

УДК 621.315.592

## Гетероструктурные солнечные элементы

© В.М. Андреев<sup>¶</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 1 марта 1999 г. Принята к печати 2 марта 1999 г.)

Приводятся результаты исследований гетероструктурных солнечных элементов на основе соединений  $A^{III}B^V$ . В солнечных элементах на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs достигнуты рекордные значения эффективности — 24.6% для 100-кратно концентрированного солнечного излучения в условиях космоса (AM0) и 27.5% для 100-кратного излучения в наземных условиях (AM1.5). В солнечных элементах со встроенным брегговским зеркалом достигнуто значительное увеличение радиационной стойкости. Созданы и исследованы каскадные солнечные элементы с КПД до 32% при 100 солнцах (AM1.5), в которых в качестве верхнего широкозонного элемента использованы прозрачные в инфракрасной области спектра элементы на основе GaAs, а нижние узкозонные элементы выполнены из GaSb или твердого раствора InGaAs.

Фотоэлектрический метод является одним из наиболее перспективных методов преобразования солнечной энергии. Со времени запуска космического аппарата "Спутник-3", на котором впервые были установлены солнечные батареи, фотоэлектрический метод остается основным методом получения электроэнергии на космических аппаратах и находит все большее применение на Земле. Кремний в настоящее время является основным материалом солнечных батарей. Эффективность солнечных элементов на основе кремния составляет  $15 \div 16\%$  при прямом облучении в условиях околоземного космоса. В наземных условиях КПД кремниевых элементов составляет около 20% при прямом солнечном облучении и до  $25 \div 27\%$  при  $(30 \div 50)$ -кратном концентрировании солнечного излучения. При дальнейшем увеличении интенсивности засветки КПД кремниевых элементов уменьшается из-за увеличения рабочей температуры и увеличения омических потерь.

Солнечные элементы на основе гетероструктур обеспечивают большие значения КПД и имеют высокую радиационную стойкость.

Важным преимуществом гетерофотопреобразователей является их способность эффективно преобразовывать сильно концентрированное солнечное излучение (до  $1000 \div 2000$  крат), что открывает перспективы существенного (пропорционально степени концентрирования) снижения площади и стоимости солнечных элементов и вследствие этого снижения стоимости "солнечной" электроэнергии.

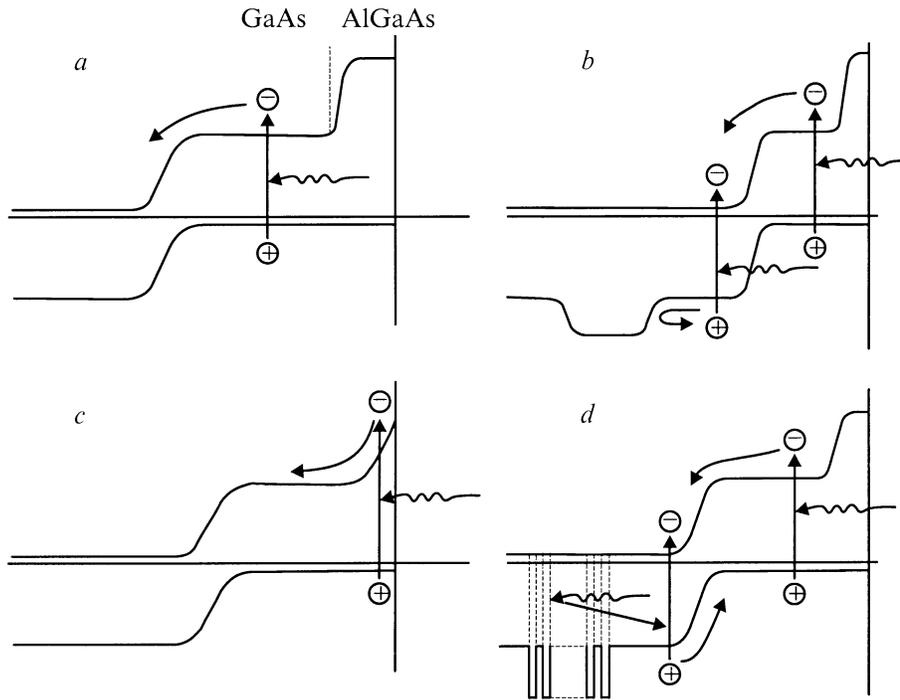
Впервые солнечные элементы на основе гетероструктур  $n$ -GaAs- $p$ -AlGaAs были предложены и созданы в ФТИ им. А.Ф. Иоффе [1,2]. Использование широкозонного "окна", выполненного из тонкого слоя твердого раствора AlGaAs, (рис. 1, *a*) практически полностью прозрачного для солнечного излучения, обеспечивает пассивацию поверхности фотоактивной области [3,4] и достижение величин КПД, близких к предельным теоретическим значениям. Методом низкотемпературной жид-

