

УДК 621.382.2/3

КОНЦЕНТРАТОРНАЯ СОЛНЕЧНАЯ ФОТОЭНЕРГЕТИКА***В.М. Андреев***

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26
Тел.: +7-812-2975649, факс: +7-812-2971017, e-mail: vmandreev@mail.ioffe.ru

Заключение совета рецензентов: 22.05.12 Заключение совета экспертов: 23.05.12 Принято к публикации: 24.05.12

Учеными ФТИ им. А.Ф. Иоффе внесен существенный вклад в создание высокоэффективных солнечных элементов на основе гетероструктур. Достигнуты КПД гетероструктурных каскадных солнечных элементов, превышающие 37% (1000 «солнц»), что в 2-3 раза выше, чем в существующих кремниевых и тонкопленочных солнечных батареях. На основе этих фотопреобразователей в ФТИ разработаны энергоустановки нового поколения с концентраторами солнечного излучения, открывающие перспективы существенного снижения стоимости получаемой электроэнергии за счет большей эффективности и снижения в 1000 раз площади солнечных элементов пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения.

Ключевые слова: солнечный элемент, концентратор солнечного излучения, фотоэнергоустановка.

CONCENTRATOR SOLAR PHOTOVOLTAICS***V.M. Andreev***

Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences
26 Polytechnicheskaya str., St.-Petersburg, 194021, Russia
Tel.: +7-812-2975649, fax: +7-812-2971017, e-mail: vmandreev@mail.ioffe.ru

Referred: 22.05.12 Expertise: 23.05.12 Accepted: 24.05.12

The scientists of the Ioffe Institute have significantly contributed to the development of high-efficiency solar cells based on heterostructures. The efficiency of heterostructure cascade solar cells exceeds 37% (1000 suns), which is in 2-3 times that for silicon and thin-film solar arrays. New-generation CPV installations with sunlight concentrators have been elaborated at the Ioffe Institute on the basis of these solar cells, which open up prospects for a significant reduction of the cost of generated electric power due to the higher efficiency of solar cells and their 1000 times smaller area (in proportion to the sunlight concentration ratio).

Keywords: solar cell, sunlight concentrator, photovoltaic installation.



*Вячеслав Михайлович
Андреев*

Сведения об авторе: зав. лабораторией фотоэлектрических преобразователей. Профессор, д-р техн. наук. Лауреат Ленинской и Государственной премий СССР, премии им. А.Ф. Иоффе РАН и Международной Беккерелевской премии, премии Фонда А.Гумбольдта. Заслуженный деятель науки РФ. С 1975 г. – преподавательская деятельность в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (ЛЭТИ).

Образование: Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина)

Область научных интересов: физика и технология полупроводников и солнечная фотоэнергетика.

Публикации: более 350, в том числе 90 авторских свидетельств и патентов на изобретения, 4 монографии.

**Актуальность развития
солнечной фотоэнергетики**

Значение солнечной фотоэнергетики для мировой экономики определяют следующие факторы:

– запасы нефти и газа постепенно истощаются, и солнечное электричество должно компенсировать их уменьшающуюся добычу;

– увеличивающийся выброс двуоксида углерода в атмосферу должен обусловить ускоренное развитие экологически чистой солнечной фотоэнергетики для снижения загрязнения окружающей среды;

– внедрение фотоэнергетики позволяет демонизировать и децентрализовать рынок электроэнергетики, обеспечивая эффективную конкуренцию и поддержку независимых производителей энергии;

– уже сегодня фотоэнергетика экономически рентабельна для ряда применений, например, для обеспечения электроэнергией автономных потребителей и для низковольтного электрообеспечения (дежурное освещение, датчики, сенсоры и др.).

