

Высокоэффективный ($\eta = 39.6\%$, AM 1.5D) каскад фотопреобразователей в системе со спектральным расщеплением солнечного излучения

© В.П. Хвостиков[¶], А.С. Власов, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович,
Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Андреев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 16 ноября 2010 г. Принята к печати 22 ноября 2010 г.)

Представлена концентраторная фотоэлектрическая система со спектральным расщеплением потока солнечного излучения на основе линзы Френеля и двух дихроичных фильтров. Солнечные элементы на основе AlGaAs, GaAs выращены методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии. GaSb-фотопреобразователи получены диффузией цинка из газовой фазы в эпитаксиальный базовый слой или в подложку GaSb *n*-типа проводимости. Суммарная эффективность трех солнечных элементов, разработанных для модуля со спектральным расщеплением света, составила 39.6% (спектр AM 1.5D).

1. Введение

Значительное увеличение КПД преобразования солнечного излучения было достигнуто в концентраторных каскадных фотоэлектрических преобразователях (ФЭП) на основе $A^{III}B^V$ -структур [1–5]. В настоящее время основным направлением развития концентраторной солнечной энергетики является использование монокристаллических каскадных фотопреобразователей [3–6]. В таких ФЭП необходимо обеспечение близости значений постоянной решетки полупроводниковых материалов в структуре ФЭП и согласование различных каскадов солнечного фотопреобразователя по току для достижения предельных значений КПД. Кроме того, негативным обстоятельством является высокая стоимость технологического оборудования для МОС-гидридной эпитаксии, требующегося при выращивании монокристаллических каскадных ФЭП. В последние годы разрабатываются также системы со спектральным расщеплением солнечного излучения с последующим преобразованием пространственно разнесенных лучей однопереходными солнечными элементами [7–10]. Применение принципа спектрального расщепления света обеспечивает свободу выбора полупроводниковых материалов и позволяет создавать каскад из элементов с различной шириной запрещенной зоны E_g на основе структур с одним *p*–*n*-переходом. Это дает возможность упростить как сами ФЭП, так и способы их коммутации. Указанные преимущества позволяют прогнозировать получение большего КПД системы со спектральным расщеплением солнечного света при увеличении количества *p*–*n*-переходов, снижение стоимости концентраторных фотоэлектрических модулей за счет применения более доступных технологий изготовления ФЭП — жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и диффузии из газовой фазы, которые и были использованы в настоящей работе.

2. Экспериментальные результаты

2.1. Фотоэлектрический модуль с расщеплением солнечного спектра: конструкция и принцип действия

В работе создана и исследована оптическая система с расщеплением светового потока, состоящая из линзы Френеля и двух дихроичных зеркал, пространственно расщепляющих солнечное излучение на три спектральных диапазона. Для преобразования солнечного излучения в каждом из диапазонов использовались однопереходные солнечные элементы на основе AlGaAs, GaAs и GaSb, выращенные методом ЖФЭ. Селективные оптические элементы (дихроичные оптические фильтры) пространственно разделяют сконцентрированное линзой Френеля излучение на три световых потока с интервалами длин волн $\Delta\lambda_1 = 300\text{--}700$ нм, $\Delta\lambda_2 = 700\text{--}900$ нм и $\Delta\lambda_3 = 900\text{--}1800$ нм. Солнечные элементы для двух коротковолновых участков спектра были выполнены на основе тройного соединения $Al_xGa_{1-x}As$, где $x = 0.3\text{--}0.35$ (ширина запрещенной зоны $E_{g1} = 1.80\text{--}1.86$ эВ), и на основе бинарного соединения GaAs (ширина запрещенной зоны $E_{g2} = 1.42$ эВ) соответственно. Для длинноволнового спектрального диапазона было использовано соединение GaSb с шириной запрещенной зоны $E_{g3} = 0.72$ эВ. Линза Френеля имела площадь 6×6 см², а изготовленные фотопреобразователи — 3.5×3.5 мм².

