

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ АІІВУ

Е. В. Слыщенко^{1,2*}, А. А. Наумова¹, А. А. Лебедев^{1,2}, М. А. Генали¹, Н. Т. Вагапова¹, Б. В. Жалнин¹

¹ АО «Научно-производственное предприятие «Квант»

Российская Федерация, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, 16

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Российская Федерация, 119049, г. Москва, Ленинский просп., 4

*E-mail: otдел_17@nppkquant.ru

Приведены краткие сведения по истории развития фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) (кремниевых и на основе соединений АІІВУ) и солнечных батарей на их основе для космических аппаратов. Перечислены основные факторы космического пространства и показана эволюция структуры и конструкций. Приведена принципиальная структура современных трехкаскадных InGaP / InGaAs / Ge солнечных элементов с указанием функционального назначения слоёв, их основных характеристик. Объяснен механизм деградации электрических параметров таких фотопреобразователей под действием космической радиации и показана возможность минимизации данного негативного эффекта. Описаны основные методы и особенности технологии изготовления трехкаскадных ФЭП. Приведен обзор ФЭП космического назначения на основе соединений АІІВУ основных мировых производителей из США, Германии, Италии, России с иллюстрацией их внешнего вида, описанием особенностей конструкций и основных свойств. Показано, что наиболее распространенным является размер ФЭП с площадью ~ 30 см². Представлены сведения о созданных трехкаскадных InGaP / InGaAs / Ge ФЭП большой площади (до ~ 60–65 см²). Показан мировой уровень эффективности преобразования солнечной энергии (КПД), достигнутый в промышленном производстве, составляющий 26–30 %. Приведены сведения о ФЭП для преобразования концентрированного солнечного излучения. Показаны основные направления повышения характеристик ФЭП на основе соединений АІІВУ.

Ключевые слова: солнечный элемент, солнечная батарея, космический аппарат, фотоэлектрический преобразователь, АІІВУ, полупроводниковая структура.

Siberian Journal of Science and Technology. 2018, Vol. 19, No. 2, P. 308–324

THE REVIEW OF MODERN SOLAR CELLS FOR SPACE APPLICATION BASED ON АІІВU MATERIALS

E. V. Slyshchenko^{1,2*}, A. A. Naumova¹, A. A. Lebedev^{1,2}, M. A. Genali¹, N. T. Vagapova¹, B. V. Zhalnin¹

¹ JSC “Research-production enterprise “Kvant”

16, 3-rd Mytishchinskaya Str., Moscow, 129626, Russian Federation

² National Research Technological University “MISIS”

4, Leninsky Av., Moscow, 119049, Russian Federation,

*E-mail: otдел_17@nppkquant.ru

The article gives the short information about the history of the development of photoelectric generators (silicon and based on АІІВU compounds) and solar arrays based on them for spacecrafts. The main factors of outer space are listed and the evolution of structure is demonstrated. The principal structure of modern triple junction InGaP / InGaAs / Ge solar cells with indication of the functional purpose of the layers is given and their main characteristics are presented. The mechanism of degradation of electrical parameters of such solar cells under the action of cosmic radiation is explained and the possibility of minimizing this negative effect is described. The main methods and technological peculiarities of triple junction solar cells production are discussed. The review of solar cell for space application based on АІІВU compounds produced by the world's leading manufacturers from the USA, Germany, Italy and the Russian Federation with its external appearance and the description of the features of the constructions and main properties are presented. It is shown that the most common is the solar cells size with an area of ~ 30 cm². Information on established triple junction InGaP / InGaAs / Ge solar cells large area is presented (up to ~ 60–65 cm²). The world level of efficiency of solar energy conversion is achieved in industrial production, amounting to 26–30 %. The information about solar cells for conversion of concentrated solar radiation is provided. The basic directions for improving the characteristics of solar cells based on compounds АІІВU are shown.

Keywords: solar cell, solar array, spacecraft, photoelectric generator, АІІВU, semiconductor structure.

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-2-308–324

Введение. Наиболее эффективным и проверенным в условиях длительной эксплуатации способом получения электричества из солнечной энергии сегодня является фотоэлектрический метод прямого преобразования. Он реализован в полупроводниковых фотоэлектрических преобразователях (ФЭП), получивших в англоязычной литературе название solar cell (SC), т. е. солнечный элемент (СЭ). Из ФЭП формируется фотогенерирующая часть (ФГЧ) солнечных батарей (СБ). Уже почти шесть десятилетий, начиная с первых спутников Земли (третий советский искусственный спутник, запущенный 15 мая 1958 г., и американский спутник «Авангард», запущенный 17 марта 1958 г.), СБ являются основным первичным источником электроэнергии для большинства отечественных и зарубежных космических аппаратов (КА) [1; 2].

Идея использования фактически неисчерпаемого источника энергии – солнечного излучения, всегда была заманчивой. Однако только к середине XX столетия развитие науки и технологий, обеспеченное в нашей стране работами коллективов под руководством А. Ф. Иоффе (ЛФТИ, г. Ленинград), Н. С. Лидоренко (Всесоюзный научно-исследовательский институт источников тока (ВНИИТ), г. Москва), С. И. Вавилова (ФИАН, г. Москва), привело к возможности ее эффективной практической реализации. Интенсификация работ в этом направлении была связана с поиском оптимального источника питания для КА. Именно в космосе, где, с одной стороны, нет экранирующего солнечный свет слоя атмосферы, а с другой – использование прочих привычных генераторов электричества крайне затруднено или невозможно, применение СБ в комплексе с химическими накопителями оказалось оптимальным решением.

Опыт разработки и эксплуатации КА выявил целый ряд опасных факторов космического пространства. Поскольку ФЭП в составе ФГЧ СБ – одни из немногих приборов на борту космических аппаратов, практически напрямую контактирующих с открытым космосом и непосредственно подверженных воздействию всех факторов космического пространства, то помимо увеличения энергетических и удельных характеристик ФЭП стала крайне актуальной задача по модифицированию их структуры, созданию защиты и разработке более стойких ФЭП. Обширные исследования по улучшению свойств ФЭП и СБ привели, во-первых, к появлению защитных покрытий (стекло) на поверхности кремниевых ФЭП и, во-вторых, к применению новых материалов полупроводниковой структуры ФЭП – материалов АШВВ (арсенид галлия (GaAs) и твердые растворы на его основе: арсенид-алюминия–галлия (AlGaAs), арсенид индия – галлия (InGaAs) и др.). Так, почти повсеместный переход от использования в СБ для космоса кремниевых ФЭП к современным каскадным ФЭП на основе материалов АШВВ привел к значительному увеличению срока службы СБ (с 10 до 15 лет и более) на орбитах с высоким радиационным воздействием [3]. В ретроспективе изменения эффективности ФЭП космического назначения, связанные с изменениями технологии, конструкции и материалов, представлены на рис. 1.

Первые в мире GaAs СБ площадью около 1 м² были разработаны и изготовлены во ВНИИТ (одно из прежних наименований АО «НПП «Квант») из однокаскадных ФЭП и использовались на автоматической межпланетной станции «Венера-4», запущенной 12 июня 1967 г. Однокаскадные GaAs ФЭП, изготовленные по диффузионной технологии, были совместной разработкой ФТИ им. А. Ф. Иоффе и ВНИИТ. Применение именно GaAs ФЭП в СБ станции «Венера-4» было обусловлено необходимостью работы при высоких температурах (~ 120 °С) для заряда блока химических батарей спускаемого аппарата непосредственно перед началом его спуска на поверхность планеты, тогда как кремниевые ФЭП при таких температурах работать не могут. Эта же причина побудила использовать GaAs ФЭП в составе СБ первых автоматических передвижных лабораторий «Луноход-1» и «Луноход-2» (запуск – 10 ноября 1970 г. и 8 января 1973 г.). Площадь СБ на крышке аппарата – 3,5 м², а средняя вырабатываемая мощность, составлявшая 180 Вт, шла на подзарядку серебряно-кадмиевых аккумуляторных батарей ёмкостью 200 А·ч [2; 4].

Дальнейшее развитие ФЭП было связано с совершенствованием технологии получения полупроводниковых материалов, синтеза широкого класса новых материалов высокой степени чистоты, получения качественных гетеропереходов на основе соединений АШВВ, глубокого изучения физических процессов в полупроводниках. Эти работы позволили создать методом жидкофазной эпитаксии гетероструктурные однокаскадные AlGaAs (широкозонное окно) / GaAs (фотоактивная область) ФЭП. В таких ФЭП удалось сформировать бездефектную гетерограницу и обеспечить идеальные условия для фотогенерации электронно-дырочных пар и их собирания *p-n*-переходом. Эти ФЭП обладают более высокой радиационной стойкостью, благодаря чему они успешно эксплуатировались в составе СБ на орбитальной станции «Мир» [2; 5], где СБ была подвержена помимо основных факторов космического пространства еще и длительному воздействию собственной атмосферы станции и воздействию двигателей стыкующихся кораблей. Суммарная средняя деградация характеристик AlGaAs / GaAs СБ составила не более 3,5 % в год [2; 4].

Дальнейшее развитие технологий привело к появлению гетероструктурных ФЭП. Такие ФЭП сохранили высокие характеристики однокаскадных структур на основе арсенида галлия (температурный режим работы, радиационная стойкость). Сначала это были арсенид-галлиевые элементы на инородной, но более тонкой и прочной германиевой подложке. Технология их изготовления существенно отличалась от жидкофазной эпитаксии, а именно, эпитаксиальный рост проводился в газофазном реакторе. Газофазные технологии дали новый импульс к развитию тонкослойных прецизионно легированных многослойных гетероструктур. Результатом реализации такого технологического решения стало создание двух и впоследствии трехкаскадных ФЭП, наиболее полно и эффективно преобразующих солнечный спектр. Как видно из рис. 1, эффективность трехкаскадных ФЭП возрос-

ла в два раза по сравнению с однокаскадными ФЭП и имеет перспективы по дальнейшему росту.

В настоящее время трехкаскадные ФЭП имеют сложившуюся принципиальную конструкцию, изображение которой приведено на рис. 2. Конструкция современного ФЭП включает полупроводниковую структуру InGaP / InGaAs / Ge [6], сплошную тыльную и гребенчатую лицевую контактную структуру, просветляющее (антиотражающее) защитное покрытие.

Полупроводниковая структура современных ФЭП на основе соединений АШВV. Принципиально структура современных ФЭП на основе соединений АШВV состоит из трех каскадов InGaP / InGaAs / Ge, скоммутированных между собой туннельными дио-

дами. Полупроводниковая структура InGaP и InGaAs каскадов создается эпитаксиальным способом на Ge-подложке, в Ge в процессе эпитаксиального роста диффузионно формируется нижний каскад. В процессе роста буферного слоя происходит вывод параметров на контролируемый рост.

База и эмиттер в каждом из каскадов являются активными слоями структуры и образуют *p-n*-переход. Названия генерирующих слоев ФЭП – база (слой *p*-типа проводимости) и эмиттер (*n*-тип) – пришли и закрепились из иностранной литературы по аналогии со слоями в полупроводниковых транзисторах, однако они не в полной мере отражают суть происходящих в слоях ФЭП физических процессов. В этих слоях происходит генерация и сбор носителей заряда.

