СЭ, а также от удельной массы СБ ( $\text{кг/м}^2$ ). Удельная масса СБ, в свою очередь, определяется удельными массами СЭ и конструкции СБ.



**Рис. 6. Космическая станция «Мир» с гетероструктурной AlGaAs/GaAs СБ, установленной на базовом модуле**

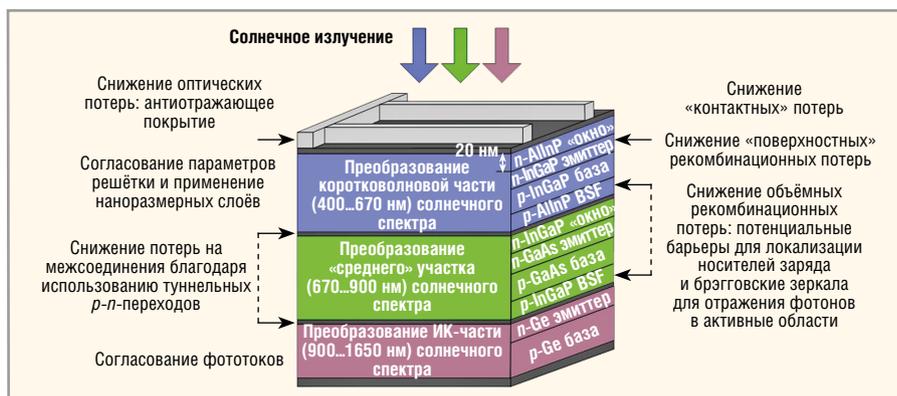
Ещё одно требование – минимизация стоимости единицы вырабатываемой электрической мощности (\$/Вт) – может быть удовлетворено лишь при выполнении всех предыдущих требований, организации массового автоматизированного производства СЭ и СБ космического назначения и конверсионного использования разработанных технологий при создании систем наземной коммерческой солнечной энергетики.

### Состояние работ по космическим СЭ и СБ

На протяжении более сорока лет лидирующее положение в космической солнечной энергетике занимали кремниевые СЭ и СБ, которые обеспечили выполнение подавляющего большинства космических программ во всём мире. Однако в настоящее время достигнуты практически предельные показатели их энергетической эффективности при массовом промышленном производстве: КПД СЭ 14–16% (AM0, 28°C), плотность мощности СБ 150...175 Вт/м<sup>2</sup> и удельная мощность 50...70 Вт/кг. Такие показатели явно не соответствуют требованиям к параметрам СБ нового поколения. Это означает, что кремниевые СБ должны быть заменены батареями на основе более эффективных каскадных СЭ.

Основными разработчиками и производителями каскадных солнечных элементов для космических батарей в мире являются: Spectrolab Inc. (www.spectrolab.com), Emcore (www.emcore.com), AZUR Space Solar power GmbH (www.azurspace.com).

Максимальные достигнутые значения КПД космических СЭ этих производителей составляют 29–30% при освещении прямым солнечным излучением с нулевой воздушной массой (AM0), т.е. в условиях околоземного космического пространства.



**Рис. 7. Гетероструктурный каскадный СЭ**

В России производителями космических солнечных батарей являются: ОАО НПП «Квант» (www.npp-kvant.ru) и ОАО «Сатурн» (www.saturn.kuban.ru). Однако существующий объём производства отечественных гетероструктурных солнечных элементов не обеспечивает потребности страны в космических СБ. По этой причине российские космические батареи оснащаются в основном каскадными СЭ зарубежного производства. Повышение КПД каскадных СЭ и создание отечественного крупномасштабного производства высокоэффективных, радиационностойких космических батарей на их основе является чрезвычайно важным для выполнения Федеральной космической программы.

Впервые гетероструктурные AlGaAs/GaAs фотоэлементы были созданы в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН под руководством Ж.И. Алфёрова [1–7]. С использованием этой технологии в НПО «Квант» (Москва) было организовано крупномасштабное производство гетероструктурных СБ. Одна из таких батарей площадью 70 м<sup>2</sup> была установлена в 1986 году на базовом модуле космической станции «Мир» и проработала там весь срок эксплуатации без заметного снижения мощности (см. рис. 6).