кофазной эпитаксии были созданы [5,6] многослойные гетероструктуры AlGaAs/GaAs, обеспечившие достижение рекордных значений КПД для солнечных элементов с одним  $p$ - $n$ -переходом: 24.6% для 100 "солнц" в условиях космоса и 27.5% для  $100 \div 200$  "солнц" в наземных условиях. Такие значения КПД были достигнуты благодаря уменьшению толщины фронтального слоя  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  до  $30 \div 50$  нм, кристаллизации высококачественного материала в активной области и созданию тыльного потенциального барьера, выполненного из  $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ , обеспечивающего увеличение эффективности собирания генерированных светом носителей тока (рис. 1, *b* и 2).

В последние годы для изготовления гетероструктур AlGaAs/GaAs для солнечных элементов начал широко использоваться метод МОС-гидридной эпитаксии (метод газофазной эпитаксии из металл-органических соединений) [7–11]. Значительный интерес представляет получаемая этим методом гетероструктура солнечного элемента со встроенным брегговским зеркалом (рис. 1, *c*). В разработанной в ФТИ структуре [9,11] на месте тыльного потенциального барьера изготавливается многослойное диэлектрическое зеркало, состоящее из 24-х чередующихся слоев GaAs (60 нм) и AlAs (70 нм). Коэффициент отражения от такого зеркала составляет  $\sim 95\%$  в спектральном интервале  $750 \div 900$  нм. Это обеспечивает отражение в активную область части солнечного излучения, не поглощенного в базовом слое, что позволяет при уменьшении толщины базовой области и меньших значениях длин диффузионного смещения сохранить высокую эффективность собирания носителей тока, генерированных светом. Следствием является повышение радиационной стойкости солнечных элементов.

Солнечные элементы на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, вследствие большой эффективности и повышенной радиационной стойкости, широко используются в космических солнечных батареях. Солнечная батарея базового модуля космической станции "Мир" была оборудована гетероструктурными солнечными эле-

<sup>¶</sup> E-mail: andreev@scell.ioffe.rssi.ru

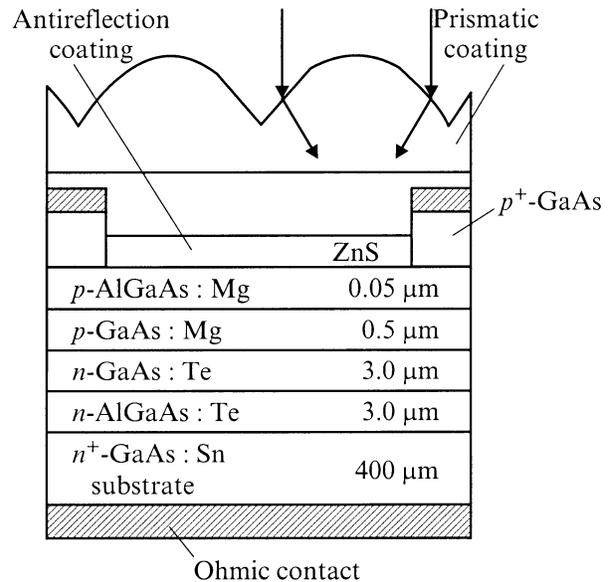


**Рис. 1.** Зонные энергетические диаграммы солнечных элементов на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs: *a* — структура с *p-n*-переходом в GaAs и с фронтальным широкозонным "окном" из *p*-AlGaAs; *b* — структура с тыльным потенциальным барьером в *n*-области; *c* — структура с фронтальным слоем *p*-AlGaAs переменного состава; *d* — структура с брэгговским зеркалом в *n*-области.

