



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-4-271-280

УДК 621.31

Научная статья

## Каскадные солнечные батареи космического и наземного применения

В.М. Андреев

Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
Российская Федерация, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

### История статьи:

Поступила в редакцию: 12 декабря 2020 г.

Доработана: 27 января 2021 г.

Принята к публикации: 30 января 2021 г.

### Ключевые слова:

каскадный солнечный элемент, космические батареи, концентрирование солнечного излучения

**Аннотация.** Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии – наиболее многообещающее направление возобновляемой энергетики. Солнечные батареи обеспечивают энергоснабжением космические аппараты и получают все большее применение на Земле. Основным барьером в увеличении темпов развития наземной солнечной фотоэлектрики является относительно высокая стоимость солнечной электроэнергии. Снизить ее можно путем повышения КПД энергосистем и уменьшения расхода материалов для батарей на основе каскадных солнечных элементов. Результаты разработки каскадных солнечных элементов и модулей для солнечных батарей космического базирования и наземных солнечных фотоэнергоустановок на основе каскадных солнечных элементов с концентраторами солнечного излучения показали, что КПД концентраторных каскадных фотопреобразователей превышает 45 % в наземных условиях – это значительно выше, чем в существующих кремниевых и тонкопленочных солнечных батареях. Увеличение КПД каскадных фотопреобразователей достигнуто за счет «расщепления» солнечного излучения на несколько спектральных интервалов и осуществления более эффективного преобразования энергии фотонов каждого из этих интервалов в определенной части полупроводниковой структуры. Каскадные фотоэлектрические преобразователи имеют наибольшее значение КПД и являются основным элементом современных космических солнечных батарей. Каскадные солнечные элементы обеспечивают высокоэффективное преобразование концентрированного солнечного излучения и снижение площади и стоимости солнечных элементов пропорционально кратности концентрирования. Таким образом, использование разработанных концентраторных фотоэнергоустановок в крупномасштабной наземной солнечной фотоэнергетике весьма перспективно.

## Введение

Развитие электроэнергетики в мире до недавнего времени не встречало принципиальных трудностей. Увеличение производства электро-

энергии происходило в основном за счет увеличения добычи нефти и газа. Однако энергетика оказалась первой крупной отраслью мировой экономики, которая столкнулась с ситуацией видимого истощения своей традиционной сырьевой базы. Сейчас все труднее становится сохранить высокий темп развития энергетики путем использования лишь традиционных ископаемых источников энергии. Кроме того, загрязнение окружающей среды продуктами сгорания ископаемого топлива является причиной ухудшения экологии.

**Андреев Вячеслав Михайлович**, заведующий лабораторией фотоэлектрических преобразователей ФТИ имени А.Ф. Иоффе, член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор; vmandreev@mail.ioffe.ru.

© Андреев В.М., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Эти обстоятельства определяют возрастающую роль возобновляемых источников энергии и в первую очередь энергии Солнца. В последние годы в общественном сознании крепнет убежденность в том, что энергетика будущего должна базироваться на крупномасштабном использовании солнечной энергии. Солнце – это огромный, неиссякаемый, абсолютно безопасный источник энергии, в равной степени всем принадлежащий и всем доступный. Ставка на солнечную фотоэнергетику должна рассматриваться как беспримысленный и безальтернативный выбор для человечества.

Солнечные батареи обеспечивают энергоснабжением космические аппараты и получают все большее применение на Земле. В 2019 году в мире были установлены солнечные батареи мощностью 117 ГВт при общей мировой мощности установленных к 2020 году батарей более 634 ГВт.

В России основным производителем наземных кремниевых модулей является завод «Хевел», на котором внедрена технология, разработанная учеными ФТИ имени А.Ф. Иоффе. Объем производства на конец 2020 года составляет 350 МВт солнечных модулей в год.

Решающим для увеличения темпов развития наземной солнечной фотоэнергетики является повышение КПД энергосистем и уменьшение стоимости и расхода материалов для батарей. Солнечные фотоэнергоустановки на основе каскадных фотоэлектрических преобразователей с концентраторами солнечного излучения и системами слежения за солнцем перспективны для снижения стоимости солнечного электричества [1–9].

## **1. Каскадные фотоэлектрические преобразователи для космических солнечных батарей**

Современные космические аппараты предъявляют повышенные требования к эффективности и радиационной стойкости бортовых солнечных батарей (СБ). Наиболее перспективным путем решения этих задач является разработка технологии каскадных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) из арсенида галлия и родственных ему соединений  $A^3B^5$  на германиевых подложках [3; 10].

ФТИ имени А.Ф. Иоффе имеет пятидесятилетний опыт разработок гетероструктурных ФЭП для космических солнечных батарей [1; 3; 5; 11–14]. В ФТИ была впервые в мире разработана технология гетероструктурных  $AlGaAs/GaAs$  ФЭП,

с использованием которой в НПО «Квант» (Москва) было организовано крупномасштабное производство космических солнечных батарей (рис. 1). В последнее время накоплен большой опыт эксплуатации космических солнечных батарей на основе  $AlGaAs/GaAs$ ,  $AlGaInP/GaAs/Ge$  и других гетероструктур на основе соединений  $A^3B^5$  [5; 10]. Показано, что эти СБ обеспечивают увеличение КПД, удельного энергопотребления и радиационной стойкости по сравнению с кремниевыми батареями. В однопереходных ФЭП повышение КПД достигается за счет 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 трехпереходных каскадных ФЭП, выполненных на основе трех последовательно соединенных p–n-переходов в материалах с различной шириной запрещенной зоны, обеспечивается существенное увеличение КПД до значений более 30 % в условиях околоземного космоса (воздушная масса  $AM0$ ). За последние 10 лет накоплен значительный опыт [10; 13; 15–17] по созданию трехпереходных каскадных солнечных элементов методом МОС-гидридной эпитаксии (рис. 2). Дальнейшие перспективы увеличения КПД связываются с разработкой четырехпереходных каскадных ФЭП [10; 18–19]. Получение таких ФЭП возможно только с применением высокопроизводительных прецизионных технологических установок МОС-гидридной эпитаксии и современных постростовых (планарных) технологий.

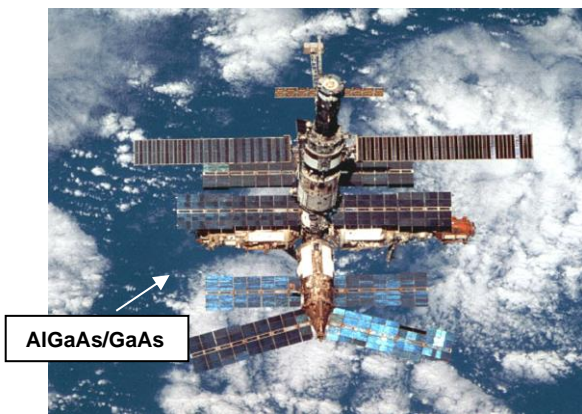
Несмотря на большую стоимость каскадных космических батарей по сравнению с кремниевыми, использование каскадных ФЭП обеспечивает приблизительно двухкратное снижение суммарных затрат, благодаря увеличению удельного энергопотребления, уменьшению размеров и веса СБ, увеличению ресурса работы СБ и снижению расхода топлива на доставку СБ на орбиту.

Методом МОС-гидридной эпитаксии в ФТИ созданы гетероструктурные ФЭП [3; 5] со встроенным Брегговским зеркалом (рис. 3), состоящим из 20–30 слоев  $GaAs$  и  $AlAs$  толщиной 50–70 нм, в которых существенно улучшена стойкость к воздействию космической радиации, что обеспечивает увеличение срока службы солнечных батарей. Разработаны конструкции каскадных ФЭП с двухсекционными Брегговскими отражателями,

характеризующимися более широким максимумом отражения, что позволило повысить их радиационную стойкость.

Для создания каскадных гетероструктур в едином процессе был применен комплекс технологических разработок, включающий эпитаксиальный рост в системах полупроводников Al-Ga-As и Al-Ga-In-P на германиевой подложке, технологию создания туннельных р-п-переходов, методику согласования фотока в субэлементах каскадной структуры (рис. 4) с одновременным фор-

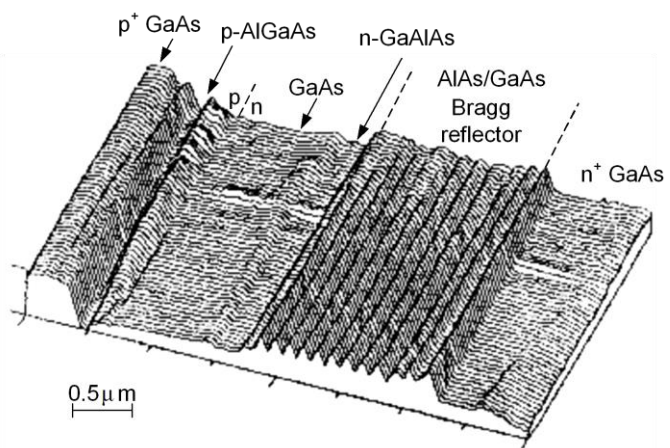
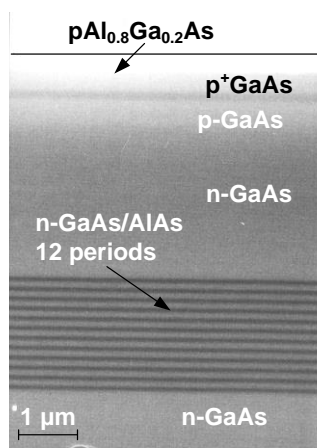
мированием в германиевой подложке дополнительного третьего фотоактивного р-п-перехода. Основными преимуществами замены GaAs-подложки на инородную являются: снижение стоимости ФЭП за счет меньшей стоимости Ge при толщине слоев гетероструктуры порядка 7–10 мкм; улучшение механической прочности ФЭП и, как следствие, возможность уменьшения толщины ФЭП до 120–150 мкм и увеличения удельного (на единицу веса) энергосъема в солнечных батареях (менее 1 кг/м<sup>2</sup>).