На рис. 1 показана конструкция (оптическая схема) и приведена фотография разработанного фотоэлектрического модуля. Солнечное излучение концентрируется с помощью линзы Френеля 1 [11–13] и попадает на дихроичные фильтры 2, 3, которые расщепляют его на спектральные диапазоны, направляя к каждому из фотопреобразователей 4 (на основе AlGaAs), 5 (на основе GaAs), 6 (на основе GaSb) излучение того спектрального диапазона, которому соответствует фоточувствительность данного солнечного элемента. Фильтр 2 установлен перпендикулярно оптической оси модуля, фильтр 3 установлен под углом 45°.

[¶] E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

Спектральные характеристики пропускания света используемых дихроичных фильтров представлены на рис. 2. Фильтры изготавливались электронно-лучевым испарением с последующим осаждением на стеклянное основание 50 (и более) слоев окислов (ZrO_2 , Y_2O_3 , SiO_2).

2.2. Теоретическая оценка эффективности системы со спектральным расщеплением солнечного излучения

Созданная конструкция модуля с расщеплением светового потока позволяет осуществлять выбор оптималь-

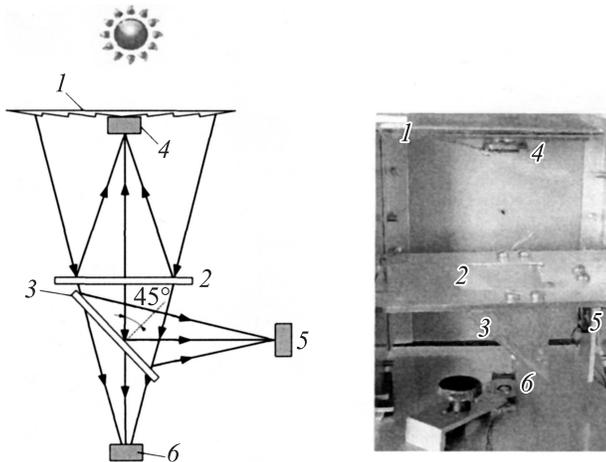


Рис. 1. Оптическая схема и фотография фотоэлектрического модуля с расщеплением солнечного спектра: 1 — линза Френеля; 2, 3 — дихроичные фильтры; 4 — верхний $Al_xGa_{1-x}As$ -фотоэлемент ($x = 0.3-0.35$); 5 — средний GaAs-фотоэлемент; 6 — нижний GaSb-фотоэлемент.

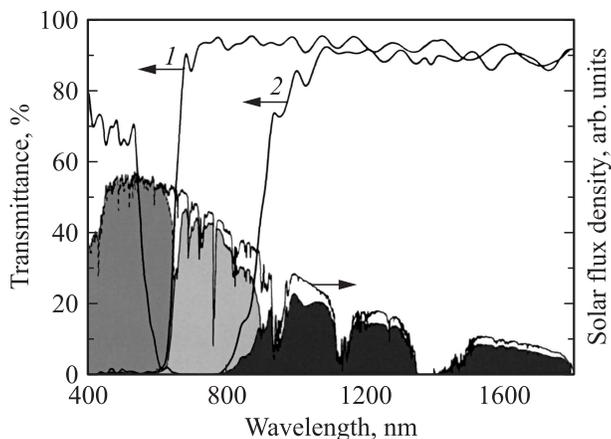


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания селективных фильтров от длины волны падающего излучения. 1 — фильтр, отражающий солнечное излучение на широкозонный элемент (2 на рис. 1), 2 — фильтр, отражающий солнечное излучение на средний GaAs-элемент (3 на рис. 1). Правая ось соответствует спектру солнечного излучения (AM 1.5D, Low AOD) до (верхняя кривая) и после (затемненные области под нижней кривой) расщепления светового потока селективными фильтрами.