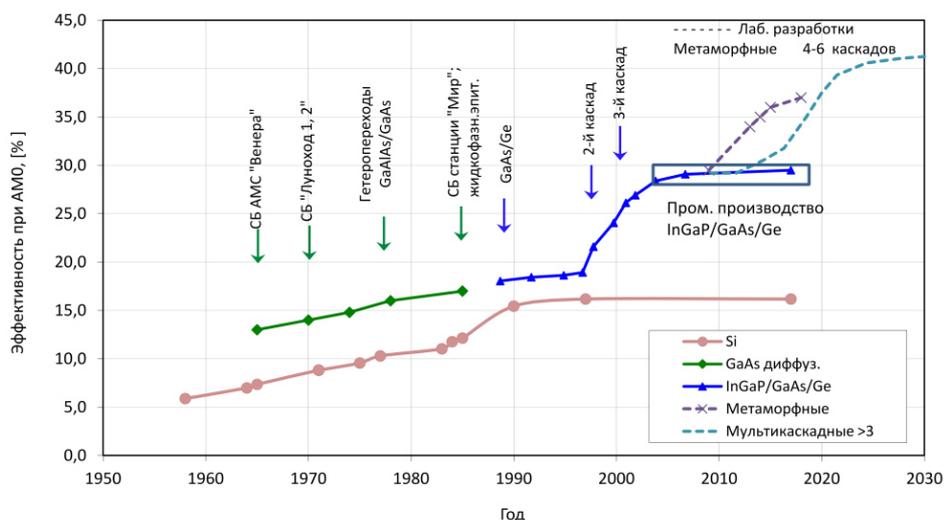


Рис. 1. Развитие элементной базы СБ космической фотоэнергетики (по данным АО «НПП «Квант»)

Fig. 1. Development of the elemental base of solar cells for space photovoltaics (according to the data of JSC “RPE “Kvant”)

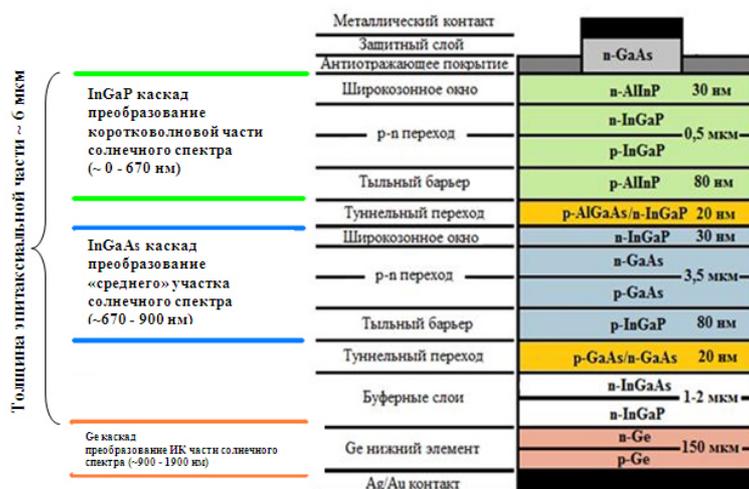


Рис. 2. Схематическое изображение трёхкаскадного гетероструктурного InGaP / InGaAs / Ge ФЭП [7]

Fig. 2. Schematic representation of the triple InGaP / InGaAs / Ge solar cell [7]

Широкозонное окно в верхнем и среднем каскаде препятствует поверхностной рекомбинации носителей заряда за счет создания потенциального барьера.

Защитный высоколегированный слой используется для создания омического контакта, а также защищает слой широкозонного окна от проникновения кислорода.

Применяемые для коммутации каскадов (*p-n*-переходов) туннельные диоды представляют собой обратно включенные к основной генерирующей структуре *p-n*-переходы, сформированные слоями с высоким уровнем легирования, соответствующим состоянию вырождения полупроводника. Буферные слои толщиной около 2 мкм – это переходные слои, задерживающие примеси.

Полупроводниковая структура, несмотря на многообразие материалов, присутствующих в ней, представляет собой единый с Ge-подложкой монокристалл. Такой эффект достигается за счет прецизионного соответствия параметров решетки материалов трехкаскадного ФЭП, задаваемых и контролируемых в процессе эпитаксиального роста с использованием металлорганических и гидридных соединений (МОС ГФЭ). Другими словами, для получения такого сложного полупроводникового эпитаксиального монокристалла соотношение компонентов в трехкомпонентных соединениях должно быть таково: $\text{In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P}$, $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$. При этом с точностью до 0,01 % [7] достигается совпадение параметров решетки осаждаемых слоев с параметром решетки монокристаллической Ge-подложки ($a_{\text{Ge}} = 5,658 \text{ \AA}$ [8]), как показано на рис. 3. В то же время, за счет различных значений ширины запрещенной зоны (ΔE_g) материалов каскадов: у $\text{In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P}$ $\Delta E_g = 1,9 \text{ эВ}$ [9], у $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ $\Delta E_g = 1,41 \text{ эВ}$ [8; 9], у Ge $\Delta E_g = 0,66 \text{ эВ}$ [8; 9] (см. рис. 3), трехкаскадные ФЭП способны преобразовывать излучение в достаточно большом интервале длин волн [3]. Так $\text{In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P}$ поглощает фотоны в диапазоне длин волн от 0 до 670 нм, $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ – в диапазоне длин волн от 670 до 900 нм и Ge – все фотоны от 900 до 1900 нм [9]. Эффективность преобразования солнечного излучения промышленно выпускаемых образцов таких ФЭП сейчас находится в пределах 26–30 %.

Создание такой сложной полупроводниковой структуры в промышленном производстве реализовано методом МОСГФЭ. В основе данного метода лежат процессы переноса осаждаемых материалов в виде летучих соединений к поверхности подложки, на которой происходит разложение этих соединений с выделением необходимо продукта. МОСГФЭ-метод позволяет получать тонкие гомо- и гетерослои с заданным стехиометрическим составом и уровнем легирования. В сравнении с другими методами эпитаксии – жидкофазной и молекулярно-лучевой, метод МОСГФЭ отличается высокой производительностью (скорость роста до 2000 Å/мин) в совокупности с достаточной точностью (по составу основных материалов, толщинам, распределению легирующих примесей в слоях). Современная реализация метода МОСГФЭ с применением металлорганических и гидридных источников элементов третьей (Ga, Al, In) и пятой (As, P) групп периодической системы хими-

ческих элементов позволяет использовать преимущества этого метода в совокупности с возможностью проведения роста всей полупроводниковой структуры за один непрерывный процесс при сравнительно низкой температуре (650 °С).

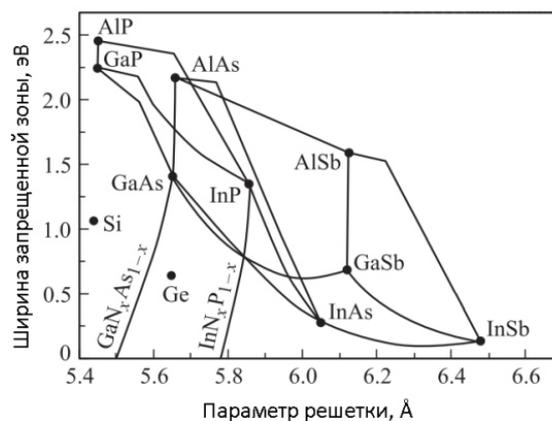


Рис. 3. Ширина запрещенной зоны в зависимости от параметра решетки Si, Ge, соединений АПВ и их твердых растворов [4]

Fig. 3. Width of band gap, depending on the lattice parameter of Si, Ge, compounds of АПВ and their solid solutions [4]

Следует отметить, что фактически все основные свойства прибора закладываются на, пожалуй, самой сложной, многофакторной стадии его создания – стадии роста полупроводниковой структуры [10]. Последующие операции (создание контактной структуры, просветляющего покрытия, создание габаритных размеров, маркировка, измерение выходных электрических характеристик и т. д.) не должны снизить эти заложенные структурой свойства, что в целом требует достаточно сложной технологии и несколько замедляет промышленную реализацию и последующее развитие новых конструкций.

Влияние космической радиации на свойства каскадных ФЭП на основе соединений АПВ. Каскадные $\text{InGaP} / \text{InGaAs} / \text{Ge}$ ФЭП в силу физических свойств являются более стойкими к деградации параметров под воздействием космической радиации по сравнению с Si ФЭП. Однако конструкция $\text{InGaP} / \text{InGaAs} / \text{Ge}$ ФЭП не является оптимальной с точки зрения спектрального распределения фотонов. Данное несоответствие обусловлено требованием строгого согласования по параметру решетки осаждаемых полупроводниковых материалов в процессе эпитаксиального роста (см. рис. 3). Действительно, как можно увидеть на рис. 4, на средний InGaAs -каскад приходится минимальный рабочий диапазон длин волн, это приводит к тому, что InGaAs -каскад генерирует наименьшую плотность тока – 16,58 мА/см^2 [9] в спектре АМ0 по сравнению с 22,43 мА/см^2 и 37,08 мА/см^2 [9], генерируемыми InGaP - и Ge-переходами. Это обстоятельство является критичным в силу последовательного соединения каскадов в структуре трехкаскадного ФЭП (см. рис. 2), из-за чего ток всего ФЭП ограничен минимальным током, генерируемым средним InGaAs -каскадом.

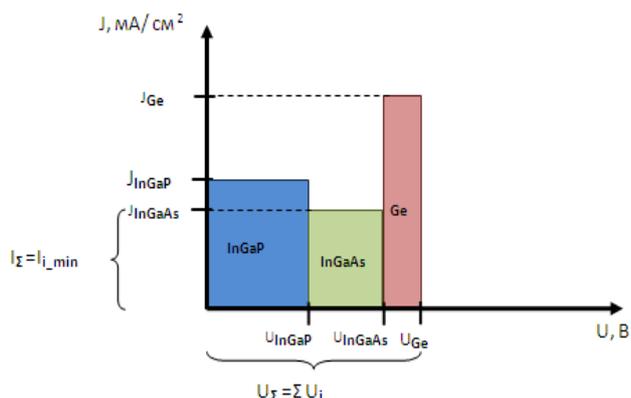


Рис. 4. Пояснение механизма образования характеристик «плотность тока – напряжение» в InGaP / InGaAs / Ge ФЭП

Fig. 4. Interpretation of mechanism of formation of characteristics of current density–voltage in InGaP / InGaAs / Ge solar cell

При эксплуатации СБ в космосе ФЭП, установленные в ее генерирующей части, подвергаются воздействию практически всех факторов космического пространства: радиации, потоков заряженных частиц высокой энергии, твердых частиц естественного и искусственного происхождения, плазмы, электромагнитного излучения Солнца, резких температурных перепадов, а также продуктов работы реактивных двигателей разных типов. Все это может приводить в результате различных деградационных процессов к существенному ухудшению характеристик ФЭП и СБ в целом.