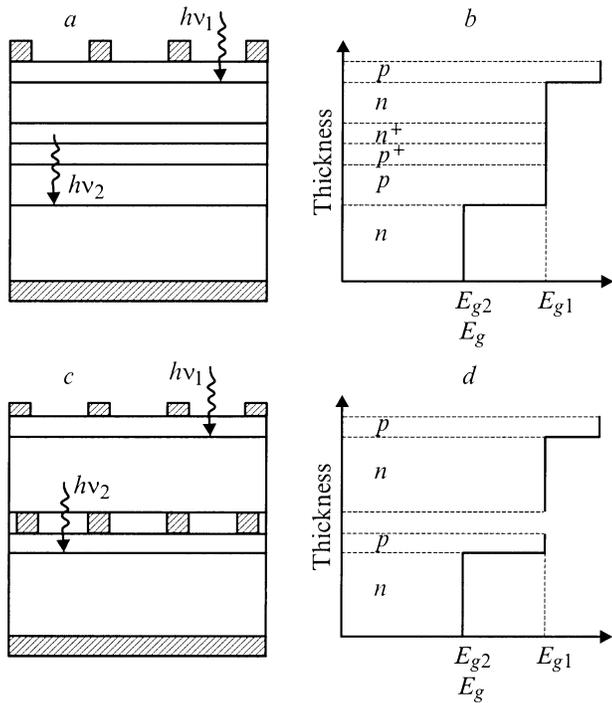
ментами суммарной площадью около  $60 \text{ м}^2$ , изготовленными по технологии, разработанной в ФТИ. При этом снижение мощности батарей за более чем 10-летний срок работы составило всего 20 отн%.

Дальнейшее увеличение КПД обеспечивают каскадные солнечные элементы [12–16], изготовленные на основе многослойных гетероструктур с двумя и более *p-n*-переходами в материалах с различными ширинами запрещенной зоны (рис. 3). В таких элементах "верхний" *p-n*-переход, выполненный в более широкозонном материале, предназначен для эффективного преобразования коротковолновой части солнечного излучения, а "нижний" *p-n*-переход, выполненный в узкозонном материале, оптимизируется для преобразования длинноволнового излучения, проходящего через широкозонный элемент. Теоретические оценки показывают, что в таких сложных фотопреобразователях возможно достижение КПД более 40%.

Существенное повышение КПД каскадных элементов было продемонстрировано [12,13] в конструкции с механической стыковкой (рис. 3, *c, d*). В качестве материала широкозонного элемента в этой конструкции используется GaAs, а материалом узкозонного элемента служит InGaAs или GaSb. При этом GaAs-элемент выполняется прозрачным для инфракрасного излучения с длиной волны более  $0.9 \text{ мкм}$ , а узкозонный элемент обеспечивает эффективное преобразование длинноволновой



**Рис. 2.** Схема гетероструктурного солнечного элемента с тыльным потенциальным барьером из *n*-AlGaAs:Te и призматическим фронтальным покрытием, используемым для уменьшения оптических потерь на затенение фронтальными полосковыми контактами.

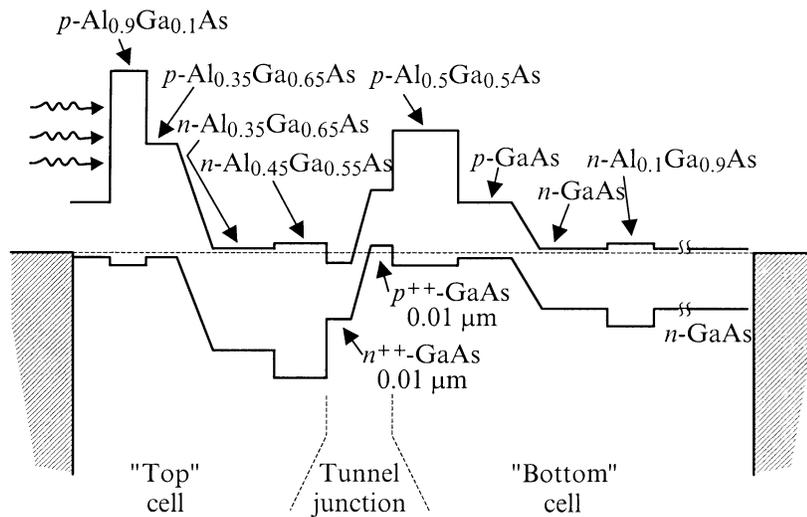


**Рис. 3.** Схематическое изображение (слева) и распределение ширины запрещенной зоны  $E_g$  (справа) для каскадных солнечных элементов двух типов: *a, b* — монолитная конструкция с туннельным  $p^+ - n^+$ -переходом; *c, d* — каскадные элементы с механической стыковой, соединенные с помощью контактной сетки.