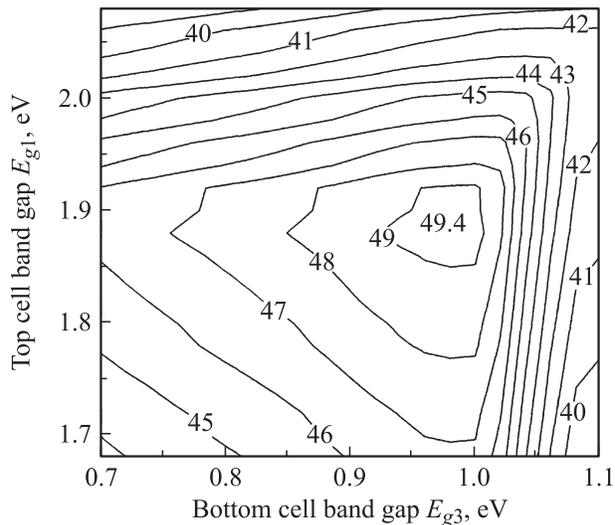


Рис. 3. Расчетная эффективность модуля со спектральным расщеплением солнечного излучения (AM 1.5D, кратность концентрации $K_c = 300$) на основе трех однопереходных элементов (средний элемент с $E_{g2} = 1.42$ эВ) в зависимости от значений E_{g1} и E_{g3} . Указаны значения эффективности в %.

ных полупроводниковых материалов и дает возможность управлять спектральным составом падающего на них излучения за счет изменения характеристик дихроичных фильтров. При разработке модуля было осуществлено компьютерное моделирование эффективности. Вычисления проводились для идеальных диодов по модели Шокли с использованием экспериментально полученных характеристик фильтров (рис. 2). На рис. 3 представлены результаты таких расчетов для системы из трех однопереходных фотопреобразователей со средним элементом на основе GaAs (см. рис. 1). При использовании полупроводниковых материалов с $E_{g1} = 1.88$ эВ, $E_{g2} = 1.42$ эВ и $E_{g3} = 1.0$ эВ расчетное значение эффективности достигает максимальной величины $\eta = 49.4\%$.

2.3. Солнечные элементы на основе AlGaAs и GaAs

Солнечные элементы для коротковолновой области спектра на основе $Al_xGa_{1-x}As$ с различным содержанием алюминия и GaAs (рис. 4, *a, b*) были изготовлены методом низкотемпературной ($< 600^\circ C$) эпитаксии из жидкой фазы [14–16]. Разработанная технология низкотемпературной жидкофазной эпитаксии ультратонких слоев в системе AlGaAs/GaAs в сочетании с оптимизацией уровня легирования *n*- и *p*-слоев, глубины залегания и профиля легирования *p*-*n*-перехода позволили получить фотопреобразователи на основе AlGaAs и GaAs, обеспечивающие высокоэффективное преобразование солнечной энергии.

Основными особенностями структур являются:

- улучшение сбора носителей из базовой области благодаря тыльному потенциальному барьеру;

– увеличение коротковолновой фоточувствительности благодаря уменьшению толщины фронтального слоя твердого раствора до 0.03–0.05 мкм.

Максимальная плотность фототока солнечного элемента с содержанием алюминия в базовом слое $x = 0.35$ (рис. 5), измеренная в условиях AM 1.5D для спектрального диапазона $\Delta\lambda = 340\text{--}690$ нм, состав-