Наиболее значимым из перечисленных факторов, определяющих длительность работы СБ в космосе, является радиация. Воздействие радиационного облучения оказывает влияние на физические параметры ФЭП, определяющие эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую. Так, воздействие радиации приводит к образованию в запрещенной зоне полупроводникового материала ФЭП локальных уровней, обусловленных введенными в результате облучения дефектами, что приводит к снижению времени жизни носителей заряда. Как правило, данный параметр изменяется в несколько раз при таких дозах облучения, для которых изменение других характеристик оказывается пренебрежимо малым [11].

Для каскадных ФЭП возникает дополнительная проблема – различная скорость радиационной деградации фототока в каскадах, что еще более ухудшает согласование токов каскадов и отрицательно сказывается на выходных характеристиках трехкаскадных InGaP / InGaAs / Ge ФЭП (рис. 5).

В работе [12] проведено моделирование радиационного повреждения трехкаскадного ФЭП при воздействии на него электронами с энергией 1 МэВ, так как электроны высоких энергий являются основным повреждающим фактором на геосинхронных орбитах. Авторами работы показано, что вследствие такого воздействия происходит уменьшение диффузионных длин неосновных носителей заряда и снижение фототока и напряжения холостого хода. Проведенный расчет для диапазона доз облучения от нуля до $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (табл. 1) показал, что наибольшей деградации подвержен InGaAs-каскад, особенно его *p*-область: снижение диффузионной длины неосновных носителей заряда оказалось наиболее существенным – с 7 мкм до облучения до 1,31 мкм после облучения.

База *p*-InGaAs трехкаскадного ФЭП является самым толстым генерирующим эпитаксиальным слоем всего прибора, это обусловлено особенностями собирания сгенерированных носителей заряда в слое. Так, до облучения при толщине *p*-InGaAs базы в 4 мкм достигается близкое к 100 % собирание носителей заряда, однако в дальнейшем из-за облучения диффузионная длина неосновных носителей заряда снижается вследствие их рекомбинации на радиационных дефектах, соответственно, снижается и фототок (рис. 5). При этом обнаружено, что максимум фототока достигается при меньшей толщине базы InGaAs-каскада, но снижение толщины InGaAs базовой области увеличивает количество непоглощенных длинноволновых фотонов [12].

Увеличение доли поглощенных длинноволновых фотонов в тонкой базе может быть достигнуто путем применения в структуре ФЭП распределенного брэгговского отражателя (РБО) [12–14], представляющего собой структуру с периодически изменяющимся в пространстве показателем преломления и позволяющего за счет этого создавать разрешенные и запрещенные энергетические зоны для фотонов [15]. Основное предназначение РБО в структуре InGaP / InGaAs / Ge ФЭП – возврат части длинноволнового излучения в фотоактивные слои, в частности, в *p*-InGaAs слой.

Таблица 1

Расчетные значения диффузионных длин неосновных носителей заряда в фотоактивных слоях ФЭП на основе InGaP / InGaAs / Ge [12]

Слой	Диффузионная длина неосновных носителей заряда, мкм		
	До облучения	После облучения	
		Доза облучения $10^{15}, \text{ см}^{-2}$	Доза облучения $3 \cdot 10^{15}, \text{ см}^{-2}$
<i>n</i> -InGaP	–	0,05	–
<i>p</i> -InGaP	2,0	1,76	1,46
<i>n</i> -InGaAs	0,3	0,28	0,25
<i>p</i> -InGaAs	7,0	2,21	1,31
<i>n</i> -Ge	–	0,50	–
<i>p</i> -Ge	50,0	49,10	47,40

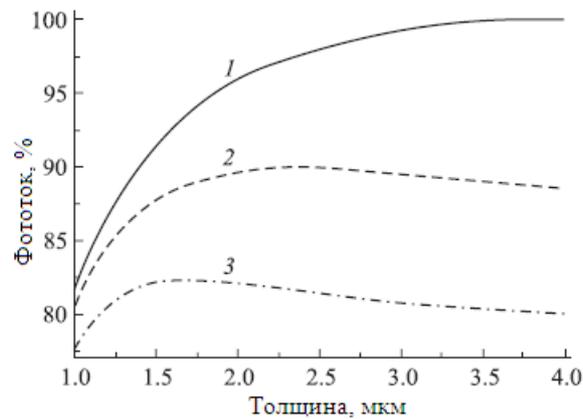


Рис. 5. Относительная доля фототока, генерируемого в InGaAs-каскаде трехкаскадного InGaP / InGaAs / Ge ФЭП без РБО до облучения (1) и после облучения электронами с энергией 1 МэВ дозой 10^{15} см^{-2} (2) и дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (3) [15]

Fig. 5. Relative fraction of the photocurrent generated in the InGaAs junction of a triple junction InGaP / InGaAs / Ge solar cell without Bragg reflector before irradiation (1) and after irradiation with electrons of 1 MeV in a dose of 10^{15} см^{-2} (2) and a dose of $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (3) [15]

На сегодняшний день ведущие мировые производители ФЭП космического назначения разработали и выпускают модификации трехкаскадных InGaP / InGaAs / Ge ФЭП с повышенной радиационной стойкостью. Есть основания полагать, что повышение радиационной стойкости достигнуто благодаря встраиванию РБО в полупроводниковую структуру ФЭП.

Контактная структура ФЭП. Контактная структура ФЭП состоит из токосъемных полосок контактной сетки, главного контакта и токосъемных площадок. Материалами для контактной сетки могут быть лишь металлы, обладающие хорошей адгезией и имеющие низкое сопротивление при протекании тока (высокую электропроводность), такие как Ag, Au, Ni, Ti, Pd, однако невозможно найти металл, обладающий одновременно этими двумя свойствами, поэтому применяется многослойная система контактов. Контактные площадки при этом должны быть приспособлены к последующей коммутации ФЭП при сборке СБ. Геометрические размеры контактной сетки рассчитываются применительно к конкретной конструкции ФЭП (ширина полоски собирающей гребенки 3–10 мкм), они должны обеспечивать минимально возможное затенение фотоактивной площади (для преобразования слабоконцентрированного излучения потери на затенение должны составлять не более 5 %, а для сильноконцентрированного – от 5 до 15 % [16]) и минимально возможное сопротивление при прохождении по этим контактным полоскам тока, собранного с генерирующей полупроводниковой структуры ФЭП [17]. Важным является наличие высоколегированного $n+$ -слоя в конструкции ФЭП для получения минимального переходного сопротивления «металл–полупроводник». Толщина контактов определяется проводимостью контакта металл–полупроводник и площадью соприкосновения. Для создания контактной структуры с рисунком гребенчатой контактной сетки на фотоактивной стороне и с толщинным про-

филем 4–8 мкм применяется «взрывная» фотолитография с последующим нанесением металлического покрытия методом термовакuumного распыления металлов.

Просветляющее (антиотражающее) покрытие ФЭП. Просветляющее (антиотражающее) покрытие (АОП) ФЭП служит для минимизации отражения от поверхности, что позволяет обеспечить более высокий фототок, а следовательно, повысить эффективность прибора. Вообще, первое просветляющее покрытие было разработано Фраунгофером в 1817 г. Однако долгие годы данная технология оставалась в тени [18]. Первый солнечный элемент, представленный в 1954 г., был без АОП. Начиная с 1964 г., для кремниевых ФЭП отечественного производства начали применять АОП на основе ZnS.

В настоящее время для ФЭП применяются одно-, двух- и трехслойные покрытия: чем больше количество слоев, тем на более широком диапазоне спектра можно минимизировать отражение. Однако увеличение количества слоев влечет за собой значительное усложнение технологии. Материалы для АОП подбирают с учетом их физических свойств, таких как показатель преломления, адгезия и химическая стойкость. Таким образом, в зависимости от спектрального диапазона, в котором ФЭП имеет максимальную чувствительность, подбирают необходимое количество слоев АОП и его материалы.

Основными материалами для АОП являются ZnS, TiO_2 и CeO_2 – в качестве материалов с высоким показателем преломления и MgF_2 , Al_2O_3 и SiO_2 – с низким показателем [19]. Согласно последним данным, для трёхкаскадных ФЭП на основе арсенида галлия используются двухслойные АОП из оксидов титана $\text{TiO}_2 / \text{TiO}_x$ и алюминия Al_2O_3 [20], а также оксидов тантала Ta_2O_5 и кремния $\text{SiO}_2 / \text{SiO}_x$ [21], формируемые методом электронно-лучевого испарения в вакууме. Толщины слоев составляют примерно 40–70 нм.

Обзор промышленно выпускаемых трехкаскадных фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе соединений АШВВ. Промышленное (серийное) производство трехкаскадных ФЭП на основе соединений InGaP / InGaAs / Ge, применяемых в фотогенирующей части СБ большинства современных КА, на текущий момент времени осуществляется следующими зарубежными компаниями: SolAero Technologies Corp (США), Spectrolab Inc (США), AZUR SPACE Solar Power GmbH (Германия), CESI SpA (Италия).

В России производство трехкаскадных ФЭП было освоено сравнительно недавно в двух компаниях: АО «НПП «Квант», г. Москва, и ПАО «Сатурн», г. Краснодар, история создания которых связана с ВНИИТ и Научно-производственным объединением «Квант».

Продукция каждого из указанных производителей обладает рядом характерных особенностей технического характера, что, однако, не несет существенного различия в конструкции полупроводниковой фотогенирующей части.

Основные электрические характеристики для различных типов ФЭП каждого из выше представленных производителей сведены в табл. 2, это: $I_{кз}$ – ток короткого замыкания, $\text{мА}/\text{см}^2$; $I(P_{м})_0$ – ток в точке максимальной мощности, $\text{мА}/\text{см}^2$; $I_{нагр}$ – ток в точке оптимальной нагрузки, $\text{мА}/\text{см}^2$; $U_{хх}$ – напряжение холостого хода, В; $U(P_{м})_0$ – напряжение в точке максимальной мощности, В; $U_{нагр}$ – напряжение в точке оптимальной нагрузки, В; FF – фактор заполнения, %; КПД – коэффициент полезного действия, или эффективность преобразования космического солнечного спектра АМ0; $\text{КПД}_{нагр}$ – коэффициент полезного действия при АМ0 в точке оптимальной нагрузки.

Рассмотрим ФЭП наиболее распространенного типоразмера площадью $\sim 30 \text{ см}^2$ (рис. 6). Мультикаскадные ФЭП, производимые американской компанией Spectrolab Inc., входящей в американский концерн Boeing, являющийся одним из крупнейших мировых производителей авиационной, космической и военной техники, представлены следующими типами: Improved Triple Junction Solar Cells (ITJ) – площадью до 31 см^2 , КПД – 26,8 %, со встроенным Si-диодом, внешний вид изображен на рис. 6, а [22]; Ultra Triple Junction Solar Cells (UTJ) и NeXt Triple Junction Solar Cells (XTJ), площадью $26,62 \text{ см}^2$, аналогичные по внешнему виду, показаны на рис. 6, б [22], отличающиеся только значением эффективности: UTJ – 28,3 %, XTJ – 29,5 %.