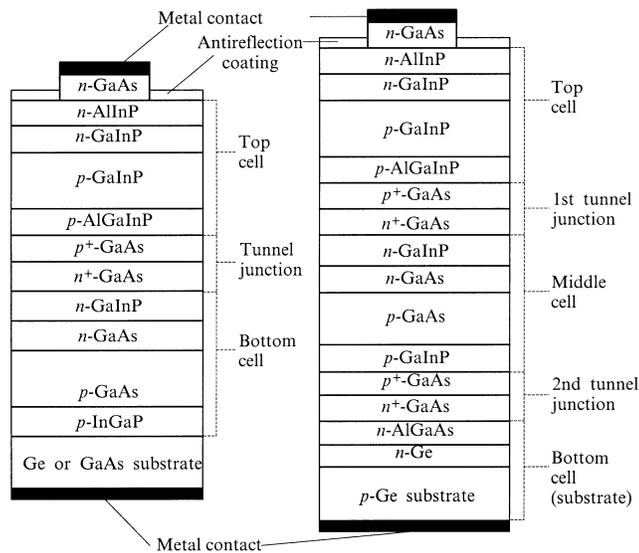
части солнечного излучения в спектральном интервале  $0.9 \div 1.8 \mu\text{м}$ . Такие солнечные элементы имеют КПД  $32 \div 33\%$  [13] для  $(50 \div 100)$ -кратно концентрированного солнечного излучения при наличии воздушных масс (AM1.5).

Еще больший интерес представляет монолитная конструкция каскадного солнечного элемента (рис. 3, *a, b*), в котором "верхний" и "нижний" элементы соединены туннельным  $p^+ - n^+$ -переходом, обеспечивающим низкие омические потери. Такие каскадные элементы (рис. 4, 5) созданы на основе гетеропереходов AlGaInP/GaAs [14,15] и AlGaAs/GaAs [16] методами МОС-гидридной эпитаксии [14,15] и жидкофазной эпитаксии [16]. Максимально достигнутые значения КПД в таких элементах составляет около 30% [15] для солнечного излучения при наличии воздушной массы (AM1.5). Применение для этой цели метода МОС-гидридной эпитаксии позволяет использовать для изготовления многослойных  $A^{III}B^V$ -гетероструктур подложки из относительно дешевого и более прочного германия (рис. 5), что открывает дополнительные возможности снижения стоимости и удельного энергосъема солнечных батарей. Кроме того, как показано на рис. 5, *b*, в такой структуре может быть создан дополнительный (третий)  $p - n$ -переход в германии, что обеспечивает увеличение КПД в таком монолитном трехкаскадном фотопреобразователе. Таким образом, в солнечных элементах на основе гетероструктур достигнуты рекордные значения эффективности и имеются перспективы дальнейшего увеличения КПД, повышения радиационной стойкости и снижения стоимости солнечных батарей.

За последние годы в ФТИ на основе разработанных фотоэлементов были созданы энергоустановки с концентраторами солнечного излучения для наземного и космического применения [17,18]. Наземные энергоустановки были выполнены на основе мощных ( $5 \div 10 \text{ Вт}$ ) высокоэффективных фотоэлементов и концентраторов (зеркал и линз Френеля), обеспечивающих степень концентрирования солнечного излучения до 500 крат.



**Рис. 4.** Зонная энергетическая диаграмма монолитного каскадного солнечного элемента на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs, изготовленной методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии.



**Рис. 5.** Структуры монокристаллических каскадных солнечных элементов на основе гетероструктур  $\text{AlGaInP}/\text{GaAs}/\text{Ge}$  с двумя (слева) и тремя (справа) фотоактивными  $p-n$ -переходами.