Кроме этих факторов, касающихся энергетики, имеются и социальные факторы, определяющие необходимость государственной поддержки возобновляемой энергетики, и в первую очередь солнечной фотоэнергетики:

– более двух миллиардов людей в мире не имеют доступа к централизованному снабжению электричеством, причем большинство из них живет в солнечном поясе Земли. Организация системы централизованного электроснабжения невыгодна в ряде этих районов и потребовала бы огромных капитальных вложений. Этот фактор важен также и для России с ее большой территорией;

– скрытые социальные затраты на компенсацию вредного воздействия «тепловых» электростанций (лечение болезней, потери из-за уменьшения продолжительности жизни и др.) распределены на все общество и составляют более 50% цены производимой ими энергии. Если включить эти затраты прямо в тарифы на топливо и энергию, то экологически чистая фотоэнергетика станет конкурентоспособной уже на данном этапе ее развития;

– значительная часть стоимости электроэнергии от существующих электростанций распределена на все общество не только ныне живущих людей, но и будущих поколений. Наши дети и внуки будут лишены ископаемых ресурсов. Необходимо осознать факт прямого и косвенного государственного субсидирования традиционной энергетики. В связи с этим очевидно, что государственная поддержка возобновляемой энергетики должна проводиться в значительно больших масштабах.

Состояние работ по солнечной фотоэнергетике в России и мире

Современный мировой рынок фотоэнергетики – это вполне сложившийся, быстроразвивающийся сегмент мировой экономики с возрастающим темпом роста. Объем производства солнечных батарей с 2000 г. растет на 30-50% в год. В 2011 г. было произведено солнечных батарей на установленную мощность более 26 ГВт. Суммарная мощность установленных солнечных фотоэнергосистем к началу 2012 г. составила 67 ГВт. Согласно прогнозам, к середине века Солнце будет источником энергии, сравнимым по объемам с ископаемыми источниками, используемыми в традиционной электроэнергетике.

В большинстве европейских стран приняты государственные законы, стимулирующие развитие возобновляемой энергетики. Это так называемые законы «Feed-in Tariff», в соответствии с которыми государство гарантирует покупку по увеличенным тарифам электроэнергии, получаемой от возобнов-

ляемых источников. Например, в ряде стран электроэнергия, получаемая с помощью солнечных батарей, покупается государством по цене 0,3–0,4 евро за 1 кВт·ч, заметно превышающей стоимость сетевой электроэнергии. Данные законы обеспечили значительное увеличение мощностей солнечных фотоэнергосистем, установленных в Германии, Испании, Италии и других странах.

Несмотря на положительные тенденции развития фотоэнергетики, имеется существенный сдерживающий фактор – высокая стоимость фотоэнергосистем, обусловленная как дороговизной основного материала – кремния, так и дороговизной технологического процесса. На рис. 1 приведены примеры солнечных батарей трех типов.

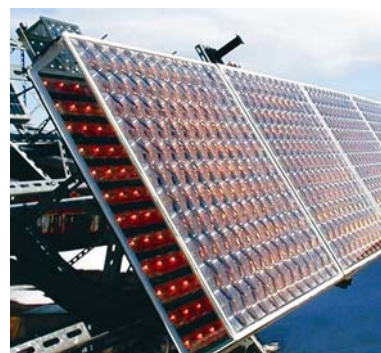


Рис. 1. Солнечные батареи трех поколений:

I – на основе кристаллического кремния;
II – с тонкопленочной структурой; III – гетероструктурные с концентрированием солнечного излучения

Fig. 1. Solar arrays of three generations:
I – based on crystalline silicon; II – with thin-film structures;
III – with heterostructure solar cells and sunlight concentrators

Солнечные батареи первого типа изготавливаются на основе моно- и поликристаллического кремния. Они имеют в производстве КПД 13-15% при малом потенциале дальнейшего увеличения эффективности. Однако доля таких батарей составляет около 90% от всего объема выпускаемой фотоэлектрической продукции. Оставшуюся долю, увеличивающуюся в последние годы, обеспечивают тонкопленочные батареи (второй тип), изготавливаемые на основе аморфного кремния, а также соединений CdTe и CuInGaSe₂. КПД таких батарей в производстве составляет 8–11%, т.е. заметно ниже, чем в кремниевых батареях. Главное преимущество тонкопленочных батарей – это возможность снижения стоимости за счет уменьшения в десятки раз расхода полупроводниковых материалов. Наконец в последнее время на рынок выходят солнечные батареи третьего типа на основе наногетероструктурных каскадных фотопреобразователей и концентраторов солнечного излучения. Они являются наиболее перспективными с точки зрения увеличения КПД до значений более 40% и радикального (в 500–1000 раз) снижения расхода полупроводниковых материалов в соответствии с кратностью концентрирования излучения.