Американская компания SolAero Technologies Corp выпускает трехкаскадные ФЭП различных модификаций, оптимизированных для различных условий эксплуатации или в различных коммутационных схемах СБ. В частности, разработаны ФЭП для низких орбит (ZTJ- Ω) с КПД 30,2 %, ФЭП с повышенной радиационной стойкостью (ZTJ+) с КПД 29,4 % и др. Все типы ФЭП конструктивно представляют собой InGaP / InGaAs / Ge полупроводниковую конструкцию площадью 26–30 см^2 и внешне не имеют заметных различий, приводятся на рис. 6, в [23]. Также компания SolAero Technologies Corp предлагает ФЭП

со встроенным диодом (ZTJM), КПД 29,0 %, внешний вид которого изображен на рис. 6, г [23].

У немецкой компании Azur Space Solar Power GmbH, также занимающейся серийным изготовлением трехкаскадных ФЭП, ассортимент продукции представлен несколькими типами ФЭП площадью $30,18 \text{ см}^2$. Внешний вид ФЭП с КПД 28 % (3G28C) со встроенным диодом приведен на рис. 6, д [24]; с КПД 30 % (3G30C) со встроенным диодом – на рис. 6, е [24]. ФЭП 3G30C без диода с толщинами 150 и 80 мкм имеют похожий внешний вид, изображенный на рис. 6, ж [24].

Другой европейский производитель – итальянская компания CESI SpA – производит ФЭП типа STJ30 площадью 26–30 см^2 с КПД 29,5 %. Внешний вид ФЭП приведен на рис. 6, з [25].

Одним из российских производителей ФЭП является ПАО «Сатурн», предоставляющее различные конструктивно технологические модификации ФЭП со встроенным диодом со средним значением КПД 28 %. Внешний вид ФЭП производства ПАО «Сатурн» изображен на рис. 6, и [26].

Другим российским производителем трехкаскадных InGaP / InGaAs / Ge ФЭП без встроенного диодного модуля является АО «НПП «Квант». Внешний вид ФЭП, произведенных в АО «НПП «Квант», представлен на рис. 6, к. КПД серийно выпускаемых образцов трехкаскадных ФЭП по данным 2017 г. в среднем составляет 28,4 %. Кроме того, в АО «НПП «Квант» проведены работы по разработке опытной технологии изготовления трехкаскадных ФЭП с улучшенными энергомассовыми характеристиками. Получены экспериментальные образцы со следующими характеристиками: масса ФЭП $\sim 1,65\text{--}1,7 \text{ г}$, толщина $\sim 100 \text{ мкм}$, $J_{кз} \sim 17,5 \text{ мА}/\text{см}^2$, $U_{хх} \sim 2,6 \text{ В}$, КПД $\sim 27,5 \%$ [6]. Применение таких ФЭП дает выигрыш в удельных энергомассовых характеристиках, имеющих особое значение для энергетических систем КА. Однако для обеспечения необходимых механических характеристик при использовании утонченных ФЭП в составе БС требуется применение облегченных жестких каркасов типа сотовых панелей.

В настоящее время производится проработка нового конструкционного решения в части увеличения полезной площади ФГЧ, а именно, в части создания ФЭП с увеличенными габаритными параметрами для использования таких ФЭП в СБ перспективных КА. Использование ФЭП с увеличенной площадью ФГЧ (общая площадь ФЭП $> 50 \text{ см}^2$) в сравнении с ФЭП стандартного размера ($\sim 30 \text{ см}^2$) позволит увеличить долю полезной (рабочей, генирующей) площади СБ (рис. 7). Применение подобных ФЭП будет способствовать уменьшению массы СБ за счет снижения удельной массы коммутационной части, а также увеличению скорости и снижению стоимости сборки за счет сокращения количества сборочных операций. Однако при вариации габаритных размеров ФЭП следует учитывать фактор заполнения ФГЧ СБ. Внешний вид ФЭП модификации XTJ с КПД 29,5 % и внешне аналогичный UTJ с КПД 28,3 %, оба площадью $59,65 \text{ см}^2$, изготовленные в Spectrolab Inc., показаны на рис. 7, а [22]. Также компания SolAero Technolo-

gies Corp предлагает потребителям ФЭП с увеличенной площадью модификации ZTJ, изображенный на рис. 7, б [23]. Дополнительно этим производителем предлагаются ФЭП площадью $\sim 60\text{--}65\text{ см}^2$ типов ZTJ+ и ZTJ-Ω. Компания Azur Space Solar Power GmbH производит ФЭП площадью $60,36\text{ см}^2$ типа 3G30C, внешний вид которого приведен на рис. 7, в [24].

В настоящее время в АО «НПП «Квант» ведутся работы в направлении разработки ФЭП с площадью $> 50\text{ см}^2$.

Также иностранные производители предлагают ФЭП с увеличенной площадью ФГЧ, изготовленные на подложках большего диаметра (стандартный диаметр Ge-подложек, применяемых при эпитаксиальном росте трехкаскадных ФЭП на основе соединений АПБВ, равен 100 мм) (рис. 8). Внешний вид образца XTJ Prime компании Spectrolab Inc. площадью $\sim 70\text{--}80\text{ см}^2$, толщиной 80–225 мкм, с КПД 30,7 % представлен на рис. 8, а [22].

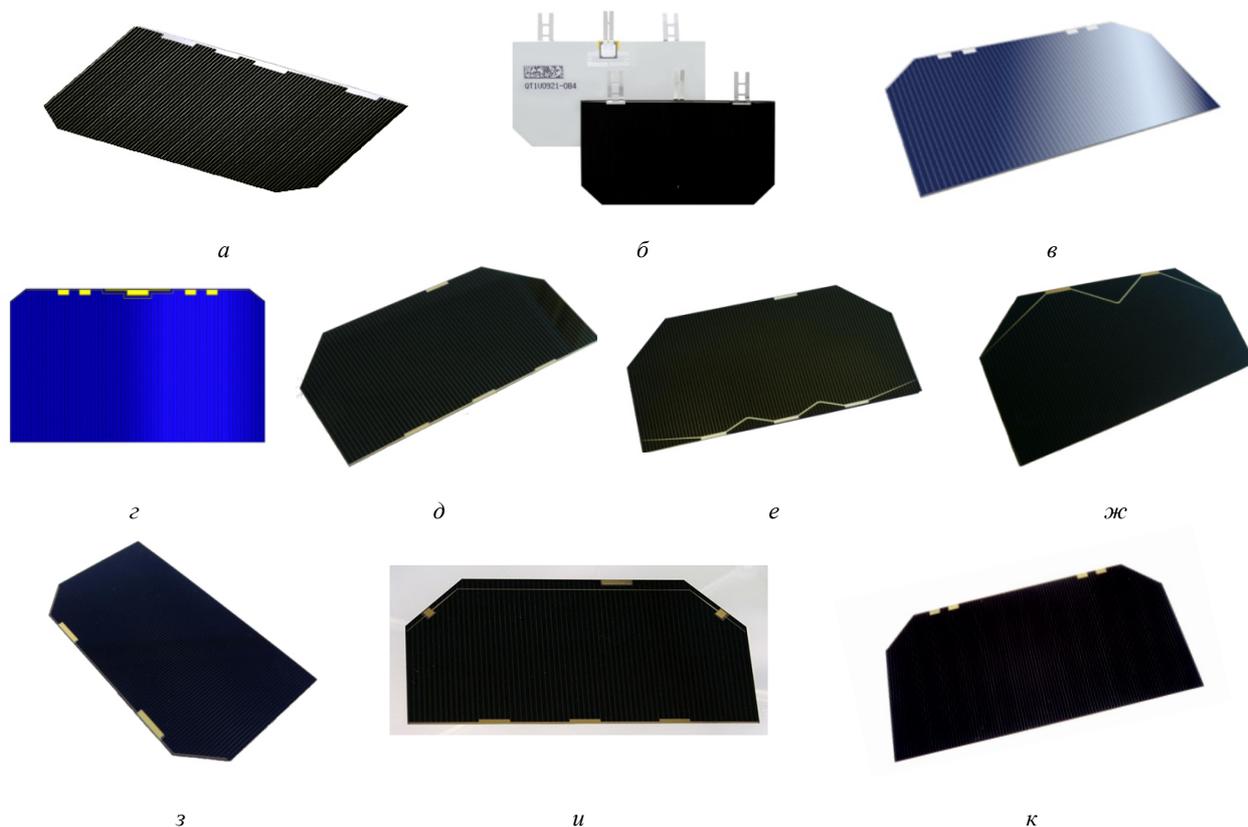


Рис. 6. ФЭП различных производителей типоразмера $\sim 30\text{ см}^2$:
 а, б – Spectrolab Inc.; в, г – SolAero Technologies Corp; д–ж – Azur Space Solar Power GmbH;
 з – Cesi SpA; и – ПАО «Сатурн»; к – АО «НПП «Квант»

Fig. 6. Solar cell different manufacturers area $\sim 30\text{ см}^2$:
 а, б – Spectrolab Inc.; в, г – SolAero Technologies Corp; е–г – Azur Space Solar Power GmbH;
 h – Cesi SpA; i – PJSC "Saturn"; j – JSC "RPE "Kvant"

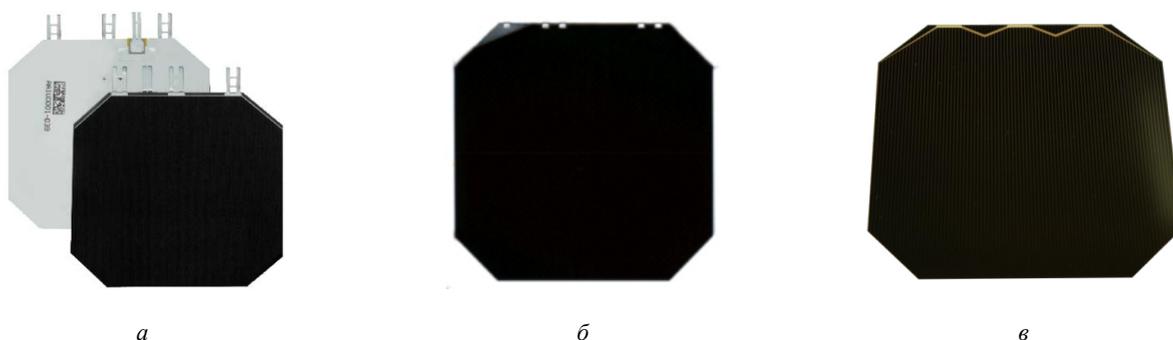


Рис. 7. ФЭП различных производителей с увеличенной площадью ФГЧ $\sim 50\text{ см}^2$:
 а – Spectrolab Inc.; б – SolAero Technologies Corp; в – Azur Space Solar Power GmbH

Fig. 7. Solar cell different manufacturers with increased area $\sim 50\text{ см}^2$:
 а – Spectrolab Inc.; б – SolAero Technologies Corp; в – Azur Space Solar Power GmbH

Таблица 2

Основные характеристики различных типов трехкаскадных ФЭП на основе соединений InGaP / InGaAs / Ge