Установки снабжены системами слежения за положением Солнца и являются полностью автономными, что делает их перспективным источником электроэнергии для потребителей, удаленных от линий централизованного энергоснабжения.

Модули космических концентраторных батарей включают линзовую панель, корпус, выполненный в виде сотовой конструкции, и печатные платы с солнечными элементами, расположенными в фокусе линз Френеля. Дополнительными преимуществами использования разработанных солнечных батарей в космосе наряду с увеличением эффективности являются: возможность организации защиты фотопреобразователя элементами концентрирующей системы от ионизирующих излучений, возможность выбора теплового режима работы фотопреобразователей, обеспечивающего термический отжиг радиационных дефектов, а также возможность осуществления фотонного и инжекционного отжига солнечных элементов, работающих при повышенной плотности фототока.

## Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, Н.С. Зимогорова, Д.Н. Третьяков. *ФТП*, **3**, 1633 (1969).
- [2] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, М.Б. Каган, И.И. Протасов, В.Г. Трофим. *ФТП*, **4**, 2378 (1970).
- [3] В.М. Андреев, Т.М. Головнер, М.Б. Каган, Н.С. Королева, Т.Л. Любашевская, Т.А. Нуллер, Д.Н. Третьяков. *ФТП*, **7**, 2289 (1973).
- [4] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, Д.З. Гарбузов, В.Р. Ларионов, В.Д. Румянцев, В.Б. Халфин. *ФТП*, **11**, 1765 (1977).

- [5] V.M. Andreev, A.B. Kazantsev, V.P. Khvostikov, E.V. Paleeva, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts. *Conf. Record of the 1st World Conf. Photovoltaic Energy Conversion* (Hawaii, USA, 1994) p. 2096.
- [6] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, E.V. Paleeva, M.Z. Shvarts. *Proc. Symp. Compound Semicond.* (St. Petersburg, 1996) p. 449.
- [7] S.P. Tobin, S.M. Vernon, S.J. Wojtczuk, C. Bajgar, M.M. Sanfacon, T.M. Dixon. *Proc. 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (N.Y., 1990) p. 158.
- [8] S.P. Tobin, S.M. Vernon, M.M. Sanfacon, A. Mastrovito. *Conf. Record 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Las Vegas, USA, 1991) p. 147.
- [9] V.M. Andreev, V.V. Komin, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, M.Z. Shvarts. *Conf. Record of the 1st World Conf. Photovoltaic Energy Conversion* (Hawaii, USA, 1994) p. 1894.
- [10] V.M. Andreev, V.S. Kalinovskiy, V.V. Komin, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, M.Z. Shvarts. *Proc. 4th Europ. Space Power Conf.* (Poitiers, France, 1995) p. 367.
- [11] V.M. Lantratov, M.Z. Shvarts, I.V. Kochnev. *Electrochem. Soc. Proc.*, **97-21**, 125 (1997).
- [12] L.M. Fraas, J.E. Avery, J. Martin, V.S. Sundaram, G. Girard, V.T. Dinh, T.M. Devenport, J.W. Yerkes, M.J. O'Neill. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **37**, 444 (1990).
- [13] V.M. Andreev, L.B. Karlina, V.P. Khvostikov, V.D. Romyantsev, M.Z. Shvarts, S.V. Sorokina. *Proc. 13th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Nice, France, 1995) p. 329.
- [14] K.A. Bertness, S.R. Kurtz, D.J. Friedman, A.E. Kibbler, C. Kramer, J.M. Olson. *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 989 (1994).
- [15] M. Yamaguchi, S. Wakamatsu. *Proc. 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Washington, USA, 1996) p. 9.
- [16] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, E.V. Paleeva, V.D. Romyantsev, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts, I.V. Vasil'ev. *Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Anaheim, USA, 1997) p. 927.
- [17] V.M. Andreev, B.A. Grilikhes, V.D. Romyantsev. *Фотозлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения* (Л., Наука, 1989).
- [18] V.M. Andreev, B.A. Grilikhes, V.D. Romyantsev. *Photovoltaic conversion of concentrated sunlight* (John Wiley & Sons, 1997).

Редактор Л.В. Шаронова

## Heterostructure-based solar cells

V.M. Andreev

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia