

# Высокоэффективные концентраторные (2500 солнц) AlGaAs/GaAs-солнечные элементы

© В.М. Андреев<sup>¶</sup>, В.П. Хвостиков, В.Р. Ларионов, В.Д. Румянцев, Е.В. Палеева, М.З. Шварц

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 исследования солнечных элементов, изготовленных на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, оптимизированных для работы на сверхвысоких степенях концентрирования солнечного излучения (1000–2500 солнц). Максимально достигнутые значения эффективности составили 25.1% при 500 солнцах, 25% при 1000 солнц и 22.8% при 2000 солнц для излучения с воздушной массой AM1.5. Создание таких элементов открывает перспективы уменьшения более чем на 3 порядка площади солнечных элементов и, как следствие, существенного снижения стоимости электроэнергии, вырабатываемой энергоустановками с концентраторами солнечного излучения.

## 1. Введение

Солнечные элементы, работающие при сверхвысоких степенях концентрирования солнечного излучения (более 1000 солнц), позволяют существенно снизить площадь солнечных элементов и стоимость солнечной электроэнергии.

В настоящее время максимальные подтвержденные значения эффективности концентраторных солнечных элементов составляют 24.6% [1–3] для космического солнечного излучения (AM0, 100 солнц) и 27.6% [3] для солнечного излучения вблизи земной поверхности (AM1.5, 255 солнц). Солнечные элементы на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs позволяют получить высокую эффективность и при концентрациях солнечного излучения более 1000 солнц. Например, коэффициент полезного действия (кпд), равный 23%, был достигнут недавно [4] при степени концентрирования 1300 солнц (AM1.5).

Для достижения больших значений эффективности при высокой концентрации солнечного излучения должны быть снижены омические потери при сохранении высоких значений фототока и рабочего напряжения. В настоящей работе эти цели были достигнуты благодаря созданию оптимальной гетероструктуры AlGaAs/GaAs методом низкотемпературной (600–400°C) жидкофазной эпитаксии [2,5–7].

## 2. Структура солнечных элементов

Фотоэлементы изготавливались на основе гетероструктуры, изображенной на рис. 1. На подложке из *n*-GaAs выращивались последовательно слои: *n*-AlGaAs (3 мкм), *n*-GaAs (3 мкм), *p*-GaAs (1–1.5 мкм) и *p*-Al<sub>0.85</sub>Ga<sub>0.15</sub>As (0.05 мкм). Для снижения омических потерь в данной структуре был существенно увеличен

(до 10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>) уровень легирования в части слоя *p*-GaAs, прилегающей к гетерогранице *p*-GaAs–*p*Al<sub>0.85</sub>Ga<sub>0.15</sub>As. Для обеспечения высокого значения диффузионной длины электронов в этом слое было создано встроенное электрическое поле за счет плавного уменьшения концентрации акцепторов от гетерограницы к *p*–*n*-переходу.

Полосковый фронтальный омический контакт изготавливался к сильно легированной части слоя *p*-GaAs, что обеспечило низкое контактное сопротивление. Антиотражающее покрытие выполнялось из ZnS. На фотоэлемент наклеивалось "призматическое" покрытие (рис. 1), обеспечивающее уменьшение оптических потерь на затенение контактными полосами благодаря тому, что лучи света отклоняются этим покрытием в фотоактивную часть фотоэлемента, свободную от контактных полос.

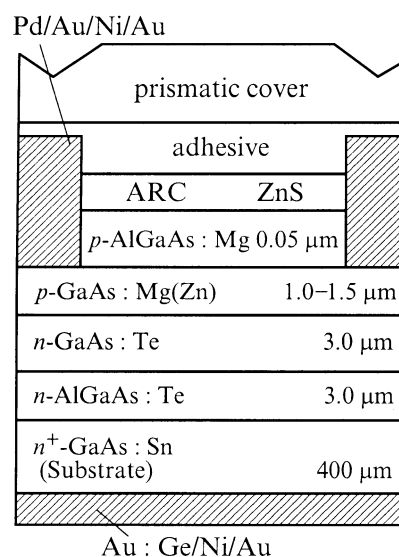


Рис. 1. Схема поперечного разреза солнечного элемента на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs.

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

### 3. Результаты и их обсуждение

Благодаря высокой эффективности собирания носителей тока в спектральном диапазоне 0.4–0.85 мкм (рис. 2) в фотоэлементах на основе данных структур были достигнуты близкие к предельным значения фототока: 28.7 мА/см<sup>2</sup> для "земного" солнечного излучения (AM1.5) и 35 мА/см<sup>2</sup> для условий космоса (AM0).

В солнечных элементах, предназначенных для работы при сверхвысоких степенях концентрирования солнечного излучения, весьма важным является достижение оптимального баланса между шириной и шагом контактных полос. На рис. 3 показаны концентрационные зависимости фактора заполнения нагрузочных характеристик трех солнечных элементов различной конструкции. Видно, что в элементах с расстоянием между контакт-

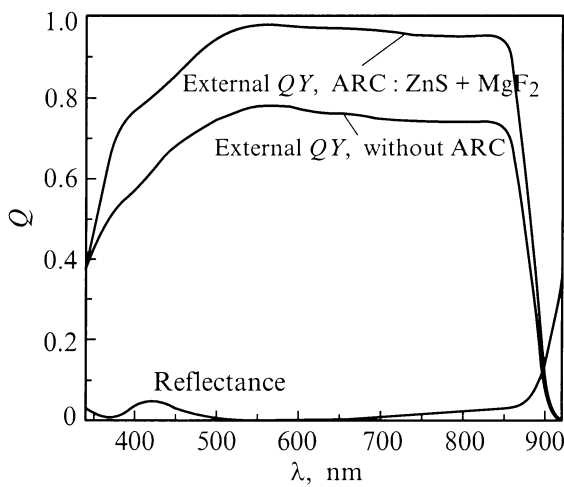


Рис. 2. Спектры фототока концентраторного солнечного фотоэлемента без антиотражающего покрытия и с покрытием, выполненным из ZnS+MgF<sub>2</sub>, а также спектр отражения от "просветленного" фотоэлемента.

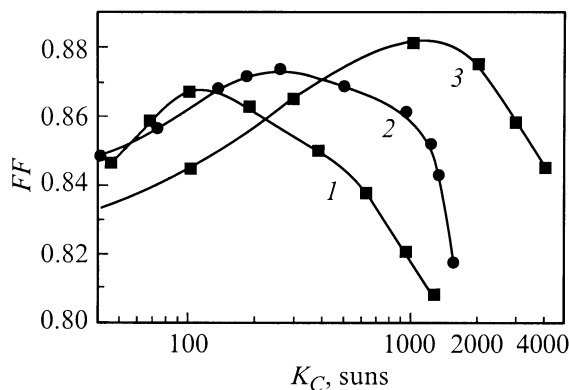


Рис. 3. Зависимость фактора заполнения  $FF$  нагрузочной характеристики от интенсивности засветки для солнечных элементов с различным расстоянием между контактными полосами: 0.1 мкм (1, 2) и 0.04 мкм (3) и с различной площадью активной освещаемой поверхности: 6 мм<sup>2</sup> (1) и 2 мм<sup>2</sup> (2, 3).

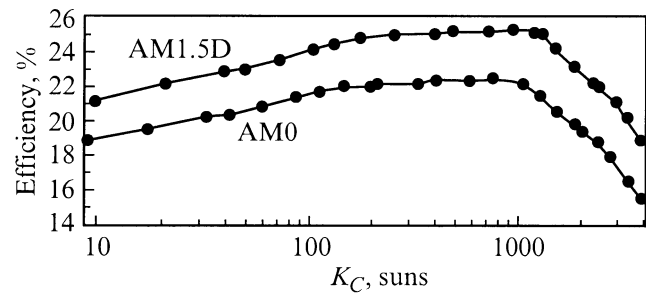


Рис. 4. Зависимость КПД одного из разработанных солнечных элементов от степени концентрирования солнечного излучения в условиях космоса (AM0) и в наземных условиях (AM1.5 D)

ными полосами 0.04 мм при ширине полос 6–8 мкм возможно сохранение высокого значения  $FF = 0.85$  при степени концентрирования солнечного излучения  $K_C = 4000$  солнц. Снижение омических потерь (сопротивления растекания и контактного сопротивления) в данных элементах было достигнуто благодаря увеличению толщины слоя  $p$ -GaAs до 1.2–1.5 мкм, а также благодаря увеличению легирования этого слоя вблизи гетерограницы до  $(2-3) \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Градиент концентрации дырок, необходимый для создания встроенного "тянущего" электрического поля, создавался двумя способами: либо последовательной кристаллизацией нескольких слоев  $p$ -GaAs с увеличивающейся концентрацией Mg в расплавах, либо дополнительной послеростовой диффузией цинка на глубину 0.2–0.3 мкм в гетероструктуру с эпитаксиальным слоем  $p$ -GaAs толщиной 1.0–1.2 мкм.

Затенение контактными полосами составило около 15% в элементах без призматических покрытий. Для снижения этих потерь на солнечные элементы наклеивались призматические покрытия, изготовленные из прозрачного полимерного материала (силикона) методом негативного профилирования матрицы и заливки этой матрицы силиконом. Использование этих покрытий позволило снизить потери на затенение до 3–4%.

В результате снижения омических потерь в разработанных элементах удалось достигнуть рекордных значений эффективности при сверхвысоких ( $K_C \geq 1000$  солнц) концентрациях солнечного излучения: 25% при  $K_C = 1000$ , 24.8% при  $K_C = 1300$ , 22.8% при  $K_C = 2000$  и 21.3% при  $K_C = 2500$  солнц. Результаты проведенных исследований показывают, что при реализации в одной структуре максимально достигнутых значений фототока порядка 28 мА/см<sup>2</sup> (AM1.5) и фактора заполнения нагрузочной характеристики 0.85–0.87 возможно дальнейшее увеличение КПД до 27% при концентрации солнечного излучения 2000–3000 солнц (рис. 4).

Разработанные элементы, работающие при сверхвысоких концентрациях солнечного излучения, могут найти широкое применение как в наземной, так и космической солнечной энергетике: в наземных концентраторных энергоустановках, характеризующихся малой стои-

мостью солнечных элементов; в космических гибридных модулях с концентраторами и оптическими волноводами; в батареях для космических аппаратов, направляемых в сторону Солнца; в системах передачи энергии по лазерному лучу.

Созданные приборы обеспечивают возможность значительного наращивания мощности концентраторных солнечных энергоустановок без существенного увеличения мощностей для производства полупроводниковых гетероструктур. Так, в Физико-техническом институте им. Иоффе на имеющихся эпитаксиальных установках может быть получено до  $10^5$  см<sup>2</sup> гетероструктур в год, что обеспечивает изготовление солнечных элементов на суммарную мощность до  $2 \cdot 10^6$  Вт/г в модулях, работающих при  $K_C = 1000$  солнц.

В заключение авторы благодарят Н.Х. Тимошину, Н.Д. Ильинскую и А.И. Дементьеву за помощь при изготовлении и измерении образцов и Ж.И. Алфёрова за постоянный интерес и поддержку работы.

## Список литературы

- [1] S.M. Vernon, S.P. Tohin, V.E. Haven, L.M. Geoffroy, M.M. Sanfacon. *Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Las Vegas, 1991) p. 353.
- [2] V.M. Andreev, A.B. Kazantsev, V.P. Khvostikov, E.V. Paleeva, V.D. Romyantsev, M.Z. Shvarts. *Proc. 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conferension* (Hawaii, 1994) p. 2096.
- [3] S.C. Bailey, D.J. Flood. *Progr. Photovoltaics*, **6**, 1 (1998).
- [4] J.C. Maroto, A. Marti, C. Algora, C.L. Araujo. *Proc. 13th EPSEC* (Nice, France, 1995) p. 343.
- [5] V.M. Andreev, A.B. Kazantsev, V.P. Khvostikov, E.V. Paleeva, S.V. Sorokina, V.D. Romyantsev. *Mater. Chem. and Phys.*, **45**, 130 (1996).
- [6] V.M. Andreev, V.D. Romyantsev. *Sol. Energy Mater. and Solar Cells*, **44**, 319 (1996).
- [7] V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Romyantsev. *Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight* (John Wiley & Sons Ltd., 1997) Ch. 3.

Редактор Т.А. Полянская

## High-efficient concentrator (2.500 suns) AlGaAs/GaAs solar cells

V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, V.R. Larionov,  
V.D. Romyantsev, E.V. Paleeva, M.Z. Shvarts

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