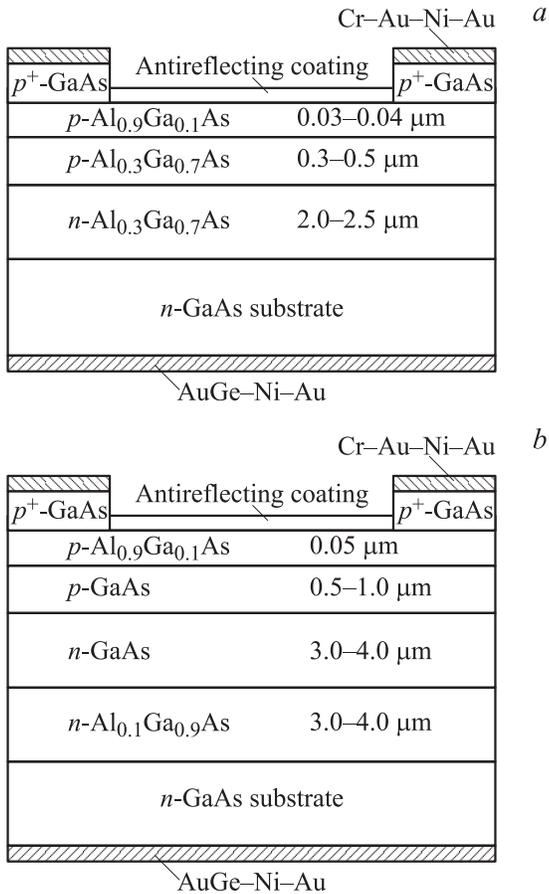


Рис. 4. Структуры солнечных элементов: *a* — на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $x = 0.3\text{--}0.35$; *b* — на основе GaAs.

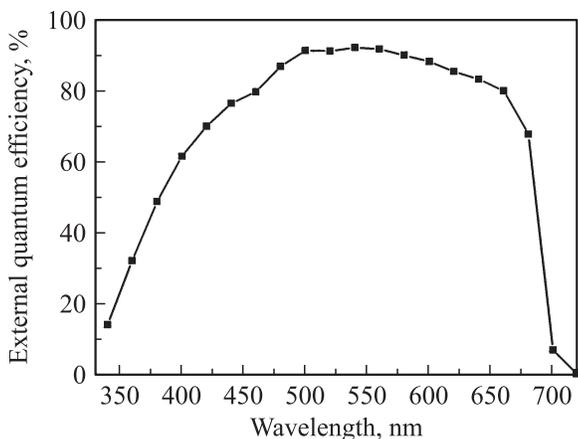


Рис. 5. Спектр фотоответа солнечного элемента на основе $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$.

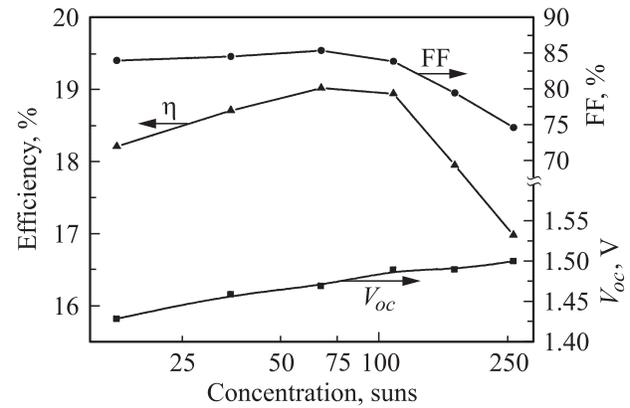


Рис. 6. Зависимости эффективности η , напряжения холостого хода V_{oc} и фактора заполнения вольт-амперной характеристики FF элемента на основе $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ от кратности концентрирования солнечного излучения (AM 1.5D, Low AOD).

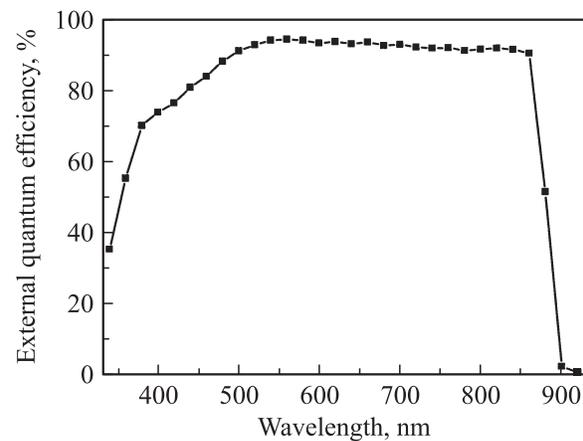


Рис. 7. Спектр фотоответа солнечного элемента на основе GaAs.