Отечественные исследования и разработки в области солнечных батарей на основе кремния проводятся с конца 1950-х годов. За прошедшие 60 лет накоплен большой опыт в области создания батарей космического назначения (ОАО «НПП «Квант», ОАО «Сатурн»), а также наземных батарей (фирма «Солнечный ветер», г. Краснодар; ОАО «Рязанский завод металлокерамических приборов»; «Телеком-СТВ», г. Зеленоград и другие). В 2008-2010 гг. при поддержке ГК «Роснано» стартовали три новых «солнечных» проекта: один – по производству поликристаллического кремния для солнечных батарей и микроэлектроники («НИТОЛ Солар»), второй – по производству солнечных батарей на основе аморфного кремния (ГК «Ренова» при участии ФТИ им. А.Ф. Иоффе) с планируемым выпуском батарей на мощность 120 МВт/год и третий – по выпуску солнечных фотоэнергоустановок на основе каскадных гетероструктур и концентраторов солнечного излучения с объемом производства 95 МВт/год (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ООО «Солнечный поток»).

Гетероструктурные фотопреобразователи на основе соединений A³B⁵ уже широко используются как в наземной, так и в космической энергетике. Несмотря на большую исходную стоимость, использование гетероструктурных космических батарей позволяет существенно снизить суммарные затраты на запуск и эксплуатацию космических аппаратов благодаря увеличению в два раза удельного энергоудельного ресурса работы в космосе. Производство каскадных космических батарей является чрезвычайно важным для России, учитывая значимость программ космических исследований и повышения обороноспособности страны, развития систем космической связи, информационных и информационно-управляющих систем.

Значительное внимание в мире уделяется также и разработкам наземных концентраторных солнечных фотоэнергосистем на основе каскадных гетероструктур. Ряд фирм, например, «Amonix», «SolFocus» (США), «Concentrix-Soitec» (Германия-Франция), объявили об организации промышленного выпуска таких систем, которые должны обеспечить существенное снижение стоимости «солнечного» электричества.

Работы ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области концентраторной гетероструктурной фотоэнергетики

Создание в ФТИ им. А.Ф. Иоффе впервые в мире в 1969 г. солнечных элементов на основе AlGaAs-GaAs гетероструктур [1-4] открыло новую страницу в солнечной фотоэнергетике. В гетероструктурах *p*-AlGaAs (широкозонное окно) – *p-n*GaAs (фотоактивная область) удалось формировать бездефектную гетерограницу и обеспечивать идеальные условия для фотогенерации электронно-дырочных пар и их собирания *p-n*-переходом. Поскольку гетерофотоэлементы с арсенид-галлиевой фотоактивной областью оказались еще и более радиационно-стойкими по сравнению с кремнием, они быстро нашли применение в космической технике. Примером масштабного энергетического использования AlGaAs/GaAs солнечных батарей явилось оснащение ими в 1986 г. базового модуля советской орбитальной станции «Мир».

В последние годы в ФТИ достигнуто значительное увеличение КПД в каскадных гетероструктурных фотопреобразователях [5-9] 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. Трехкаскадные фотопреобразователи включают в себя три фотоактивных области, выполненные из трех полупроводников GaInP/GaAs/Ge с шириной запрещенной зоны, уменьшающейся от фронтальной освещаемой поверхности фотопреобразователя (рис. 2). Коротковолновая часть солнечного излучения преобразуется в GaInP-области, средневолновая часть – в GaAs-области и инфракрасная часть – в Ge-области.

В ФТИ накоплен значительный опыт по созданию «космических» каскадных солнечных элементов с использованием современного метода металлоорганической эпитаксии из газовой фазы. Для космических применений созданы каскадные солнечные элементы Ge/GaAs/GaInP, в которых достигнуты значения КПД, превышающие 28% для внеатмосферного солнечного излучения. На основе разработанных каскадных фотопреобразователей и концентраторов (линз Френеля) созданы космические концентраторные модули, обеспечивающие повышение удельного энергоудельного ресурса и снижение стоимости солнечных батарей.