**Рис. 1.** Космическая станция «Мир» с AlGaAs/GaAs солнечной батареей, изготовленной в АО «НПП «Квант» по технологии ФТИ имени А.Ф. Иоффе [3]  
**[Figure 1.** Space station "MIR" with AlGaAs/GaAs solar array, fabricated in NPO "Kvant" with using the technology developed at the Ioffe Institute [3]]



**Рис. 2.** MOCVD технология каскадных гетероструктур для фотоэлектрических преобразователей (ФТИ имени А.Ф. Иоффе)  
**[Figure 2.** MOCVD technology of multijunction heterostructures for solar cells (Ioffe Institute)]



**Рис. 3.** Гетероструктуры с Брэгговским рефлектором, обеспечивающим увеличение радиационной стойкости за счет отражения и эффективное поглощение «подзонных» фотонов [5]  
**[Figure 3.** Heterostructures with Bragg reflectors, ensuring the radiation resistance increase owing to reflection and effective absorption of subbandgap photons [5]]

Созданы каскадные солнечные элементы на основе гетероструктуры Ge/GaAs/GaInP (рис. 5), в которых достигнуты значения КПД, превы-

шающие 30 % в условиях околоземного космоса (АМ0), в том числе с концентраторами солнечного излучения [5; 10–13]. Увеличение КПД

каскадных фотопреобразователей достигнуто за счет «расщепления» солнечного излучения на несколько спектральных интервалов и осуществления более

эффективного преобразования энергии фотонов каждого из этих интервалов в определенной части полупроводниковой структуры (рис. 4–6).



Рис. 4. Структура каскадного солнечного элемента и пути увеличения его эффективности

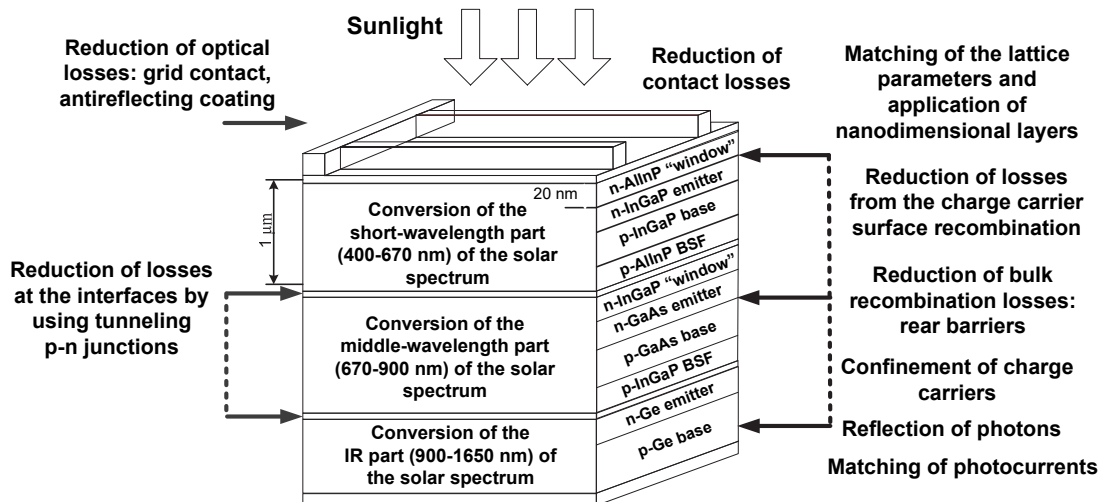


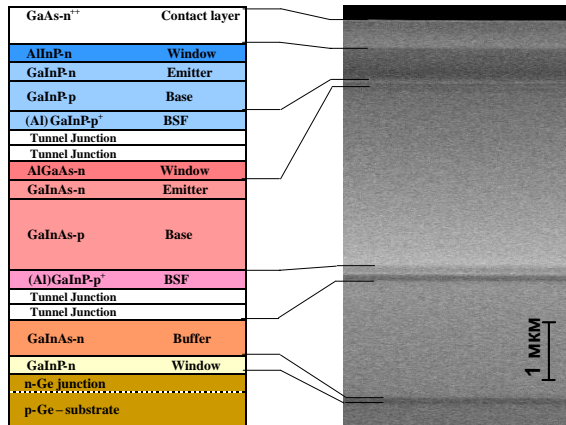
Figure 4. Structure of a multijunction solar cell and path for rising its efficiency