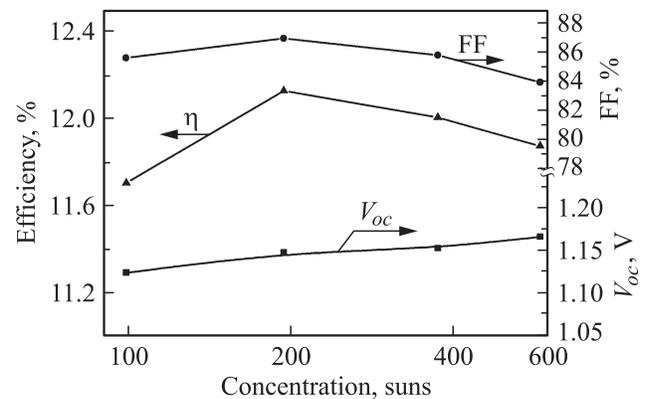


Рис. 8. Зависимость эффективности η , V_{oc} и FF солнечного элемента на основе GaAs от кратности концентрирования солнечного излучения (AM 1.5D, Low AOD).

ляет 15.2 мА/см^2 . Максимальная эффективность достигает $\eta = 19\%$ для кратности концентрирования $K_c = 66$ (AM 1.5D) и $\eta = 17.6\%$ для 200 „солнц“ (рис. 6).

Для солнечных элементов на основе GaAs (рис. 4, b) высокое кристаллическое совершенство выращенных слоев, а также снижение потерь на отражение позволили получить внешний квантовый выход, близкий к предельно возможному (более 90%) в широком спектральном диапазоне (рис. 7). Величина плотности фототока, измеренная в условиях AM 1.5D для спектрального диапазона $\Delta\lambda = 688\text{--}900\text{ нм}$, составила 12.13 мА/см^2 , максимальная эффективность преобразования $\eta = 12.1\%$ при кратности концентрирования ~ 200 „солнц“ (рис. 8).

2.4. Солнечные элементы на основе GaSb

Узкозонный элемент на основе GaSb (рис. 9) изготавливался методом двухстадийной диффузии Zn из газовой фазы [17,18] в эпитаксиальный базовый слой или в подложку GaSb *n*-типа проводимости. Низкотемпературная диффузия цинка в GaSb в сочетании с методами постдиффузионного прецизионного травления фронтальной сильно легированной части эмиттера структуры позволили воспроизводимо получать высокоэффективные солнечные элементы. Конструкция фотопреобразователя оптимизировалась для работы при высоких плотностях падающего излучения [19].

Проведенные исследования влияния эпитаксиального слоя на характеристики фотоэлектрических GaAs-преобразователей позволили установить, что наилучшими параметрами обладают фотоэлементы с базовым слоем

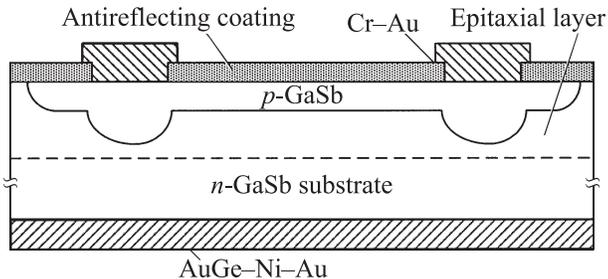


Рис. 9. Структура солнечного элемента на основе GaSb.

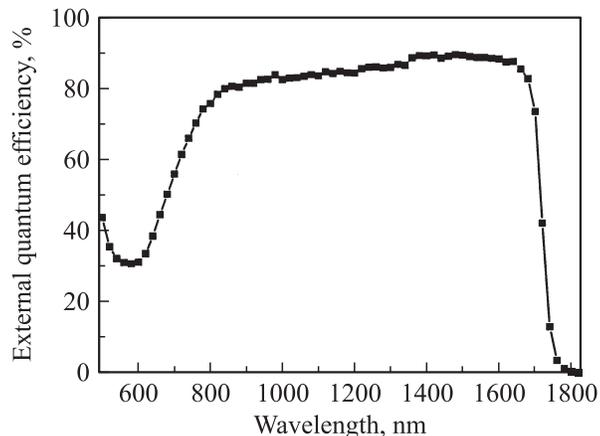


Рис. 10. Спектр фотоответа солнечного элемента на основе GaSb.

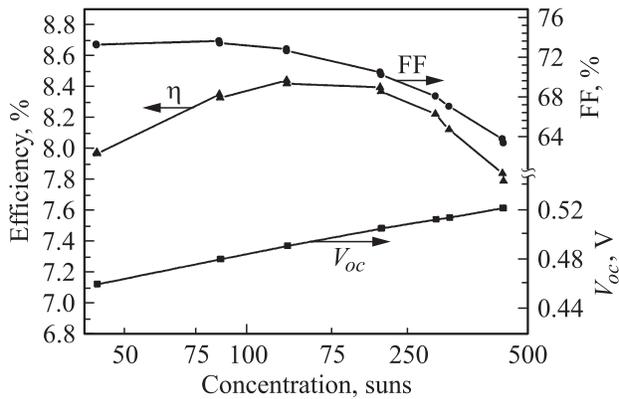


Рис. 11. Зависимости эффективности η , V_{oc} и FF элемента на основе GaSb от кратности концентрирования солнечного излучения. AM 1.5D, Low AOD, 1000 Вт/м^2 , $\Delta\lambda = 900\text{--}1840\text{ нм}$.

GaSb(Te), полученным при осаждении из обогащенного галлием расплава. Внешняя квантовая эффективность таких структур в спектральном диапазоне $0.9\text{--}1.8\text{ мкм}$ близка к 90% (рис. 10). Рис. 11 иллюстрирует зависимость эффективности, напряжения холостого хода V_{oc} и фактора заполнения вольт-амперной характеристики FF указанных фотопреобразователей для „усеченного“ спектрального диапазона $\Delta\lambda = 900\text{--}1840\text{ нм}$ при плотности фототока 23.51 мА/см^2 (AM 1.5D, 1000 Вт/м^2). Максимальный вклад GaSb-элементов в общую эффективность модуля составляет 8.44% при $K_c = 213$.

2.5. Суммарная эффективность каскада фотопреобразователей со спектральным расщеплением солнечного излучения

Эффективность солнечных элементов с различной шириной запрещенной зоны E_g , разработанных для системы со спектральным расщеплением солнечного излучения, представлена в таблице. Максимальная суммарная эффективность фотопреобразователей достигает 39.6%. Для кратности концентрирования $K_c = 200$ суммарная эффективность составляет 38.1%.

Большее значение КПД может быть достигнуто в системе с одним фильтром и двумя спектральными диапазонами преобразования солнечного излучения при использовании монолитных двухпереходных каскадных элементов, например, GaInP/GaAs и GaInAsP/GaInAs. Для двух фильтров и трех спектральных диапазонов возможно увеличение эффективности при использовании монолитного каскадного ФЭП GaInP/GaAs в сочетании с двумя узкозонными однопереходными элементами, например, на основе GaInAsP ($E_g = 1.05\text{ эВ}$) и GaSb ($E_g = 0.72\text{ эВ}$).

2.6. Характеристики модуля со спектральным расщеплением солнечного излучения

Оценка КПД тестового образца модуля со спектральным расщеплением света проводилась с использова-

Эффективность разработанных солнечных элементов для системы с расщеплением солнечного спектра

№ элемента	Тип элемента	E_g , эВ	Рабочий диапазон $\Delta\lambda$, нм	Эффективность при кратности концентрирования $K_c \approx 200$		Максимально достигнутые эффективности	
				η , %	K_c	η , %	
1	AlGaAs	1.86	340–688	17.56	66	19.01	
2	GaAs	1.42	688–900	12.12	194	12.13	
3	GaSb	0.72	900–1840	8.38	213	8.44	
Суммарное значение эффективности				38.06		39.58	