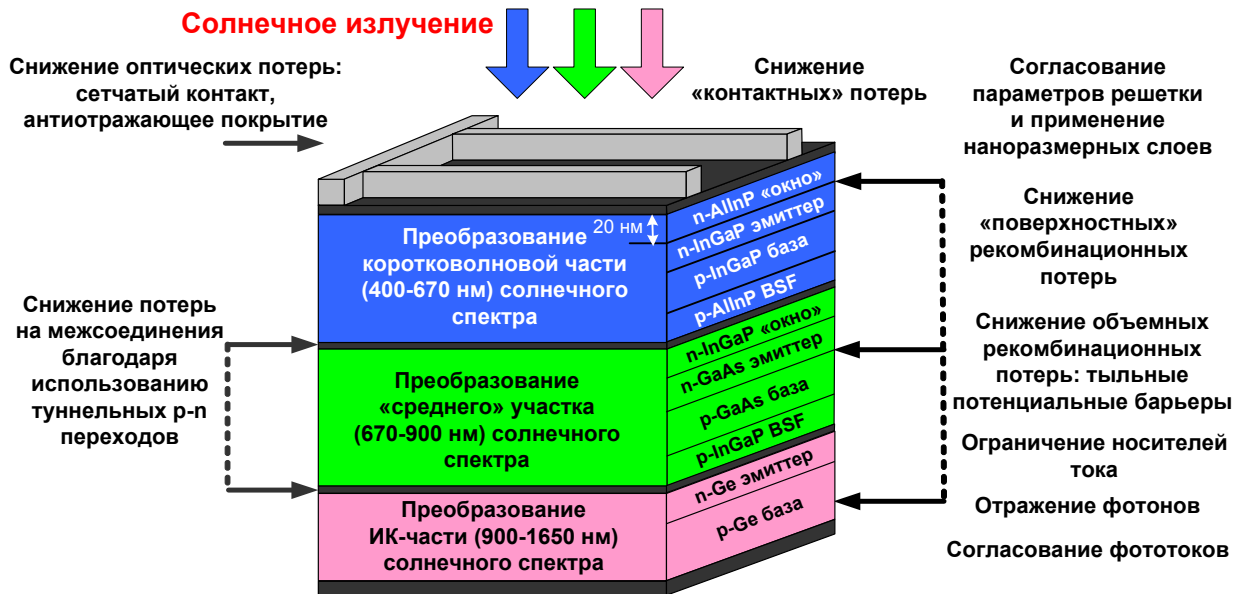


Рис. 2. Гетероструктурный каскадный солнечный элемент
Fig. 2. Heterostructure cascade solar cell

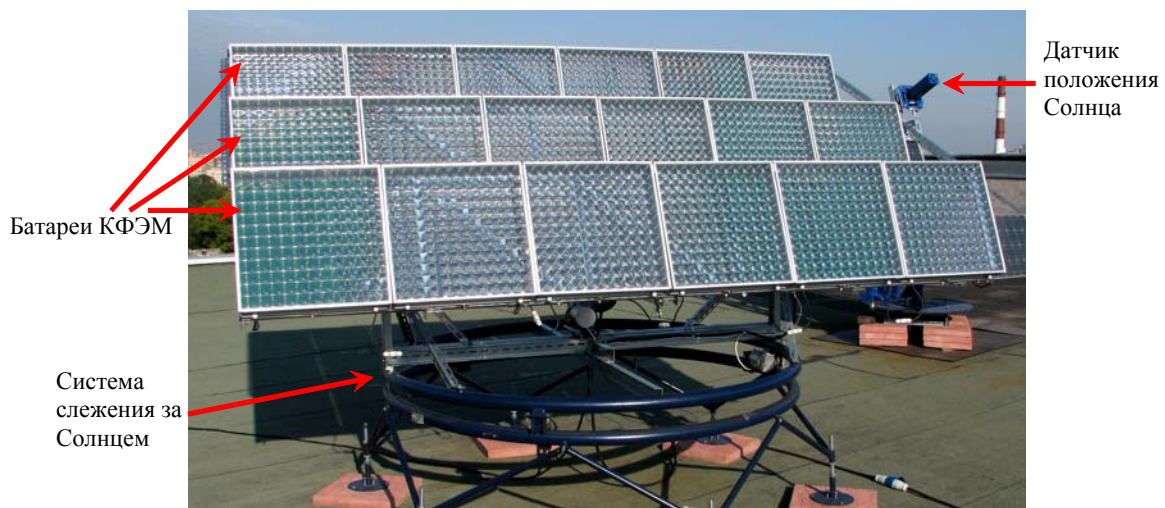


Рис. 3. Солнечная концентраторная фотоэлектрическая установка мощностью 1 кВт
Fig. 3. Solar concentrator photovoltaic installation with 1 kW output

