

/ R. H. Akchurin, A. A. Marmalyuk. // *Materialovedenie*. – 2001. – N 10. – S. 21–29.

3. **Liday, J.** Ohmic contacts to p-GaN using Au/Ni-Mg-O metallization / J. Liday, A. Bonanni, H. Sitter, G. Vanko, J. Breza, G. Ecke. // *J. Electrical Eng.* – 2010. – V. 61, N 6. – P. 378–381.

4. **Nakamura, S.** Thermal annealing effects on p-type Mg-doped GaN films / S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, N. Iwasa // *Jap. J. Appl. Phys.* – 1992. – V. 31. – P. L139.

5. **Nagamori, M.** Optimum rapid thermal activation of Mg-doped p-type GaN / M. Nagamori, S. Ito, H. Saito, K. Shiojima, S. Yamada, N. Shibata, M. Kuzuhara. // *Jap. J. Appl. Phys.* – 2008. – V. 47, N 4. – P. 2865–2867.

6. **Protzmann, H.** Uniformity control of group-III nitrides grown on 5×3 inch Al₂O₃ substrates in planetary reactors / H. Protzmann, M. Luennenbuenger, M. Bremser, M. Heuken, H. Juergensen. // *J. Cryst. Growth*. – 2000. – V. 221. – P. 629–634.

7. **Christiansen, K.** Advances in MOCVD technology for research, development and mass production of compound semiconductor devices / K. Christiansen, M. Luennenbuenger, B. Schineller,

M. Heuken, H. Juergensen. // *Opto-Electronics Rev.* – 2002. – V. 10, N 4. – P. 237–242.

8. **Pearton, S. J.** GaN: Processing, defects, and devices / S. J. Pearton, J. C. Zolper, R. J. Shul, F. Ren // *J. Appl. Phys.* – 1999. – V. 86. – P. 1.

9. **Matsuoka, T.** Growth and properties of a wide-gap semiconductor InGaN / T. Matsuoka, T. Sasaki, A. Katsui. // *Optoelectronics – Dev. and Technol.* – 1990. – V. 5, N 1. – P. 53–64.

10. **Mastro, M. A.** Thermal Stability of MOCVD and HVPE GaN layers in H₂, HCl, NH₃ and N₂ / M. A. Mastro, O. M. Kryliouk, M. D. Reed, T. J. Anderson, A. Davydov, A. Shapiro // *Phys. status solidi. (a)*. – 2001. – V. 188. – P. 467.

11. **Kumara, M. S.** Thermal stability of GaN epitaxial layer and GaN/sapphire interface / M. S. Kumara, G. Soniaa, V. Ramakrishnan, R. Dhanasekaran, J. Kumar // *Physica. B*. – 2002. – V. 324. – P. 223.

12. **Götz, W.** Activation of acceptors in Mg-doped GaN grown by metalorganic chemical vapor deposition / W. Götz, N. M. Johnson, J. Walker, D. P. Bour, R. A. Street // *Appl. Phys. Lett.* – 1996. – V. 68, Iss. 5. – P. 667.

УДК 621.315.592

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В СИСТЕМЕ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАСЩЕПЛЕНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

© 2013 г. С. Ю. Курин¹, В. Д. Доронин², А. А. Антипов¹, Б. П. Папченко³,
Х. Хелава⁴, М. И. Воронова⁵, А. С. Усиков¹, Ю. Н. Макаров^{1, 4}, К. Б. Эйдельман⁵

¹ ООО «Галлий–Н»,

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

³ Национальный исследовательский университет «ИТМО»,

⁴ Nitride Crystals Inc.,

⁵ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Представлены результаты моделирования фотоэлектрических преобразователей в системе со спектральным расщеплением солнечной энергии, в которой солнечное излучение разделяется с помощью дихроичных фильтров на три спектральных диапазона ($\Delta\lambda_1 < 500$ нм, $\Delta\lambda_2 = 500\text{--}725$ нм, $\Delta\lambda_3 > 725$ нм) и затем преобразуется в электроэнергию фотоэлектрическими преобразователями на основе однопереходных гетероструктур InGaN/GaN, GaAs/AlGaAs и монокристаллического кремния c-Si. Особое внимание уделено исследованию расширения спектрального диапазона поглощения системы за счет более эффективного преобразования ультрафиолетовой части спектра. Суммарный КПД системы на всем спектре варьируется от 21 до 37 % в зависимости от дизайна гетероструктур однопереходных фотоэлектрических преобразователей и вариантов оптических систем.

Ключевые слова: солнечный элемент, спектральное расщепление, нитрид галлия, арсенид галлия, фотоэлектрический преобразователь, линза Френеля, дихроичный фильтр.

Введение

В настоящее время основными направлениями развития концентраторной солнечной энергетики является использование монолитных каскадных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе A^{III}B^V-структур [1–4]. При создании таких ФЭП часто возникают проблемы, связанные с необходимостью обеспечения близости значений постоянной решетки полупроводниковых материалов в структуре ФЭП и согласования различных каскадов ФЭП по току. В связи с этим рабочий диапазон монолитных каскадных ФЭП является довольно узким (не покрывает значительную часть инфракрасного участка спектра и практически не задействует ультрафиолетовую часть спектра), что ограничивает возможность

достижения высокого КПД в таких структурах. Кроме того, создание монолитных каскадных ФЭП является технологически сложным процессом, так как наличие нескольких каскадов приводит к увеличению числа гетерограниц и коммутационных туннельных диодов, что влечет за собой возрастание внутренних потерь и, в частности, увеличение последовательного сопротивления ФЭП.

Для решения указанных выше проблем разрабатываются системы со спектральным расщеплением солнечного излучения с последующим преобразованием пространственно-разнесенных лучей однопереходными солнечными элементами [5–8]. Применение принципа спектрального расщепления света обеспечивает свободу выбора полупроводниковых материалов и позволяет

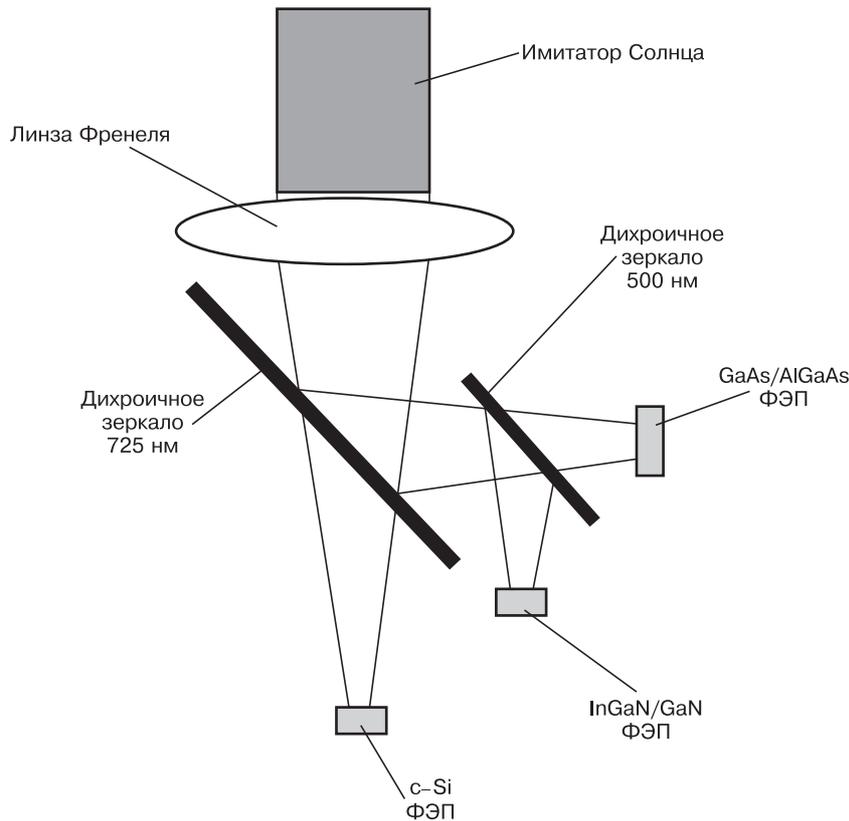


Рис. 1. Схема фотоэлектрических преобразователей в системе со спектральным расщеплением солнечной энергии

создавать каскад из элементов с различной шириной запрещенной зоны на основе структур с одним $p-n$ -переходом, позволяя существенно расширить спектральный диапазон преобразования солнечного излучения в электричество и в конечном счете добиться увеличения КПД. Кроме того, это дает возможность упростить как сами ФЭП, так и способы их коммутации. Данный подход, который использовали и в настоящей работе, также позволяет значительно продвинуться в решении проблемы потерь на термализацию носителей.