Наименование	Основные электрические параметры									Радиационная деградация									Доп. информация
	$I_{кз}$, мА/см ²	$I(P_M)_0$, мА/см ²	$I_{нагр}$, мА/см ²	U_{xx} , В	$U(P_M)_0$, В	$U_{нагр}$, В	FF	КПД _{нагр} , %	КПД, %	$1 \cdot 10^{14}$			$5 \cdot 10^{14}$			$1 \cdot 10^{15}$			
										$I(P_M)/I(P_M)_0$	$U(P_M)/U(P_M)_0$	P_M/P_{M0}	$I(P_M)/I(P_M)_0$	$U(P_M)/U(P_M)_0$	P_M/P_{M0}	$I(P_M)/I(P_M)_0$	$U(P_M)/U(P_M)_0$	P_M/P_{M0}	
Spectrolab Inc. (США) [22]																			
ITJ Solar Cells ¹	16,90	16,00	16,10	2,57	2,27	2,23	0,84	26,5	26,8	1,00	0,94	0,94	0,98	0,90	0,88	0,96	0,88	0,84	AMO (135,3 мВт/см ²) 28 °C, Fluence 1MeV Elec- trons/cm ²
UTJ Solar Cells (<32 см ²) ¹	17,05	16,30	16,40	2,66	2,35	2,31	0,85	28,0	28,3	0,99	0,94	0,93	0,98	0,91	0,89	0,96	0,89	0,86	
UTJ Solar Cells (>50 см ²) ²	17,05	16,30	16,40	2,66	2,30	2,27	0,83	27,5	27,6	0,99	0,94	0,93	0,98	0,91	0,89	0,96	0,89	0,86	
XTJ Solar Cells ^{1,2}	17,76	17,02	17,14	2,63	2,35	2,31	0,85	29,3	29,5	1,00	0,94	0,95	0,99	0,91	0,90	0,95	0,89	0,85	
XTJ Prime ³	18,10	17,40	–	2,72	2,39	–	–	–	30,7	–	–	–	0,99	0,89	–	0,97	0,87	–	
SolAero Technologies, Corp.(США) [23]																			
ATJM (ATJ) Space Solar Cell ¹	17,10	16,20	–	2,60	2,30	–	–	–	27,5	1,00	0,96	0,96	0,96	0,92	0,89	0,94	0,90	0,85	AMO (135,3 мВт/см ²) 28 °C Radiation Performance at 1 MeV Electron Irra- diation
BTJ Space Solar Cell ¹	17,10	16,30	–	2,70	2,37	–	–	–	28,5	1,00	0,97	0,97	0,96	0,92	0,89	0,94	0,90	0,85	
ZTJ+Space Solar Cell ^{1,2,3}	17,11	16,65	–	2,69	2,39	–	–	–	29,4	–	–	–	0,99	0,92	0,91	0,97	0,90	0,87	
ZTJ Space Solar Cell ^{1,2,3}	17,40	16,50	–	2,73	2,41	–	–	–	29,5	0,99	0,97	0,96	0,96	0,93	0,90	0,94	0,91	0,85	
ZTJM Space Solar Cell ¹	17,10	16,50	–	2,72	2,38	–	–	–	29,0	0,99	0,97	0,96	0,96	0,93	0,90	0,94	0,91	0,85	
ZTJ-Ω Space Solar Cell ^{1,2,3}	17,41	16,80	–	2,73	2,43	–	–	–	30,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Azur Space Solar Power GmbH (Германия) [24]																			
TJ Solar Cell 3G30C – Advanced Grid system with 2 contact pads ¹	17,24	16,71	16,73	2,70	2,41	2,35	–	–	29,5	–	–	–	0,99	0,95	0,94	0,96	0,93	0,90	AMO (1367 W/m ²) 28 °C Fluence 1MeV Electrons/cm ²
TJ Solar Cell 3G30C – Advanced (large area 120 mm × 60 mm) ³	17,25	16,68	16,75	2,70	2,41	2,35	–	–	29,4	–	–	–	0,99	0,95	0,94	0,97	0,93	0,90	
TJ Solar Cell 3G30C – Advanced (large area 80 mm × 80 mm) ²	17,25	16,68	16,73	2,70	2,41	2,35	–	–	29,4	–	–	–	0,99	0,95	0,94	0,97	0,93	0,90	

Наименование	Основные электрические параметры									Радиационная деградация									Доп. информация
	$I_{кз}$, мА/см ²	$I(P_M)_0$, мА/см ²	$I_{нагр}$, мА/см ²	$U_{кк}$, В	$U(P_M)_0$, В	$U_{нагр}$, В	FF	КПД _{нагр} , %	КПД _с , %	1·10 ¹⁴			5·10 ¹⁴			1·10 ¹⁵			
										$I(P_M)/I(P_M)_0$	$U(P_M)/U(P_M)_0$	P_M'/P_{M0}	$I(P_M)/I(P_M)_0$	$U(P_M)/U(P_M)_0$	P_M'/P_{M0}	$I(P_M)/I(P_M)_0$	$U(P_M)/U(P_M)_0$	P_M'/P_{M0}	
TJ Solar Cell 3G30C – Advanced Grid system with 3 contact pads ¹	17,24	16,71	16,73	2,70	2,41	2,35	–	–	29,8	–	–	–	0,99	0,93	0,94	0,96	0,93	0,90	
TJ Solar Cell 3G28C ¹	16,77	16,14	16,07	2,67	2,37	2,30	–	–	28,0	–	–	–	0,97	0,94	0,91	0,94	0,93	0,87	
Cesi SpA (Италия) [25]																			
СТJ30 (area 26,5 cm ²) ¹	17,85	17,17	–	2,60	2,32	–	–	–	29,5	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,91	0,91	0,93	0,84	AM0 30 °C
СТJ30 (area 30,15 cm ²) ¹	17,84	17,15	–	2,61	2,33	–	–	–	29,5	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,91	0,91	0,93	0,84	AM0 30 °C
ПАО «Сатурн» (Российская Федерация) [26]																			
ФЭП ¹	16,80	16,10	–	2,67	2,37	–	–	–	28,0	–	–	–	0,95	0,94	0,92	0,94	0,93	0,88	AM0 (1366 Вт/м ²) 28 °C
АО «НПП «Квант» (Российская Федерация)																			
ФЭП (по данным 2017 г.) ¹	17,36	16,45	17,03	2,70	2,35	1,90	0,83	–	28,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	AM0 (1366 Вт/м ²) 25 °C

Примечания:

¹ – ФЭП наиболее распространенного типоразмера площадью ~ 30 см²;

² – ФЭП с увеличенными габаритными параметрами площадью ~ 50–60 см²;

³ – ФЭП с увеличенными габаритными параметрами на подложках большего диаметра ~ 70–80 см².

SolAero Corp Technologies предлагает ФЭП типа ZTJ, показанный на рис. 8, б [23]. Также SolAero Corp Technologies предлагает ФЭП увеличенной площади ($\sim 70\text{--}80\text{ см}^2$), изготовленные на подложках диаметром более 100 мм с полупроводниковыми эпитаксиальными структурами типов ZTJ+ и ZTJ-Ω.

Компания Azur Space Solar Power GmbH выпускает ФЭП площадью $68,76\text{ см}^2$ толщиной 230 мкм из эпитаксиальных структур типа 3G30C. Внешний вид такого ФЭП показан на рис. 8, в [24].

Фотоэлектрические преобразователи на основе соединений АШВВ для преобразования концентрированного излучения. Несмотря на свою высокую стоимость, каскадные ФЭП нашли применение в наземных условиях в установках преобразования концентрированного солнечного излучения благодаря эффекту кратного увеличения тока генерации с ростом плотности излучения, что позволяет использовать ФЭП значительно меньшего размера [16].

Применение ФЭП для концентрированного излучения (КФЭП) представляется возможным для энергоснабжения КА в дальнем космосе, где ослаблено солнечное излучение, а также для мощных энергетических установок планетарных станций, при решении целого ряда инженерных задач, таких как разработка и создание конструкций для точного ориентирования

оптической системы, а также конструкций для оптической системы и системы теплообмена.

Серийным выпуском КФЭП занимаются SolAero Technologies Corp (США), Spectrolab Inc (США), AZUR SPACE Solar Power GmbH (Германия), CESI SpA (Италия). Основные электрические параметры различных типов InGaP / InGaAs / Ge КФЭП, выпускаемых указанными изготовителями, приведены в табл. 3.

На рис. 9 проиллюстрирован внешний вид трехкаскадных InGaP / InGaAs / Ge КФЭП, перечисленных в табл. 3.

В АО «НПП «Квант» направление изготовления КФЭП на основе соединений АШВВ находится в стадии разработки. Создана опытная технология изготовления КФЭП и получены экспериментальные образцы с габаритными параметрами $0,65 \times 0,57\text{ см}$ и $0,99 \times 1,07\text{ см}$. Эффективность преобразования солнечного излучения при концентрациях 50 солнц составляет 33–37 % (0 °С, АМ0), а в температурном диапазоне от -190 °С до -50 °С достигает 38 %.

Несколько особняком находится направление по разработке приборов для преобразования монохроматического (лазерного) излучения. В работах [27; 28] рассматриваются перспективы использования таких преобразователей для беспроводной передачи энергии, в том числе и в космическом пространстве.

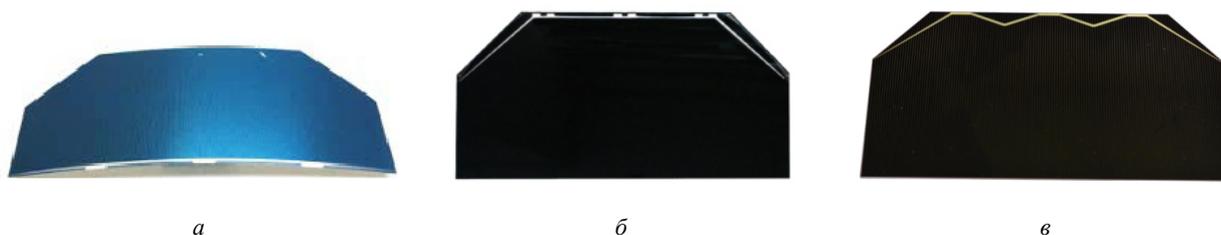


Рис 8. ФЭП различных производителей с увеличенными габаритными размерами на подложках большего диаметра: а – Spectrolab Inc.; б – SolAero Technologies Corp; в – Azur Space Solar Power GmbH

Fig. 8. Solar cell different manufacturers with increased area fabricated on substrates of larger diameter: а – Spectrolab Inc.; б – SolAero Technologies Corp; в – Azur Space Solar Power GmbH

Таблица 3

Основные характеристики различных типов КФЭП на основе соединений InGaP / InGaAs / Ge