Выбор материалов для субэлементов каскадных ФЭП является наиболее критичным при разработке их структуры. С этой точки зрения в наиболее эффективной на данный момент структуре каскадных ФЭП на основе согласованных по параметру решетки материалов  $Ga_{0.52}In_{0.48}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$  ограничены возможности увеличения КПД, вследствие не оптимальности ширины запрещенной зоны этих материалов. Это выражается в большом фототоке верхнего GaInP и

нижнего Ge субэлементов по сравнению с фототоком среднего (GaInAs) субэлемента. Одним из реализованных путей повышения эффективности таких ФЭП явилось увеличение ширины запрещенной зоны материала верхнего субэлемента, что позволило увеличить генерируемое им напряжение и рабочее напряжение всего ФЭП. Для твердых растворов GaInP существует возможность увеличения ширины запрещенной зоны при сохранении параметра решетки за счет

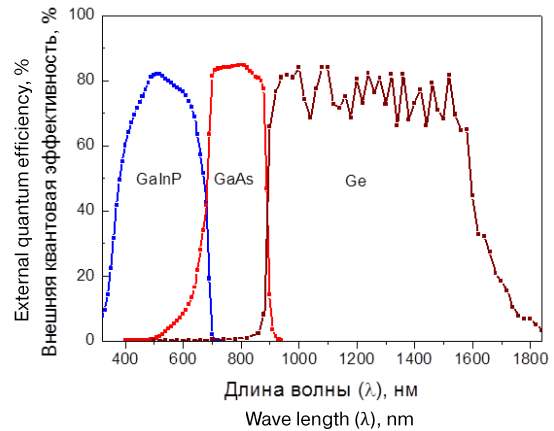
снятия упорядочения этих твердых растворов. Исследования в этой области позволили разработать технологию, обеспечивающую снижение упорядочения в GaInP.

Создание структур с квантоворазмерными поглощающими средами (квантовыми точками и

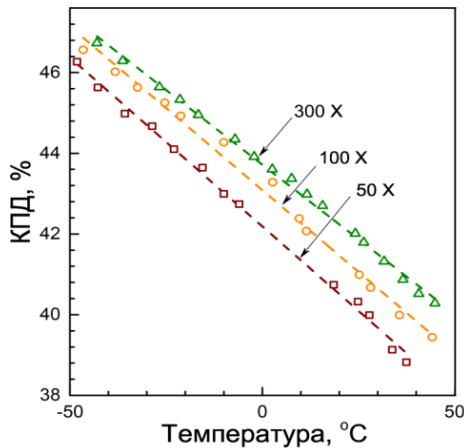


**Рис. 5.** Гетероструктура каскадного солнечного элемента [Figure 5. Heterostructure of a multijunction solar cell]

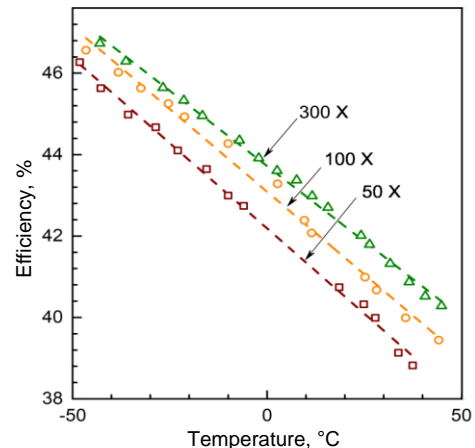
квантовыми ямами) позволило сдвинуть оптический край поглощения среднего субэлемента на основе GaInAs в длинноволновую область, что обеспечило повышение тока, генерируемого этим субэлементом, и увеличение тока каскадного ФЭП на основе GaInP/GaInAs/Ge [14].



**Рис. 6.** Спектр фотоответа трехпереходного солнечного элемента на основе гетероструктуры GaInP/GaAs/Ge [Figure 6. Photoresponse spectrum of a triple-junction solar cell based on GaInP/GaAs/Ge heterostructure]



**Рис. 7.** Зависимость КПД каскадного солнечного элемента от температуры при различных кратностях (50X, 100X, 300X) концентрирования «наземного» солнечного излучения [Figure 7. Temperature dependence in the triple-junction solar cells at the different sunlight concentration ratio (50X, 100X, 300X)]



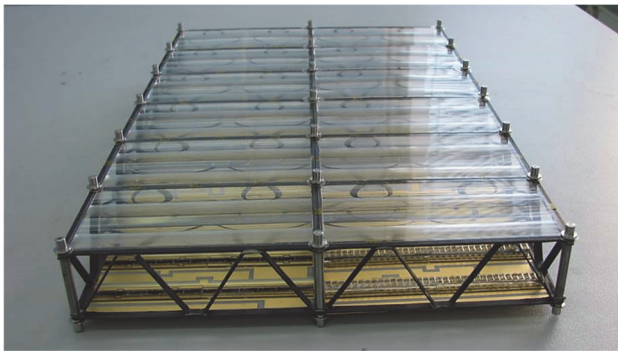
Разработанные структуры каскадных ФЭП включают:

- квантово-размерные (20–30 нм) фронтальные широкозонные «окна» AlGaInP, обеспечивающие фоточувствительность до ультрафиолетовой области спектра;
- квантово-размерные (10–50 нм) слои туннельных  $p^+-n^+$ -переходов, соединяющих фотоактивные области трех каскадов в гетероструктуре;

- встроенные в гетероструктуру Брегговские отражатели (на основе периодических структур, образованных слоями с толщинами 50–70 нм), обеспечивающие отражение в фотоактивную область «подзонных» фотонов;
- короткопериодные сверхрешетки для создания структур с градиентом ширины запрещенной зоны и для получения новых материалов;
- структуры с квантовыми точками в активных областях каскадных элементов.

Таким образом, для повышения КПД разработаны ФЭП нового поколения с использованием квантово-размерных слоев и новых материалов как в активных областях, так и в коммутирующих их туннельных диодах. Созданы ФЭП для космических солнечных батарей с КПД более 30 % в условиях околоземного космического пространства, в том числе ФЭП с КПД более 33 % за счет промежуточного концентрирования солнечного излучения.

Разработаны солнечные элементы [13], оптимизированные как для работы в условиях околоземного космоса, так и для работы на космических аппаратах, запускаемых в глубокий космос (в сторону от Солнца), например, в условиях околомарсианских орбит и на Марсе, характеризующихся меньшей рабочей температурой солнечных батарей по сравнению с рабочей температурой околоземных космических батарей. КПД таких ФЭП достигает величины 46 % при рабочей температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в условиях облучения концентрированным наземным солнечным излучением (рис. 7). В космических условиях КПД таких элементов составляет порядка 38 % при температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и кратности концентрирования 100–300 солнц.



**Рис. 8.** Фрагмент панели (площадью 600 см<sup>2</sup>) космической солнечной батареи с линейками каскадных солнечных элементов и линзовыми линейными концентраторами солнечного излучения (ФТИ имени А.Ф. Иоффе)

**[Figure 8.** Photovoltaic module (square of 600 cm<sup>2</sup>) of space array based on multijunction solar cells and sunlight concentrators made of linear lenses (Ioffe Institute)]

На основе каскадных ФЭП и концентраторов (линз Френеля) разработаны и созданы [12] космические концентраторные модули (рис. 8), обеспечивающие повышение удельного энерго-съемы, снижение стоимости солнечных батарей и улучшение радиационной стойкости. Дости-

нуто уменьшение в 10 раз расхода полупроводниковых материалов в разработанных модулях с промежуточным десятикратным концентрированием солнечного излучения и, как следствие, обеспечено снижение стоимости солнечных батарей. В концентраторных батареях улучшена радиационная стойкость за счет защиты фотопреобразователей концентратором и теплоотводящим основанием, а также за счет фотонного и инжекционного «отжига» концентраторных солнечных элементов, работающих при повышенных интенсивностях светового потока.

Разработанные технологии космических каскадных ФЭП внедрены в серийное производство космических батарей ПАО «Сатурн» (Краснодар). Выполненные в ФТИ разработки каскадных ФЭП способствовали развитию отечественного производства энергоэффективных и радиационно-стойких космических батарей нового поколения, что является чрезвычайно важным для выполнения программ исследования космоса, космической связи и развития космических технологий.

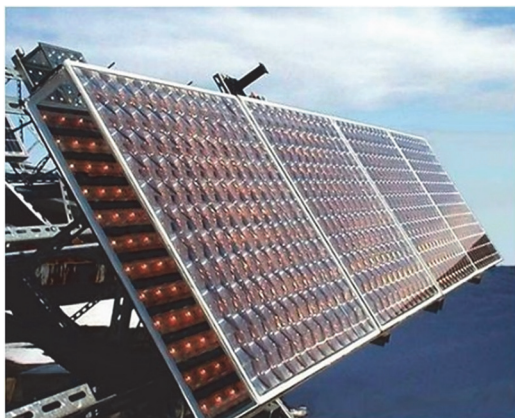
## 2. Наземные концентраторные солнечные фотоэнергосистемы на основе каскадных солнечных элементов

Разработанные наземные солнечные батареи и энергоустановки нового поколения с концентраторами солнечного излучения [1–9] открывают перспективы существенного снижения стоимости получаемой электроэнергии за счет снижения площади солнечных элементов пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения и увеличения удельной (с единицы площади) мощности батарей. Прецизионное отслеживание положения Солнца и улучшенная температурная стабильность КПД приводит к дополнительному увеличению на 30–40 % количества электроэнергии, вырабатываемой концентраторными солнечными фотоэнергоустановками, по сравнению с традиционными батареями без систем слежения.

ФТИ имени А.Ф. Иоффе внес существенный вклад в создание высокоэффективных гетероструктурных (на основе соединений  $A^3B^5$ ) солнечных элементов и наземных концентраторных фотоэнергосистем на их основе [1; 3; 5; 6].

В разработанных наземных концентраторных фотоэнергосистемах (рис. 9, 10) на основе каскадных солнечных элементов при пятисот-

кратном концентрировании солнечного излучения обеспечивается существенное увеличение удельного (с единицы площади батарей) энергосъема за счет большего КПД и слежения за положением Солнца, а также снижение расхода солнечных элементов в 500 раз пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения.



**Рис. 9.** Наземная солнечная батарея на основе 576 каскадных солнечных элементов и концентраторов – линз Френеля (ФТИ имени А.Ф. Иоффе)

[Figure 9. Terrestrial solar array on the basis of 576 multijunction solar cells and Fresnel lens concentrators (Ioffe Institute)]

Преимуществом конструкции разработанных в ФТИ концентраторных солнечных модулей (рис. 9) являются малые линейные размеры концентраторов (менее 6 см) и фотопреобразователей при соотношении их площадей порядка 500. В этих модулях обеспечивается уменьшение их конструктивной толщины, снижение расхода основных материалов и простота отвода генерируемого тока и остаточного тепла от преобразователей. «Перегрев» фотопреобразователей относительно температуры окружающей среды составляет около 40 °С. Такой же перегрев имеет место и в кремниевых солнечных батареях без концентрации. Однако концентраторные солнечные батареи обладают лучшей температурной стабильностью КПД (рис. 7). Так, при увеличении рабочей температуры на 40 °С снижение мощности концентраторных батарей составляет всего 6 %. Это преимущество разработанных концентраторных батарей увеличивается при их использовании в условиях с повышенной температурой окружающей среды.

Линзы Френеля в разработанных концентраторных модулях объединяются в панели и пред-

ставляют собой композитную конструкцию с фронтальным элементом из обычного силикатного стекла и тыльным френелевским профилем, выполненным в тонком слое силикона. В этой конструкции фронтальная поверхность концентраторного модуля является плоской и стабильной к воздействию повреждающих факторов окружающей среды, включая воздействие абразивных частиц. В свою очередь, силикон является наиболее стойким прозрачным полимерным материалом по отношению к воздействию ультрафиолетового излучения и характеризуется высокой эластичностью. Френелевский профиль в силиконе получается путем полимеризации силикона на стекле при использовании промежуточного адгезивного слоя и матрицы с негативным френелевским профилем.

Модули с концентраторами излучения должны быть все время точно ориентированы на Солнце. В разработанных фотоэлектрических установках (рис. 10) модули расположены ступенчато на электронно-механической системе слежения, снабженной датчиком положения Солнца. Такое конструктивное решение способствует снижению влияния ветровых нагрузок. Работая в полностью автоматическом режиме, установки расходуют на собственные нужды лишь около 0,1 % от энергии, генерируемой размещенными на них модулями.

Основными преимуществами разработанных концентраторных фотоэнергоустановок являются:

- снижение расхода материалов для солнечных элементов в 500–1000 раз пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения. В солнечной концентраторной фотоэнергоустановке 1 г каскадного элемента эквивалентен по вырабатываемой за 25 лет работы электроэнергии 5 т нефти;

- увеличение более чем в 2 раза (к солнечным батареям на основе кристаллического кремния) количества электроэнергии, вырабатываемой концентраторными солнечными модулями с единицы площади, за счет большей эффективности (более 42 %) каскадных солнечных элементов [13; 15–19], слежения за Солнцем и лучшей температурной стабильности КПД;

- эффективная работа концентраторных фотоэнергоустановок в регионах с высокой инсоляцией и при повышенной температуре;

- снижение в 2 раза количества расходных материалов: стекла и металла для модулей;

– время возврата электроэнергии, затраченной на изготовление концентраторных фотоэнергоустановок, составляет менее 1 года.

Широкое использование таких установок в регионах Земли с высокой инсоляцией, в том



числе на юге РФ, позволит уменьшить негативную нагрузку на окружающую среду, а также будет способствовать решению социальной проблемы обеспечения электроэнергией населения, не имеющего централизованного энергоснабжения.