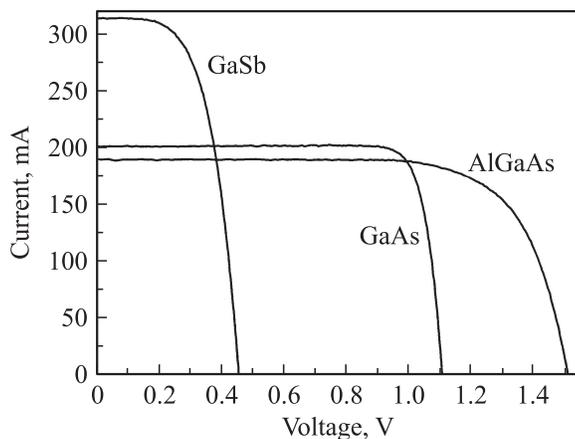


Рис. 12. Вольт-амперные характеристики трех однопереходных элементов, установленных в модуль со спектральным расщеплением света (импульсный солнечный имитатор, некоцентрированное излучение, AM 1.5D, Low AOD).

нием импульсного имитатора солнечного излучения (AM 1.5D, Low AOD). На рис. 12 представлены вольт-амперные характеристики трех солнечных элементов на основе AlGaAs, GaAs и GaSb, установленных в модуль с расщеплением света. Как следует из представленных на рисунке зависимостей, токи протестированных центрального (GaAs) и верхнего (AlGaAs) элементов почти совпадают. Фактор заполнения вольт-амперной характеристики AlGaAs-элементов, установленных в модуль, оказался заметно ниже значений, представленных в таблице, что связано с неоднородностью засветки, создаваемой линзой Френеля. Эффективность трех ФЭП (AlGaAs, GaAs, GaSb), установленных в модуль, составила соответственно 10.6, 9.7 и 4.4%.

3. Заключение

Методом ЖФЭ разработаны и изготовлены фотопреобразователи на основе AlGaAs, GaAs и GaSb. Суммарная максимальная эффективность (AM 1.5D, Low AOD) ФЭП, предназначенных для использования в системе со спектральным расщеплением солнечного излучения, составила 39.6%. Для кратности концентрирования $K_c = 200$ суммарная эффективность составила 38.1%.

Системы с расщеплением спектра позволяют использовать недорогую технологию изготовления каскада фотоэлектрических преобразователей, а также дают свободу выбора материалов для ФЭП и вида электрической коммутации фотоэлементов (параллельное или последовательное соединение), что в конечном итоге должно обеспечить увеличение общего КПД преобразования солнечного излучения и снижение стоимости „солнечного“ электричества.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 09-08-00243, 09-08-12202 и 09-08-12041).

Список литературы

- [1] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Rumyantsev. In: *Concentrator Photovoltaics*, ed. by A. Luque, V. Andreev [Springer Series in Optical Sciences (2007) v. 130] p. 25.
- [2] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Rumyantsev. In: *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics*, ed. by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger [Springer Series in Optical Sciences (2008) v. 140] p. 101.
- [3] W. Guter, J. Schöne, S.P. Philipps, M. Steiner, G. Siefer, A. Wekkeli, E. Welsler, E. Oliva, A.W. Bett, F. Dimroth. *Appl. Phys. Lett.*, **94** (22), 223 504 (2009).
- [4] D.C. Law, R.R. King, H. Yoon, M.J. Archer, A. Boca, C.M. Fetzer, S. Mesropian, T. Isshiki, M. Haddad, K.M. Edmondson, D. Bhusari, J. Yen, R.A. Sherif, H.A. Atwater, N.H. Karam. *Solar Energy Mater. & Solar Cells*, **94** (8), 1314 (2010).
- [5] F.D. Newman, D.J. Aiken, P.M. Patel, D.R. Chumney, I. Aeyb, R.W. Hoffman, P.R. Sharps. *Proc. 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Philadelphia, PA, 2009) p. 001 611.
- [6] В.М. Лантратов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Андреев. *ФТП*, **41** (6), 751 (2007).
- [7] L. Fraas, J. Avery, H. Huang, L. Minkin, E. Shifman. *Proc. IEEE 4th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (Hawaii, 2006).
- [8] A. Barnett, D. Kirkpatrick, C. Honsberg, D. Moore, M. Wanlass, K. Emery, R. Schwartz, D. Carlson, S. Bowden, S. Aiken, A. Gray, S. Kurtz, L. Kazmerski, M. Steiner, J. Gray, T. Davenport, R. Buelow, L. Takacs, N. Shatz, J. Bortz, O. Jani, K. Goossen, F. Kiamilev, A. Doolittle, I. Ferguson, B. Unger, G. Schmidt, E. Christensen, D. Salzman. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **17** (1), 75 (2009).