Наименование	$J_{кз}$, А/см ² ($I_{кз}$, А)	$U_{хх}$, В	$J(P_m)_0$, А/см ² ($I(P_m)_0$, А)	$U(P_m)_0$, В	КПД($P_m)_0$, %	КПД, %	FF , %	Размеры, мм	Мощность излучения, Вт/см ² (спектр)
Spectrolab Inc, (США) [22]									
CPV Dense Array Solar Cells	6,950	3,170	6,760	2,940	38,8		87,1	14,19×9,90	50 (ASTM G173-03 spectrum)
CPV Small Aperture Point Focus Solar Cell	6,950	3,170	6,760	2,940	38,8		87,1	31,5×31,5 ($\varnothing = 30$); 14,4×14,4 ($\varnothing = 13$)	
CPV Point Focus Solar Cells	7,190	3,210	6,830	2,870	39,2			10×9,9; 9,299×9,299; 8,854×8,640; 5,547×5,542	50 (ASTM G173-03 slow AOD spectrum)
C3P5 Improved CPV Technology					39,5			5,977×5,591	

Наименование	$J_{кз}$, А/см ² ($I_{кз}$, А)	$U_{кк}$, В	$J(P_M)_0$, А/см ² ($I(P_M)_0$, А)	$U(P_M)_0$, В	КПД($P_M)_0$, %	КПД, %	FF , %	Размеры, мм	Мощность излучения, Вт/см ² (спектр)
CPV Point Focus Solar Cells	7,533	3,125	7,249	2,762	40,0		85,1	10,0×9,9; 9,299×9,299; 8,854×8,640; 5,547×5,542	50 (ASTM G173- Di- rect Low- AOD Spec- trum)
SolAero Technologies, Corp. (США) [23]									
CTJ Photovoltaic Cell	6,480	3,190	6,34	2,760	39,6			10,680×10,075	50
Azur Space Solar Power GmbH (Германия) [24]									
Concentrator Triple Junction Solar Cell 3C42 (MC/Air ×250)	(0,36)	3,020	(0,35)	2,800		42,8	90,1	3×3	(ASTM G173-03)
	(1,16)	3,070	(1,14)	2,820		42,0	90,1	5,5×5,5	
	(3,79)	3,070	(3,71)	2,800		41,4	89,4	10×10	
Concentrator Triple Junction Solar Cell 3C44 (MC/Air ×250)	(0,37)	3,050	(0,36)	2,800		44,0	89,4	3×3	(ASTM G173-03)
	(1,19)	3,080	(1,17)	2,800		42,9	89,5	5,5×5,5	
	(3,85)	3,060	(3,77)	2,800		42,1	89,9	10×10	
Cesi SpA (Италия) [25]									
Triple-Junction Solar Cell for Terrestrial Applications (CCTJ40)	7,400	3,100				39,1	86,0	10,92×10,06	(AM1,5D, LOW AOD, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)

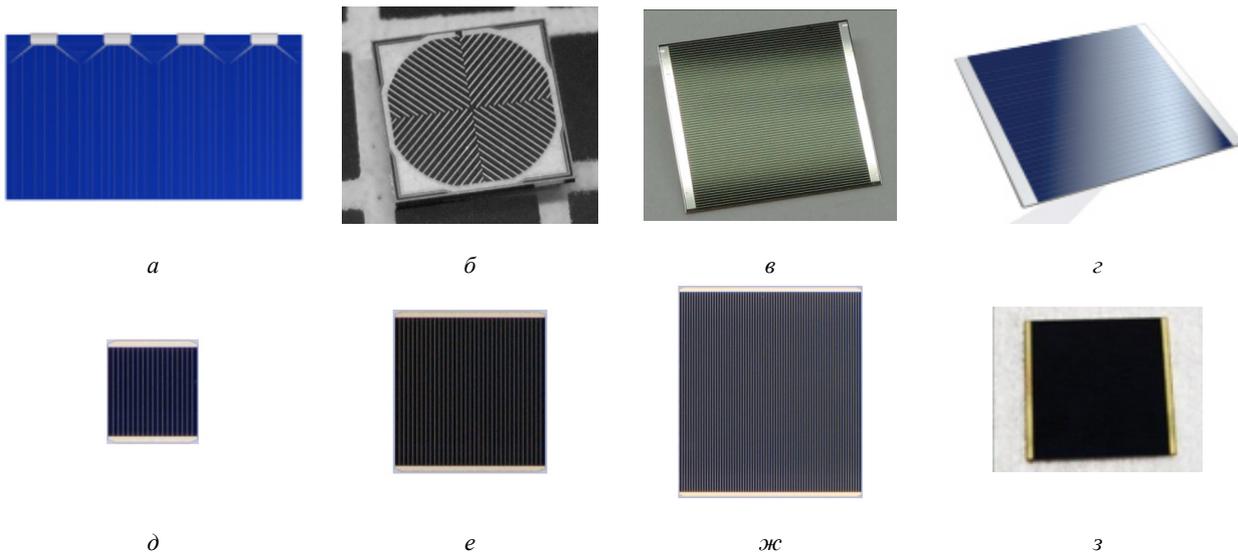


Рис. 9. Внешний вид различных типов InGaP / InGaAs / Ge КФЭП [22–25]:
a – CPV Dense Array Solar Cells (Spectrolab Inc. (США)); *б* – CPV Small Aperture Point Focus Solar Cell (Spectrolab Inc. (США));
в – CPV Point Focus Solar Cells, C3P5 Improved CPV Technology, CPV Point Focus Solar Cells (Spectrolab Inc. (США));
г – CTJ Photovoltaic (SolAero Technologies, Corp. (США)); *д* – Concentrator Triple Junction Solar Cell 3C42 и Concentrator Triple
 Junction Solar Cell 3C44 с размерами 3 × 3 мм (AZUR SPACE Solar Power GmbH (Германия)); *е* – Concentrator Triple Junction
 Solar Cell 3C42 и Concentrator Triple Junction Solar Cell 3C44 с размерами 5,5 × 5,5 мм (AZUR SPACE Solar Power GmbH
 (Германия)); *ж* – Concentrator Triple Junction Solar Cell 3C42 и Concentrator Triple Junction Solar Cell 3C44
 с размерами 10 × 10 мм (AZUR SPACE Solar Power GmbH (Германия)); *з* – Triple-Junction Solar Cell
 for Terrestrial Applications (CCTJ40) (Cesi SpA (Италия))

Fig. 9. Appearance of different types of InGaP / InGaAs / Ge solar cell for concentrated radiation [22–25]:
a – CPV Dense Array Solar Cells (Spectrolab Inc. (USA)); *b* – CPV Small Aperture Point Focus Solar Cell (Spectrolab Inc. (USA));
c – CPV Point Focus Solar Cells, C3P5 Improved CPV Technology, CPV Point Focus Solar Cells (Spectrolab Inc. (USA));
d – CTJ Photovoltaic (SolAero Technologies, Corp.(USA)); *e* – Concentrator Triple Junction Solar Cell 3C42 and Concentrator Triple
 Junction Solar Cell 3C44 with dimensions 3 × 3 mm (AZUR SPACE Solar Power GmbH (Germany)); *f* – Concentrator Triple Junction
 Solar Cell 3C42 and Concentrator Triple Junction Solar Cell 3C44 with dimensions 5,5 × 5,5 mm (AZUR SPACE Solar Power GmbH
 (Germany)); *g* – Concentrator Triple Junction Solar Cell 3C42 and Concentrator Triple Junction Solar Cell 3C44
 with dimensions 10 × 10 mm (AZUR SPACE Solar Power GmbH (Germany)); *h* – Triple-Junction Solar Cell
 for Terrestrial Applications (CCTJ40) (Cesi SpA (Italy))

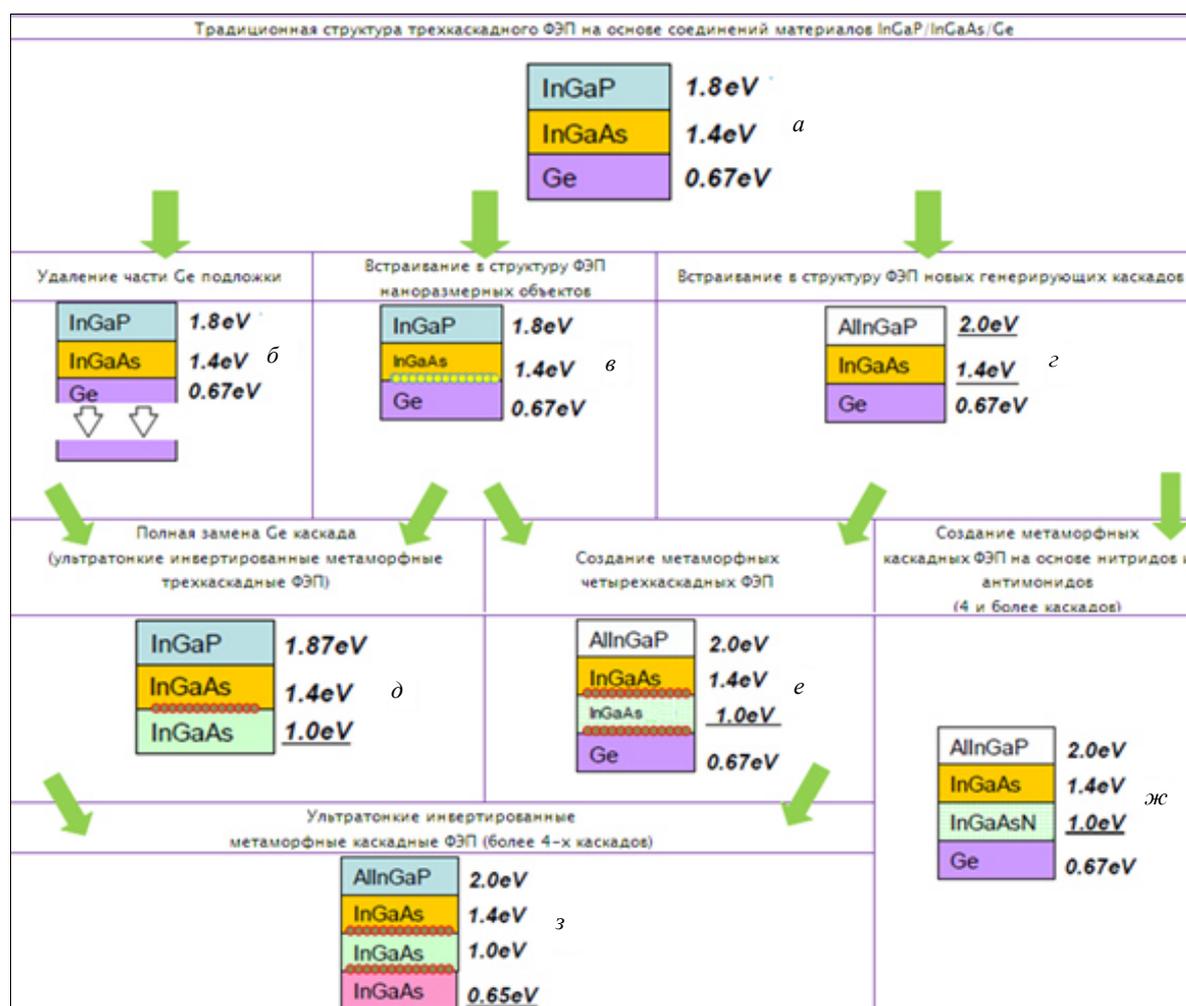


Рис. 10. Направления улучшения энергетических и энергомассовых характеристик InGaP / InGaAs / Ge ФЭП [29–31]: *a* – традиционная структура трехкаскадного ФЭП на основе соединений материалов InGaP / InGaAs / Ge; *b* – удаление части Ge-подложки; *c* – встраивание в структуру ФЭП наноразмерных объектов; *d* – встраивание в структуру ФЭП новых генерирующих каскадов; *e* – полная замена Ge-каскада (ультратонкие инвертированные метаморфные трехкаскадные ФЭП); *f* – создание метаморфных четырехкаскадных ФЭП; *g* – создание метаморфных каскадных ФЭП на основе нитридов и антимоноидов (4 и более каскадов); *h* – ультратонкие инвертированные метаморфные каскадные ФЭП (более 4-х каскадов)