**Рис. 10.** Концентраторная солнечная установка на основе 2592 каскадных солнечных элементов и линз Френеля (ФТИ имени А.Ф. Иоффе)

[Figure 10. Concentrator solar installation on the basis of 2592 multijunction solar cells and Fresnel lenses (Ioffe Institute)]

## Заключение

Необходимость интенсивного развития фотоэнергетики в России определяют следующие факторы:

– существенная часть стоимости электроэнергии от ТЭЦ не включена в тарифы, а распределена на затраты всего общества и будущих поколений, которые будут лишены ископаемых ресурсов. Вследствие этого необходимо признать прямое и косвенное государственное субсидирование традиционной энергетики, загрязняющей окружающую среду;

– фотоэнергетика обеспечивает демонополизацию и децентрализацию рынка энергетики, то есть эффективную конкуренцию и поддержку независимых производителей энергии;

– фотоэнергетика экономически рентабельна уже сейчас для многих сфер, например, для обеспечения электроэнергией автономных потребителей и для низковольтного электрообеспечения (дежурное освещение, датчики, сенсоры и др.);

– фотоэнергетикой достигнут к настоящему времени ценовой паритет с сетевой электроэнергией в регионах с высокой инсоляцией;

– развитие фотоэнергетики соответствует большинству высших приоритетов в утвержденной «Энергетической стратегии России до 2030 года»: снижению вредного влияния ТЭК на окружающую

среду, комплексному использованию местных энергетических источников, увеличению роли возобновляемой энергетики, снижению эмиссии вредных веществ в атмосферу;

– успешное развитие солнечной фотоэнергетики в таких странах, как Китай, США, Германия, Италия и многих других, показывает, что после нескольких лет активной государственной поддержки солнечная энергетика может успешно развиваться самостоятельно, благодаря достижению паритета стоимости солнечной и сетевой электроэнергии.

Наземная солнечная фотоэнергетика зародилась в России во многом за счет развития электроэнергетики для космических аппаратов. Созданную научно-технологическую базу необходимо использовать для развертывания «новой энергетики», при которой снижены экологические опасности разного рода, а проблемы истощения ресурсов и их неравномерного распределения по странам в значительной степени сглажены. Наступает время, когда в России следует переходить к более широкому инвестированию средств в фотоэнергетику, как это делается в странах, лидирующих в технологическом отношении.

В России создан значительный научно-технологический задел для организации крупномасштабного производства концентраторных сол-



нечных фотоэнергосистем на основе каскадных солнечных элементов и систем слежения за Солнцем, открывающих перспективы дальнейшего снижения стоимости «солнечного» электричества и обеспечения паритета со стоимостью сетевой электроэнергии.

Повышение энергоэффективности и ресурса работы космических солнечных батарей нового поколения на основе каскадных ФЭП и расширение объема их производства необходимо для выполнения программ космических исследований и развития космических технологий – одного из приоритетов технологического прорыва.

### Список литературы / References

1. Andreev VM, Grilikhes VA, Rummyantsev VD. *Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight*. New York: John Wiley & Sons; 1997.
2. Luque A, Andreev V. (eds.) *Concentrator photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007.
3. Alferov ZI, Andreev VM, Rummyantsev VD. III–V heterostructures in photovoltaics. In: Luque A, Andreev V. (eds.) *Concentrator photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007. p. 25–50.
4. Petrova-Koch V, Hezel R, Goetzberger A. (eds.) *High-efficient low-cost photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2020.
5. Alferov ZI, Andreev VM, Shvarts MZ. III–V solar cells and concentrator arrays. In: Petrova-Koch V, Hezel R, Goetzberger A. (eds.) *High-efficient low-cost photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2020. p. 133–174. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22864-4\\_8](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-22864-4_8).
6. Rummyantsev VD. Terrestrial concentrator PV systems. In: Luque A, Andreev V. (eds.) *Concentrator photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007. p. 151–174.
7. Bett AW, Dimroth F, Shiefer G. Multijunction concentrator solar cells. In: Luque A, Andreev V. (eds.) *Concentrator photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007. p. 67–87.
8. Sala G, Luque A. Past experiences and new challenges of PV concentrators. In: Luque A, Andreev V. (eds.) *Concentrator photovoltaics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007. p. 1–23.
9. Algara C, Rey-Stolle I. (eds.) *Handbook of concentrator photovoltaic technology*. John Wiley & Sons; 2016.
10. Pakhanov NA, Andreev VM, Shvarts MZ, Pchelyakov OP. State-of-the-art architectures and technologies of high-efficiency solar cells based on III–V heterostructures for space and terrestrial applications. *Optoelectronics, instrumentation and data processing*. 2018;54(2):187–202.
11. Kalinovsky VS, Grebenshikova EA, Dmitriev PA, Ilinskaya ND, Kontrosh EV, Malevskaya AV, Usikova AA, Andreev VM. Photoelectric characteristics

of InGaP/Ga(In)As/Ge solar cells fabricated with a single-stage wet chemical etching separation process. *AIP Conf. Proc.* 2014;1616:326–330.