Описание модели для расчета фотоэлектрического преобразователя

Проведены расчеты оптической системы (рис. 1) с расщеплением светового потока, состоящей из линзы Френеля, концентрирующей солнечное излучение, и дихроичных фильтров (зеркал), пространственно разделяющих сконцентрированное излучение на три световых потока с интервалами длин волн (энергий) $\Delta\lambda_1 < 500$ нм ($\Delta E_1 > 2,48$ эВ), $\Delta\lambda_2 = 500 \div 725$ нм ($\Delta E_2 = 1,7 \div 2,48$ эВ), $\Delta\lambda_3 > 725$ нм ($\Delta E_3 < 1,7$ эВ). Для преобразования коротковолнового участка спектра ($\Delta\lambda_1 < 500$ нм) выбран ФЭП на основе гетероструктуры InGaN/GaN с одним $p-n$ -переходом. Следует отметить, что в работах (например [9–11]), посвященных системам со спектральным расщеплением солнечного излучения, вопрос

преобразования ультрафиолетовой (УФ) части спектра практически не затрагивается. Между тем нитриды металлов III группы являются единственным полупроводниковым материалом, потенциально способным эффективно преобразовывать солнечное излучение УФ-диапазона в электрическую энергию. Для преобразования двух длинноволновых участков спектра ($\Delta\lambda_2 = 500 \div 725$ нм и $\Delta\lambda_3 > 725$ нм) выбраны ФЭП на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с одним $p-n$ -переходом и монокристаллического кремния c-Si соответственно.

Расчет КПД ФЭП проводили с использованием исследовательского кода, в основе которого лежит метод конечных элементов. Предполагали, что гетероструктуры ФЭП выращены псевдоморфно. При моделировании за основу был взят спектр солнечного излучения AM1.5-Global (плотность мощности $1002,9$ Вт/м²). При описании модели поглощения света предполагали, что свет падал нормально на поверхность ФЭП. Согласно мо-

дели, концентрации электронов и дырок подчинялись статистике Ферми—Дирака. Темп генерации электронно-дырочных пар $G_j(z)$ в точке с координатой z эпитаксиального слоя j описывали следующим выражением:

$$G_j(z) = M \int_0^{\infty} \frac{dE}{E} \alpha_j(z) n_j(z) I_j(z, E) P(E),$$

где M — концентрация солнечного излучения; $\alpha_j(z)$ — коэффициент поглощения в точке с координатой z эпитаксиального слоя j ; $n_j(z)$ — коэффициент преломления в точке с координатой z эпитаксиального слоя j ; $I_j(z, E)$ — интенсивность света с энергией E в точке с координатой z эпитаксиального слоя j ; $P(E)$ — спектральная плотность мощности, соответствующая спектру AM1.5-Global.

Моделирование работы ФЭП проводили на основе дрейф-диффузионного подхода к описанию транспорта неравновесных электронов и дырок. Численное решение уравнений непрерывности и уравнения Пуассона выполняли с использованием различных граничных условий (свободная поверхность, омический контакт) и внешних воздействий (приложенное напряжение).

Все расчеты проводили без учета оптических потерь и при концентрации солнечного излучения $M = 1000$. При моделировании спектр солнечного излучения разбивали на три интервала: $\Delta E_1 > 2,48$ эВ, $\Delta E_2 = 1,7 \div 2,48$ эВ и $\Delta E_3 < 1,7$ эВ (рис. 2).

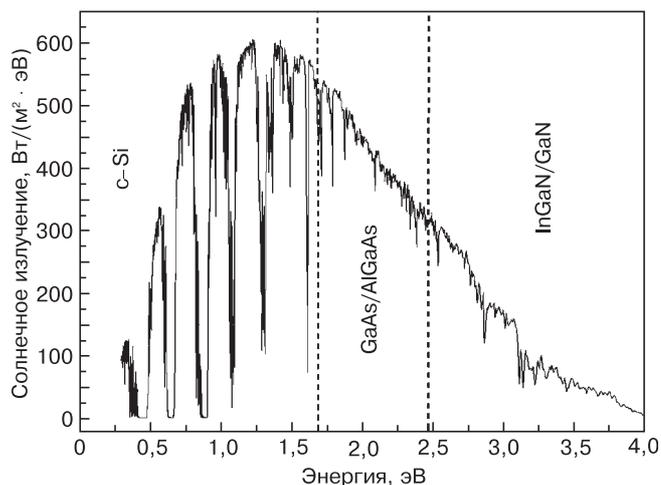


Рис. 2. Разбиение спектра AM1.5–Global на три части

Таблица 1

Основные параметры полупроводниковых материалов, принятые при моделировании

Параметр	Полупроводниковый материал		
	InGaN/ GaN	GaAs/ AlGaAs	c–Si
Подвижность электронов, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	400	6000	1350
Подвижность дырок, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	50	400	400
Плотность дислокаций, см^{-2}	10^8	10^5	10^8

В табл. 1 приведены основные параметры полупроводниковых материалов InGaN/GaN, GaAs/AlGaAs, c–Si, принятые при моделировании. При выборе параметров использовали данные из источников [9, 12–14].

Результаты моделирования

Для однопереходного ФЭП на основе гетероструктуры InGaN/GaN в качестве базовой была взята гетероструктура, представленная в табл. 2.

Для данной гетероструктуры была подобрана оптимальная толщина слоя $\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N}$ (1370 нм), обеспечивающая максимальный КПД на всем спек-

Таблица 2

Базовая гетероструктура ФЭП InGaN/GaN

Состав слоя	Толщина слоя, нм	Атомные концентрации легирующих примесей, см^{-3}
GaN	130	$N_a = 10^{20}$
$\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N}$	900	$N_d = 10^{16}$
GaN	270	$N_d = 9 \cdot 10^{18}$

Примечание. Здесь и далее: N_a , N_d — обозначены атомные концентрации акцепторной и донорной примеси соответственно

тре излучения. Последующая оптимизация происходила путем введения линейного изменения состава твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ на интерфейсах GaN/InGaN и InGaN/GaN с целью устранения характерных для нитридов особенностей на зонной диаграмме (разрывов валентной зоны и зоны проводимости), препятствующих свободному движению носителей заряда по гетероструктуре (аналогичный подход рассмотрен также в работе [12]). После оптимизации структура имела вид, представленный в табл. 3.

Оптимизированная гетероструктура ФЭП InGaN/GaN продемонстрировала КПД 45,1 % в диапазоне энергий $\Delta E_1 > 2,48$ эВ, а на полном спектре — 8,25 %. Зависимость КПД от напряжения приведена на рис. 3.

Кроме того, исследовали однопереходный ФЭП на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs, параметры которой приведены в табл. 4.

Данный ФЭП показал максимальный КПД 53,9 % в спектральном диапазоне $\Delta E_2 = 1,7+2,48$ эВ. На полном спектре КПД составил 36,4 %. Зависимость КПД от напряжения приведена на рис. 4.

Для ФЭП на основе c–Si в качестве базовой была выбрана структура p–Si/n–Si с толщиной слоя p–Si 25 мкм (табл. 5). При этом характеристики ФЭП с толщиной слоя p–Si, соответствующей стандартной