Fig. 10. Directions for improving the energy and energy-mass features of the InGaP / InGaAs / Ge solar cells [29–31]: *a* – traditional structure of a triple junction solar cell based on InGaP / InGaAs / Ge materials; *b* – removal of a part of the Ge-substrate; *c* – integration of nanoscale objects into the solar cell structure; *d* – integration of new generating junctions into the solar cell structure; *e* – complete replacement of Ge junction (ultrathin inverted metamorphic triple junction solar cell); *f* – creation of metamorphic four junction solar cell; *g* – creation of metamorphic multijunction solar cells based on nitrides and antimonides (four or more junctions); *h* – ultrathin inverted metamorphic multijunctions solar cells (four or more junctions)

Такие элементы предназначены для работы с потоками излучения высокой плотности и в связи с этим имеют схожие конструктивные особенности с КФЭП. Основные отличия этих ФЭП связаны с оптимизацией АОП и генерирующей структуры ФЭП для работы в узком спектральном диапазоне.

Направления улучшения характеристик полупроводниковой структуры ФЭП на основе соединений АПВВ. До некоторого времени считалось, что существует два направления улучшения характеристик ФЭП на основе соединений АПВВ. Первым направлением является оптимизация находящейся в стадии практической эксплуатации структуры InGaP / InGaAs / Ge ФЭП за счет достижения более высокой равномерности по составу, уровню легиро-

вания и толщине, а также согласования слоев применительно ко всей площади прибора. К этому направлению относятся и работы по улучшению энергомассовых характеристик [6] за счет снижения толщины не участвующей в генерации части германиевой подложки. Второе направление заключается в модификации структуры с помощью встраивания различных наноразмерных и наноструктурных элементов – РБО, квантовых точек, квантовых ям, с постепенным переходом к структурам с большим количеством каскадов, оптимизированным по спектральной чувствительности. Однако первое направление на настоящий момент в большей степени реализовано, и, наблюдая за общей активностью в данной области, следует говорить о смещении приоритетов в сторону

реализации модификации структуры InGaP / InGaAs / Ge ФЭП.

В общем виде идеология возможных модификаций полупроводниковой структуры современных каскадных ФЭП для повышения их энергетических и энергомассовых характеристик приведена на рис. 10, где схематично проиллюстрированы основные изменения конструкций и технологий изготовления модифицированных ФЭП, предложенные различными научными группами в работах [29–32].

Долгое время успехи и достижения в области того или иного уровня модификаций (из представленных на рис. 10) носили характер единичных лабораторных образцов, и не имелось каких-либо подтверждений промышленного производства ФЭП данных типов. Тем не менее, предложенная недавно новая технология эпитаксиального роста слоев со значительно отличающимися параметрами решетки с помощью переходных слоев, называемых метаморфными, позволила расширить набор полупроводниковых соединений, которые могут быть использованы в модифицированных ФЭП. Технологии роста метаморфных структур и инвертированных метаморфных структур позволят создавать трехкаскадные сверхтонкие ФЭП, а также ФЭП с четырьмя и более каскадами. Ожидается, что реализация этих направлений позволит достичь качественного скачка в повышении эффективности преобразования солнечной энергии, сравнимого с таковым при переходе к каскадным структурам (см. рис. 1).

Заключение. Приведенные данные показывают, что за сравнительно небольшой промежуток времени (с начала 50-х г. XX в.) развитие научных знаний о физике полупроводников и полупроводниковых приборов, физике космоса, материаловедении и эволюция технологий позволили сделать значительный шаг по совершенствованию ФЭП космического назначения и добиться высоких значений основных критических свойств этих приборов, таких как эффективность преобразования, диапазон рабочих температур, радиационная стойкость и срок активного существования. Во многом это было связано с переходом от кремния в качестве основного материала генерирующей полупроводниковой структуры к арсениду галлия и последующему развитию в направлении применения каскадных гетероструктур на основе соединений АПВВ.

Так, достигнутый в массовом производстве уровень параметров ФЭП на основе ставшей традиционной гетероструктуры InGaP / InGaAs / Ge большинства мировых производителей составляет для солнечного спектра АМ0 КПД от 26 до 30 %, ток короткого замыкания в среднем – 17 мА/см² для ФЭП площадью ~ 30 см², а для ФЭП с увеличенными габаритными размерами – до 18 мА/см², при этом значение напряжения не превышает 2,7 В. Срок активного существования для таких ФЭП на большинстве используемых орбит – 15 лет.

Вместе с тем работы по достижению высоких характеристик и совершенствованию структуры ФЭП (преимущественно полупроводниковой) привели к значительному усложнению технологии их изготовления, что в настоящий момент несколько сдерживает

дальнейший качественный рост параметров ФЭП. Ведутся работы по другим направлениям, например, по увеличению фотоактивной площади, что стало возможным благодаря достижению высокой однородности на всей площади слоев эпитаксиальной структуры. Это сокращает количество необходимых коммутаций и сборочных процессов при изготовлении СБ. Также перспективны работы по сокращению толщины не используемой в генерации части подложки. Результаты этих работ дают выигрыш в удельных энергомассовых характеристиках, имеющих особое значение для энергетических систем КА. Однако наибольший выигрыш в весовых характеристиках солнечной космической батареи, а также обеспечение необходимых механических свойств при использовании утоненных ФЭП может быть достигнуто только при применении сотовых каркасов.

Другим специфическим направлением, требующим проведения значительных работ по оптимизации всей конструкции ФЭП (АОП, габаритных размеров и контактной структуры), а также проработки соответствующей части СБ является создание ФЭП для преобразования концентрированного излучения. Их применение в космосе во многом ограничивается необходимостью создания системы концентрирования и эффективной системы теплоотвода, что в условиях космического пространства проблематично и ведет к значительному приросту массы энергосистемы КА. Тем не менее, эти системы стоит рассматривать как перспективу для мощных энергоустановок (например, планетарных станций) и аппаратов дальнего космоса.

Библиографические ссылки

1. «Квант»: энергия победы. Документально-публицистическое издание. М. : МАКД, 2009. 183 с.
2. Лебедев А. А., Слыщенко Е. В. История создания систем энергообеспечения изделий ракетно-космической техники // Инновационный арсенал молодежи : Тр. VI науч.-техн. конф. (27–29 мая 2015, г. Санкт-Петербург) / гл. ред. А. П. Ковалев ; ФГУП «КБ «Арсенал» ; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2015. С. 365–368.
3. Слыщенко Е. В., Лебедев А. А., Вагапова Н. Т. Современное состояние солнечных элементов космического назначения на основе соединений АЗВ5 // Тезисы докладов XX науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ОАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва» (10–14 нояб. 2014, г. Королёв) / ОАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва». Королёв, 2014. С. 466–467.
4. Н. С. Лидоренко – Главный конструктор космических энергосистем [Электронный ресурс] // информационный сайт Академии исследований пространства. URL: <http://www.lidorenko.ru/ns009.htm> (дата обращения: 10.02.2015).
5. Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38, вып. 8. С. 937–948.
6. Улучшение энергомассовых характеристик гетеропереходных трехкаскадных фотопреобразовате-

- лей космического назначения / М. Б. Каган [и др.] // Электронные и электромеханические системы и устройства : сб. науч. тр. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 411–416.
7. Наумова А. А. Определение параметра решетки тонких монокристаллических эпитаксиальных слоев $A_xB_{1-x}C$ на Ge-подложке. М. : ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС» : ИНМиН, 2016. 103 с.
8. Интернет-база данных Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук [Электронный ресурс]. URL: <http://www.matprop.ru> (дата обращения: 13.09.2017).
9. Пат. 2382439 Российская Федерация, МПК⁵¹ H 01 L 31/0304. Каскадный фотопреобразователь и способ его изготовления / Андреев В. М., Калужный Н. А., Лантратов В. М. и др. ; заявл. 05.06.2008 ; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5. 35 с.
10. Система контроля параметров эпитаксиального роста полупроводниковых наногетероструктур солнечных элементов космического назначения / А. А. Лебедев [и др.] // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. 2013. № 31. С. 15–24.
11. Модель космоса : науч.-информ. изд. В 2 т. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. М. : КДУ, 2007. 1144 с.
12. Многопереходные солнечные элементы с брэгговскими отражателями на основе структур GaInP / GaInAs / Ge / В. М. Емельянов [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44, вып. 12. С. 1649–1654.
13. Скачков А. Ф. Перспективы применения распределенного брэгговского отражателя $Al_{10}Ga_{90}As$ / $Al_{80}Ga_{20}As$ в структуре многопереходного солнечного элемента // Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике : сб. материалов молодежной конференции (июнь 2013, г. Королев, Московская область) / под общ. ред. А. Н. Белоусова, Б. И. Крючкова, О. С. Гордиенко и др. ; ИПК «Машприбор». Королёв, 2013. С. 168–171.
14. Лебедев А. А., Цынкин С. А., Леднев А. М. Модуль расчёта структуры распределённого брэгговского отражателя системы сопровождения технологии изготовления солнечных элементов на основе соединений A_3B_5 // Тезисы докладов XXI науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва» (30 окт. – 3 нояб. 2017, г. Королев) : в 2 т. / ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва». Королев, 2017. С. 114–115.
15. Резонансное отражение света периодической системой экситонов в квантовых ямах GaAs / AlGaAs / В. В. Чалдышев [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, вып. 8. С. 1039–1042.
16. Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л. : Наука, 1989. 310 с.
17. Наумова А. А., Вагапова Н. Т., Лебедев А. А. Построение модели и проведение расчета омических и оптических потерь в современных солнечных элементах на основе гетероструктур InGaP / InGaAs / Ge // Тезисы докладов XXI науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва» (30 окт. – 3 нояб. 2017, г. Королев) : в 2 т. / ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва». Королев, 2017. С. 130–131.
18. Macleod A. Thin-film optical filters. 2nd ed. Bristol : Adam Hilger Ltd, 1986.
19. Design and fabrication of multi-layer antireflection coating for III-V solar cell / S. Jung [et al.] // Current Applied Physics. 2011. Vol. 11. P. 538–541.
20. Emcore Photovoltaics / М. А. Stan [at al.] // Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (May 11–18, 2003 Osaka, Japan) / Arisumi Printing Inc. Osaka, 2003. Vol. C.
21. Генали М. А., Лебедев А. А., Вагапова Н. Т. Исследование просветляющего покрытия Ta_2O_5 / SiO_2 , повышающего эффективность трехкаскадных солнечных элементов космического назначения // Тезисы докладов XXI науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва» (30 окт. – 3 нояб. 2017, г. Королев) : в 2 т. / ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва». Королев, 2017. С. 83–84.
22. Официальный сайт Spectrolab Inc. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spectrolab.com/solarcells.htm> (дата обращения: 10.11.2017).
23. Официальный сайт SolAero Technologies [Электронный ресурс]. URL: <https://solaerotech.com/products/space-solar-cells-coverglass-interconnected-cells-cic/> (дата обращения: 10.11.2017).
24. Официальный сайт AZUR SPACE Solar Power GmbH [Электронный ресурс]. URL: <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/product-s-space/space-solar-cells> (дата обращения: 13.11.2017).
25. Официальный сайт CESI S.p.A [Электронный ресурс]. URL: https://www.cesi.it/services/solar_cells/Pages/Solar-cells-for-space-applications.aspx (дата обращения: 13.11.2017).
26. Официальный сайт ПАО «Сатурн» [Электронный ресурс]. URL: <http://saturn-kuban.ru/produksiya/solnechnye-batarei/fotoelektricheskie-preobrazovateli/> (дата обращения: 13.11.2017).
27. Exploration of ISS transport vehicles solar arrays usage as receivers of infrared laser radiation / O. Zayats [et al.] // Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Hamburg, 2011. P. 774–777.
28. Экспериментальное исследование возможности использования кремниевых и арсенид-галлиевых солнечных батарей космических аппаратов для приема энергии лазерного ИК-излучения / В. А. Богушевская [и др.] // Известия РАН. Энергетика. 2012. № 2. С. 10–17.
29. Solar cell generations over 40 % efficiency / R. R. King [et al.] // Prog. Photovolt : Res. Appl. 2012. Vol. 20. P. 801–815.
30. Jain N. Heterogeneous integration of III-V multi-junction solar cells on Si substrate: cell design & modeling, epitaxial growth & fabrication: Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy In Electrical Engineering. Blacksburg, VA, 2015. 180 p.

31. Status of four-junction cell development at fraunhofer ISE / D. Lackner [et al.] // E3S Web of Conferences 16. 2017. Vol. 16. P. 1–6.

32. Takamoto T. Status of Multijunction Solar Cells and Future Development // CS MANTECH Conference. Tampa, Florida, 2009. P. 1–4.

References

1. “Kvant”: *energiya pobedy*. [“Kvant”: the energy of victory]. Moscow, MAKD Publ., 2009. 183 p.

2. Lebedev A. A., Slyshchenko E. V. [History of the creation of power supply systems for missile and space equipment]. *Innovatsionnyy arsenal molodezhi: trudy VI molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Innovative arsenal of youth: works of VI youth scientific and technical conference]. St. Petersburg, 2015, P. 365–368 (In Russ.).

3. Slyshhenko E. V., Lebedev A. A., Vagapova N. T. [The current state of solar cells of space appointment on the basis of the materials A3B5]. *Tezisy dokladov XX Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov OAO “RKK “Energiya” im. S. P. Koroleva”* [Theses of reports of the XX Scientific and technical conference of young scientists and specialists JSC RSC Energia of S. P. Korolyov] Korolyov, 2014, P. 466–467 (In Russ.).

4. *Informatsionnyy sayt Akademii Issledovaniy Prostranstva. N. S. Lidorenko. Glavnyy konstruktor kosmicheskikh energosistem* [Information site of the Academy of Space Research. N. S. Lidorenko. Chief Designer of Space Power Systems] (In Russ). Available at: <http://www.lidorenko.ru/ns009.htm> (accessed 10.02.2015).

5. Alferov Zh. I., Andreev V. M., Rumyantsev V. D. [Trends and prospects for the development of solar photovoltaics]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2004, Vol. 38, Iss. 8, P. 937–948 (In Russ.).

6. Kagan M. B., Zhalnin B. V., Vagapova N. T. et al. [Improving the energy-mass characteristics of heterojunction three-stage solar cells for space purposes]. *Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva: sbornik nauchnykh trudov*. 2016, P. 411–416 (In Russ.).

7. Naumova A. A. *Opredelenie parametra reshetki tonkikh monokrystallicheskikh epitaksial'nykh sloev $A_xB_{1-x}C$ na Ge podlozhe* [Determination of the lattice parameter of thin single-crystal epitaxial layers of $A_xB_{1-x}C$ on a Ge substrate], Moscow, MISiS, INMiN Publ., 2016, 103 p. (In Russ.).

8. *Internet baza dannykh Fiziko-tekhnicheskogo instituta im. A. F. Ioffe Rossiyskoy akademii nauk* [Internet database of the Physico-Technical Institute. A.F. Ioffe Russian Academy of Sciences]. Available at: <http://www.matprop.ru> (accessed 13.09.2017).

9. Andreev V. M., Kalyuzhnyy N. A., Lantratov V. M. et al. *Kaskadnyy fotopreobrazovatel' i sposob ego izgotovleniya* [Cascade solar cell and method of its production]. Patent RF, No 2382439, 2010.

10. Lebedev A. A., Tsynikin S. A., Lednev A. M. et al. [System for monitoring the parameters of epitaxial growth of semiconductor nanoheterostructures of solar cells for space applications]. *Avtonomnaya energetika: tekhnicheskiiy progress i ekonomika*. 2013, Vol. 31, P. 15–24 (In Russ.).

11. *Model' kosmosa: Nauchno-informatsionnoe izdanie: V 2 t. / Pod redaktsiyey M. I. Panasyuka, L. S. Novikova. T. 2: Vozdeystvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov*. [Space model: Scientific and information edition: in 2 vol. Under M. I. Panasyuk, L. S. Novikov's edition. Vol. 2: Impact of the space environment on materials and equipment of spacecrafts]. Moscow, KDU Publ., 2007, 1144 p.

12. Emel'yanov V. M., Kalyuzhnyy N. A., Mintairov S. A. et al. [Multi-transitional solar cells with Bragg reflectors based on GaInP/GaInAs/Ge structures]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2010, Vol. 44, Iss.12, P. 1649–1654 (In Russ.).

13. Skachkov A. F. [Prospects for the application of the distributed Bragg reflector Al₁₀Ga₉₀As/Al₈₀Ga₂₀As in the structure of a multi solar cell]. *Sbornik materialov molodezhnoy konferentsii “Novye materialy i tekhnologii v raketno-kosmicheskoy i aviatsionnoy tekhnike”* [Collection of materials of the youth conference “New Materials and Technologies in Rocket-Space and Aviation Engineering”]. Korolev, 2013, P. 168–171 (In Russ.).

14. Lebedev A. A., Tsynikin S. A., Lednev A. M. [Module for calculating the structure of a distributed Bragg reflector of the support system for manufacturing solar cells based on A3B5 connections]. *Tezisy dokladov XXI Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov PAO “RKK “Energiya” im. S. P. Koroleva” v 2 t.* [Theses of the reports of the XXI Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists PJSC “RSC Energia” them. S. P. Korolev” in 2 vol.]. Korolev, 2017, P. 114–115 (In Russ.).

15. Chaldyshev V. V., Kundelev E. V., Nikitina E. V. et al. [Resonant reflection of light by a periodic system of excitons in GaAs/AlGaAs quantum wells]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2012, Vol. 46, P. 1039–1042 (In Russ.).

16. Andreev V. M., Grilikhes V. A., Rumyantsev V. D. *Fotoelektricheskoe preobrazovanie kontsentrirrovannogo solnechnogo izlucheniya* [Photoelectric conversion of concentrated solar radiation]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1989, 310 p.

17. Naumova A. A., Vagapova N. T., Lebedev A. A. [Modeling and calculation of ohmic and optical losses in modern solar cells based on InGaP/InGaAs/Ge heterostructures]. *Tezisy dokladov XXI Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov PAO “RKK “Energiya” im. S. P. Koroleva” v 2 t.* [Theses of the reports of the XXI Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists PJSC “RSC Energia” them. S. P. Korolev” in 2 vol.]. Korolev, 2017, P. 130–131 (In Russ.).

18. Macleod A. *Thin-film optical filters*, 2nd ed. Bristol : Adam Hilger Ltd, 1986.

19. Jung S., Kim Y., Kim S. et al. Design and fabrication of multi-layer antireflection coating for III-V solar cell. *Current Applied Physics*. 2011, Vol. 11, P. 538–541.

20. Mark A. Stan, Daniel Aiken, Paul R. Sharps at al. *Emcore Photovoltaics Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. Vol. C, Osaka, Japan, 2003.

21. Genali M. A., Lebedev A. A., Vagapova N. T. [Investigation of the Ta₂O₅ / SiO₂ antireflection coating,

which improves the efficiency of three-stage solar cells for space applications]. *Tezisy докладov XXI Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov PAO "RKK "Energiya" im. S. P. Koroleva v 2 t.* [Theses of the reports of the XXI Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists PJSC "RSC Energia" them. S. P. Korolev" in 2 vol.]. Korolev, 2017, P. 83–84 (In Russ.).

22. Official site Spectrolab Inc. Available at: <http://www.spectrolab.com/index.htm> (accessed 10.11.2017).

23. Official site SolAero Technologies. Available at: <https://solaerotech.com> (accessed 10.11.2017).

24. Official site AZUR SPACE Solar Power GmbH. Available at: <http://www.azurspace.com> (accessed 13.11.2017).

25. Official site CESI S.p.A. Available at: <http://www.cesi.it/Pages/default.aspx> (accessed 13.11.2017).

26. Official site PJSC «Saturn» (In Russ). Available at: <http://saturn-kuban.ru> (accessed 13.11.2017).

27. Zayats O., Matsak I., Tugaenko V. et al. Exploration of ISS Transport Vehicles Solar Arrays Usage as Receivers of Infrared Laser Radiation. *Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Hamburg, 2011, P. 774–777.

28. Bogushevskaya V. A., Zhalnin B. V., Zayats O. V. et al. [Experimental study of the possibility of using silicon and arsenide of gallium solar cells of spacecraft for receiving laser IR radiation]. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2012, Vol. 2, P. 10–17 (In Russ.).

29. King R. R., Bhusari D., Larrabee D. et al. Solar cell generations over 40% efficiency. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2012, Vol. 20, P. 801–815.

30. Jain N. Heterogeneous integration of III-V multi-junction solar cells on Si substrate: cell design & modeling, epitaxial growth & fabrication: *Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy In Electrical Engineering*, Blacksburg, VA, 2015, 180 p.

31. Lackner D., Höhn O., Walker A. W. et al. Status of four-junction cell development at fraunhofer ISE. *E3S Web of Conferences 16*. 2017, Vol. 16, P. 1–6.

32. Takamoto T. Status of Multijunction Solar Cells and Future Development. *CS MANTECH Conference*. Tampa, Florida. 2009, P. 1–4.

© Слыщенко Е. В., Наумова А. А., Лебедев А. А., Генали М. А., Вагапова Н. Т., Жалнин Б. В., 2018