12. Kalinovskii VS, Kontrosh EV, Andreeva AV, Ionova EA, Malevskaya AV, Andreev VM, Malutina-Bronskaya VB, Zaleskiy VB, Lemesheskaya AM, Kuzoro VI, Khalimanovich VI, Zayceva MK. CPV module based on a hybrid solar cell. *AIP Conf. Proc.* 2019;2149: 030003.

13. Andreev VM, Malevskiy DA, Pokrovskiy PV, Rummyantsev VD, Chekalin AV. On the main photoelectric characteristics of three-junction InGaP/InGaAs/Ge solar cells in a broad temperature range ( $-197\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq +85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). *Semiconductors*. 2016;50(10):1356–1361.

14. Kalyuzhnyy NA, Mintairov SA, Saliy RA, Nadtochiy AM, Payusov AS, Brunkov PN, Nevedomsky VN, Shvarts MZ, Marti A, Andreev VM, Luque A. Increasing the quantum efficiency of InAs/GaAs QD arrays for solar cells grown by MOVPE without using strain-balance technology. *Progress in photovoltaics: research and applications*. 2016;24(9):1261–1271. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2789>.

15. Sasaki K, Agui T, Nakaido K, Takahashi N, Onitsuka R, Takamoto T. Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells. *AIP Conf. Proc.* 2013;1556:22–25.

16. Aiken D, Dons E, Je S-S, Miller N, Newman F, Patel P, Spann J. Lattice matched solar cells with 40% average efficiency in pilot production and a roadmap to 50%. *IEEE J. Photovoltaics*. 2013;3(1):542–547.

17. Geisz JF, Duda A, France RM, Friedman DJ, Garcia I, Olavarria W, Olson JM, Steiner MA, Ward JS, Young M. Optimization of 3-junction inverted metamorphic solar cells for high-temperature and high-concentration operation. *AIP Conf. Proc.* 2013;1477:44–48.

18. Dimroth F, Grave M, Beutel P, Fiedeler U, Karcher C, Tibbits TND, Oliva E, Siefer G, Schachtner M, Wekkeli A, Bett AW, Krause R, Piccin M, Blanc N, Dratzek C, Guiot E, Ghyselen B, Salvetat T, Tauzin A, Signamarcheix T, Dobrich A, Hannappel T, Schwarzbach K. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs/GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Progress in photovoltaics: research and applications*. 2014;22(3): 277–282.

19. France RM, Geisz JF, Garcia I, Steiner MA, McMahon WE, Friedman DJ, Moriarty TE, Osterwald C, Ward SJ, Duda A, Young M, Olavarria WJ. Quadruple-junction inverted metamorphic concentrator devices. *IEEE J. Photovoltaics*. 2015;5(1):432–437.

### Для цитирования

Андреев В.М. Каскадные солнечные батареи космического и наземного применения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 271–280. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-271-280>

## Multijunction solar arrays for space and terrestrial applications

Viacheslav M. Andreev

Ioffe Institute, 26 Polytechnicheskaya St, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

---

### Article history:

Received: December 12, 2020

Revised: January 27, 2021

Accepted: January 30, 2021

---

### Keywords:

cascade solar cells, space arrays, concentrated sunlight

*Abstract.* Photovoltaic conversion of the solar energy is the most prospective direction of the renewable power engineering. Solar arrays ensure power supply of spacecrafts and are gaining increasingly more application on the Earth. In the majority of developed countries, laws on state support of the “green” power engineering assisted in a substantial increase of power of the solar photovoltaic systems have been adopted. The main barrier to increasing the terrestrial solar photovoltaics development rates is a relatively high cost of the “solar” electric power. The ways for reducing the cost are the rise of the efficiency of power systems and the reduction of the material consumption for arrays based on multijunction solar cells. Results of multijunction solar cells and modules developments for space and terrestrial solar arrays are discussed in the article. In the last years, a significant experience on creation of multijunction solar cells was accumulated. Cascade solar cells and solar photovoltaic installations on their base with sunlight concentrators have been developed. At present, the terrestrial cascade solar cell efficiency exceeds 45%, which is substantially higher than that in conventional Si and thin-film solar arrays. The cascade solar cell efficiency increase has been achieved at the expense of “splitting” the sunlight spectrum into several intervals by the solar cell semiconductor structure fulfilling more effective photon energy conversion of each of these intervals in a definite parts of this structure. It is shown that multijunction solar cells provide the highest efficiency and they are the basic components of space arrays. Multijunction solar cells provide the highest conversion efficiency of concentrated sunlight as well. It opens prospects for decreasing the solar cell area and cost proportionally to the sunlight concentration. Developed concentrated photovoltaic installations are promising for wide applications in the high scale terrestrial solar photovoltaic energetics.

### For citation

Andreev VM. Multijunction solar arrays for space and terrestrial applications. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):271–280. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-271-280>