- [9] B. Groß, G. Peharz, G. Siefer, M. Peters, J.S. Goldschmidt, M. Steiner, W. Guter, V. Klinger, B. George, F. Dimroth. *Proc. 24th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Hamburg, 2009) p. 130.
- [10] X. Wang, N. Wait, P. Murcia, K. Emery, M. Steiner, F. Kiamilev, K. Goossen, C. Honsberg, A. Barnett. *Proc. 24th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Hamburg, 2009) p. 811.
- [11] V.D. Rumyantsev, V.M. Andreev, A.W. Bett, F. Dimroth, M. Hein, G. Lange, M.Z. Shvarts, O.V. Sulima. *Proc. 28th Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC 2000)* (Anchorage, Alaska, 2000) p. 1169.
- [12] V.D. Rumyantsev, O.I. Chosta, V.A. Grilikhes, N.A. Sadchikov, A.A. Soluyanov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. *Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC 2002)* (New Orleans, 2002) p. 1596.
- [13] V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.P. Khvostikov, O.A. Khvostikova, V.D. Rumyantsev, N.A. Sadchikov, M.Z. Shvarts. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **84**, 3 (2004).
- [14] V.P. Khvostikov, V.R. Larionov, E.V. Paleeva, S.V. Sorokina, O.L. Chosta, M.Z. Shvarts, N.S. Zimogorova. *Proc. 4th Europ. Space Power Conf.* (Poitiers, France, 1995) v. 2, p. 359.
- [15] V.P. Khvostikov, E.V. Paleeva, V.D. Rumyantsev, S.V. Sorokina, M.Z. Shvarts, V.I. Vasil'ev. *Proc. Intern. Solar Forum EuroSun'96* (Freiburg, 1996).
- [16] M. Milanova, V. Khvostikov. *J. Cryst. Growth*, **219**, 193 (2000).
- [17] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, V.D. Rumyantsev, S.V. Sorokina, V.I. Vasil'ev. *Proc. 4th NREL Conf. on Thermophotovoltaic Generation of Electricity* (Denver, 1998) p. 384.
- [18] В.М. Андреев, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. *ФТП*, **43** (5), 695 (2009).
- [19] V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, A.S. Vlasov, M.Z. Shvarts, N.Kh. Timoshina, V.M. Andreev. *Proc. 24th Europ. PV Solar Energy Conference and Exhibition* (Hamburg, 2009) p. 174.

Редактор Л.В. Шаронова

High efficient (39.6%, AM 1.5D) cascade of photoconverters in solar splitting systems

V.P. Khvostikov, A.S. Vlasov, S.V. Sorokina,
N.S. Potapovich, N.Kh. Timoshina, M.Z. Shvarts,
V.M. Andreev

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

Abstract A concentrator photovoltaic module with a spectral splitting system for solar radiation has been developed. The module is based on a Fresnel lens and two dichroic filters. Solar cells based of AlGaAs and GaAs are grown by low-temperature liquid phase epitaxy. GaSb based solar cells are obtained by Zn diffusion from the gas phase into an epitaxial layer or a GaSb substrate of *n*-type conductivity. The total efficiency of three solar cells, developed for the spectral splitting module reached 39.6% (AM 1.5D spectrum).