В ФТИ разработаны также наземные трехпереходные каскадные солнечные элементы GaInP/GaAs/Ge и GaInP/GaAs/GaSb с КПД более 37% при концентрированном солнечном облучении. При большем количестве каскадов возможно увеличение КПД до 45-50%. На базе высокоэффективных фотопреобразователей в ФТИ спроектированы и реализованы на практике солнечные концентраторные энергоустановки с устройствами слежения за Солнцем. Особенностью конструкции разработанных солнечных модулей являются малые линейные размеры концентраторов и фотопреобразователей (при соотношении их площадей порядка тысячи), благодаря чему перегрев солнечных элементов относительно температуры окружающей среды не превышает 35 °С.

Модули с концентраторами излучения должны быть все время точно ориентированы на Солнце, что обеспечивается разработанными в ФТИ прецизионными системами слежения за Солнцем. В разработанных фотоэлектрических установках (рис. 3) модули расположены ступенчато на электромеханической 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. В то же время обеспечивается максимальное собирание солнечной энергии модулями в течение дня, что дает дополнительный выигрыш от

применения концентраторных модулей и систем слежения за Солнцем по сравнению с неподвижно закрепленными солнечными модулями на основе кремния и тонких пленок.

Производство концентраторных фотоэнергосистем на основе гетероструктурных фотопреобразователей позволит в сотни раз уменьшить потребность в полупроводниковых материалах. Так, 1 килограмм полупроводника, работающего в концентраторной фотоэнергосистеме, за 25 лет выработает столько же электроэнергии, сколько ее может быть получено при сгорании 5 тыс. тонн нефти. Себестоимость 1 Вт установленной мощности концентраторных фотоэнергосистем составит менее 1,5 долл. США, т.е. будет снижена приблизительно в 2 раза по сравнению с существующим мировым уровнем и ценами, что должно обеспечить достижение паритета стоимости солнечной и сетевой электроэнергии, в т.ч. в регионах РФ с высокой инсоляцией.

Солнечная фотоэнергетика зародилась во многом за счет развития электроэнергетики для космических аппаратов. Созданная научно-технологическая база была использована 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.

Список литературы

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Каган М.Б., Протасов И.И., Трофим В.Г. Солнечные преобразователи на основе гетеропереходов $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - n\text{-GaAs}$ // Физика и техника полупроводников. 1970. Т. 4, № 12. С. 2378-2379.
2. Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. Жидкофазная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. М.: Советское радио, 1975.
3. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989.
4. Andreev V.M, Grilikhes V.A, Rumyantsev V.D. Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight. N.Y.: John Wiley & Sons Ltd, 1997.
5. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. III-V heterostructures in photovoltaics // Concentrator Photovoltaics // Springer Series in Optical Sciences. 2007. Vol. 130, P. 25-50.
6. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. III-V solar cells and concentrator arrays // High-Efficient Low-Cost Photovoltaics // Springer Series in Optical Sciences. 2008. Vol. 140. P. 101-141.
7. Андреев В.М. Нанотехнологии для солнечной фотоэнергетики // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. 2007. № 2 (46). С. 93-98.
8. Андреев В.М., Забродский А.Г., Когновицкий С.О. Интегрированная солнечно-ветровая энергетическая установка с накопителем энергии на основе водородного цикла // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. 2007. № 2 (46). С. 99-105.
9. Хвостиков В.П., Власов А.С., Сорокина С.В., Потапович Н.С., Тимошина Н.Х., Шварц М.З., Андреев В.М. Высокоэффективный ($\eta = 39,6\%$, AM1.5D) каскад фотопреобразователей в системе со спектральным расщеплением солнечного излучения // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, № 6. С. 810-815.