В последние годы в ФТИ достигнуто значительное увеличение КПД в каскадных гетероструктурных ФЭП за счёт «расщепления» солнечного излучения на несколько спектральных интервалов и осуществления более эффективного преобразования энергии фотонов каждого из этих интервалов в определённой части полупроводниковой структуры. Трёхкаскадные ФЭП включают в себя три фотоактивные области, выполненные из трёх полупроводников GaInP/GaAs/Ge с шириной запрещённой зоны, уменьшающейся от фронтальной освещаемой поверхности ФЭП (см. рис. 7). Коротковолновая

часть солнечного излучения преобразуется в GaInP-области, средневолновая часть – в GaAs-области и инфракрасная часть – в Ge-области.

Для космических применений созданы каскадные СЭ Ge/GaAs/GaInP, в которых достигнуты значения КПД, превышающие 30% для внеатмосферного солнечного излучения (AM0). На основе разработанных каскадных ФЭП и концентраторов (линз Френеля) созданы космические концентраторные модули, обеспечивающие повышение удельного энергосъёма и снижение стоимости СБ.

### Модули СБ с концентраторами излучения и каскадными СЭ

При концентрировании солнечное излучение перехватывается линзой или зеркалом и фокусируется на СЭ малого размера, который вырабатывает практически такую же электрическую мощность, как планарный СЭ, равный площади концентратора. В этом случае производственные возможности каждой установки МОС-гидридной эпитаксии по обеспечению потребляемых КА мощностей увеличиваются на один-два порядка, в зависимости от степени концентрирования солнечного излучения, которая для космических СБ будет находиться в диапазоне 10...100 крат. В частности, если производительность одной установки около 100 м<sup>2</sup>/год, то даже при кратности концентрирования равной 10 эта установка обеспечит производство многопереходных СЭ для СБ с концентраторами (СБК) площадью около 1000 м<sup>2</sup>/год. Это означает, что при плотности мощности СБК 300 Вт/м<sup>2</sup> такая установка МОС-гидридной эпитаксии позволит создать космические СБ общей мощностью не менее 300 кВт/год. При более высоких уровнях концентрирования солнечного излучения эта цифра пропорционально возрастёт.

В последние годы в ФТИ проводятся исследования и разработки фотоэлектрических модулей (ФЭМ) с короткофокусными линейными линзами Френеля, вторичными оптическими элементами и трёхпереходными (каскадными) СЭ. В процессе создания космических ФЭМ были разработаны новые материалы, конструкции и технологии изготовления короткофокусных линзовых концентраторов, устойчивых к воздействию факторов космической среды. Так, были разработаны композитные френелевские линзы «силикон–стекло». В качестве основы линз используется стекло, а в качестве френелевской структуры используется очень тонкий (в среднем ~0,2 мм) профиль, изготовленный из прозрачного силикона. Силикон известен как высокопрозрачный полимерный материал, устойчивый к воздействию УФ-радиации. Он также характеризуется хорошей эластичностью и хорошими термическими свойствами. Будучи полимеризован прямо на стеклянной поверхности (при использовании специальных промежуточных адгезивных слоёв), силикон остаётся в прочном контакте со стеклянной подложкой при изменении температуры и других воздействиях.

Разработаны также концентраторные СЭ (см. рис. 8) с КПД ~30% (АМ0, 100 солнц). Достигнуто улучшение радиационной стойкости СЭ [10, 11] благодаря использованию встроенных брэгговских отражателей, увеличивающих «захват» солнечных лучей в фотоактивных областях гетероструктур, что позволяет уменьшить их толщину и, как следствие этого, уменьшить количество радиационных повреждений СЭ.

Дополнительная радиационная защита СЭ в концентраторных модулях обеспечивается элементами вторичной оптики, помещаемыми на поверхности СЭ с целью улучшения разориентационных характеристик СБК. При этом такая защита практически не увеличивает вес СБ, т.к. площадь СЭ и площадь покрытий на них значительно меньше апертуры СБК пропорционально кратности концентрирования.

Приведённые выше результаты свидетельствуют о безусловной перспективности СБК по следующим факторам:

- в СБК повышается устойчивость полупроводниковых ФЭП к действию космической радиации за счёт экранирующего действия концентраторов и других элементов конструкции, а также в результате процессов

фотоинжекционного и термического отжига радиационных дефектов;

- технологии производства СБК и их элементов имеют широкие перспективы конверсионного использования при создании высокоэффективных и экономичных наземных фотоэлектрических систем, что будет, безусловно, выгодно фирмам-производителям; при этом в наземных СБК оптимальные степени концентрирования солнечного излучения находятся в диапазоне 500...1000 крат, в результате чего одна технологическая установка сможет обеспечить создание на Земле СБК площадью 100 тыс. м<sup>2</sup>/год. Конструктивные схемы СБК должны быть, по возможности, приближены к традиционным схемам и параметрам плоских космических СБ, чтобы их можно было применять в составе существующих и разрабатываемых ракетно-космических систем. Для этого необходимо обеспечить:

- малый транспортировочный объём, который определяется строительной высотой (толщиной) СБК и зависит от фокусного расстояния концентратора;
- возможность точного слежения СБК за Солнцем как по двум, так и по одной оси, поскольку многие КА имеют одноосную систему слежения;
- малую удельную массу (кг/м<sup>2</sup>), не превышающую этот показатель для плоских СБ;
- простую и надёжную систему раскрытия СБК в космосе и т.д.

Как показала практика отечественных и зарубежных исследований и разработок, этим требованиям в наибольшей степени соответствуют СБК с круговыми и линейными линзами Френеля. Именно в этом направлении ведутся работы в данной области.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Каган М.Б., Протасов И.И., Трофим В.Г. Солнечные преобразователи на основе гетеропереходов p-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As – n-GaAs. ФТП. Т. 4. № 12. 1970. С. 2378.
2. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения (монография). Изд-во «Наука». 1989.
3. Andreev V.M., Grilikbes V.A., Rummyantsev V.D. Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight (monograph). J.Wiley & Sons Ltd. 1997.
4. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития сол-

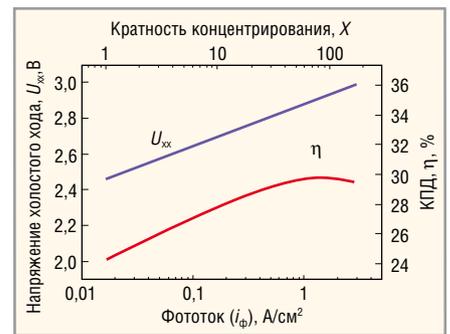


Рис. 8. Зависимости напряжения холостого хода (U<sub>ох</sub>) и КПД каскадного СЭ от величины фототока (i<sub>ф</sub>) и кратности концентрирования солнечного излучения АМ0

нечной фотоэнергетики. «Физика и техника полупроводников». Т. 38. Вып. 8. 2004. С. 937–948.

5. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rummyantsev V.D. III-V heterostructures in photovoltaics in: «Concentrator Photovoltaics». Eds.: A.Luque, V.Andreev, Springer Series in Optical Sciences. V. 130. 2007. P. 25–50.
6. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rummyantsev V.D. III-V solar cells and concentrator arrays in «High-Efficient Low-Cost Photovoltaics». Eds.: V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger, Springer Series in Optical Sciences. V. 140. 2008. P. 101–141.
7. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Kalinovsky V.S., Grikkbes V.A., Rummyantsev V.D., Shvarts M.Z., Fokanov V., Pavlov A. High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power beaming. Proceedings of WCPEC-3, Osaka, Japan. 2003. P. 3P-B5-33.
8. Andreev V.M. GaAs and high-efficiency space cells in «Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals & Applications». Eds. T. Markvart and L. Castaner, Elsevier Science. UK. 2003. P. 418–433.
9. Андреев В.М., Грилихес В.А., Железняков А.Г., Румянцев В.Д., Соколов Б.А. Перспективы создания и применения космических фотоэлектрических энергоустановок с концентраторами излучения и многопереходными гетероструктурными фотопреобразователями. Известия Академии наук. Энергетика. № 3, 2003. С. 60–69.
10. Andreev V.M., Komin V.V., Kochnev I.V., Lantratov V.M., Shvarts M.Z. High-efficiency AlGaAs-GaAs Solar Cells with Internal Bragg Reflector. Proceedings of the First WCPEC. Hawaii. 5–9 December 1994. P. 1894–1897.
11. Andreev V.M., Emelyanov V.M., Chesta O.I., Lantratov V.M., Shvarts M.Z., Timoshina N.Kb. Radiation degradation of multijunction III–V solar cells and prediction of their lifetime. Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 24–28 September 2012. Frankfurt. Germany. P. 169–174.