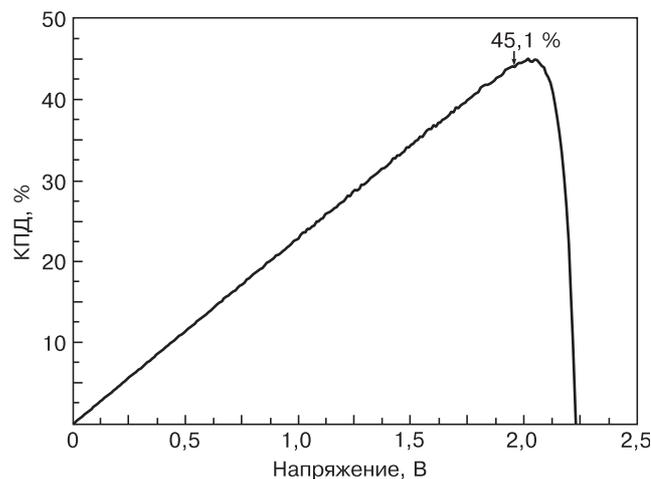


Рис. 3. Зависимость КПД ФЭП на основе InGaN/GaN от напряжения

Таблица 3

Оптимизированная гетероструктура ФЭП InGaN/GaN

Состав слоя	Толщина слоя, нм	Атомные концентрации легирующих примесей, см^{-3}
p– $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0,16 \geq x \geq 0$)	130	$N_a = 10^{20}$
$\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{N}$	1370	$N_d = 10^{16}$
n– $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 0,16$)	30	$N_d = 9 \cdot 10^{18}$
n–GaN	240	$N_d = 9 \cdot 10^{18}$

Таблица 4

Гетероструктура ФЭП GaAs/AlGaAs

Состав слоя	Толщина слоя, нм	Атомные концентрации легирующих примесей, см ⁻³
p-Al _{0,9} Ga _{0,1} As	50	N _a = 7 · 10 ²⁰
GaAs	750	N _d = 7 · 10 ¹⁶
n-GaAs	3500	N _d = 9 · 10 ¹⁸
n-Al _{0,1} Ga _{0,9} As	3500	N _d = 9 · 10 ¹⁸

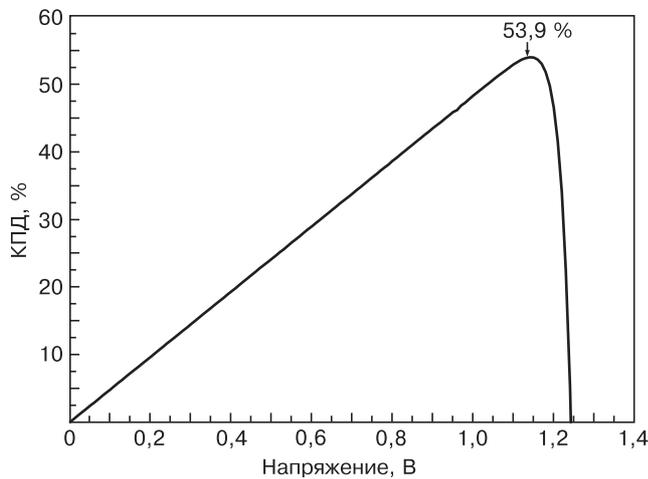


Рис. 4. Зависимость КПД ФЭП на основе GaAs/AlGaAs от напряжения

Таблица 5

Базовая структура ФЭП c-Si

Состав слоя	Толщина слоя, нм	Атомные концентрации легирующих примесей, см ⁻³
n-Si	20	N _d = 8 · 10 ¹⁹
p-Si	25000	N _a = 7 · 10 ²⁰

толщине подложки p-Si 495 мкм, практически не отличались от характеристик базового ФЭП.

Важно отметить, что из-за низкого коэффициента поглощения c-Si в диапазоне энергий ΔE₃ < 1,7 эВ КПД данного ФЭП в указанном диапазоне был также низким — порядка 2,6 %. Зависимость КПД от напряжения приведена на рис. 5. Максимальный КПД 18,9 % для c-Si был достигнут в диапазоне

ΔE₁ > 2,48 эВ. Для аналогичной структуры, рассматриваемой на полном спектре, КПД составил 10,2 %, поэтому для спектрального диапазона ΔE₃ < 1,7 эВ целесообразнее использовать ФЭП на основе других узкозонных полупроводников, например германия или антимонидов.

Суммарный КПД η был рассчитан как сумма произведений КПД отдельных ФЭП при концентрации M = 1000 (η_i, i = InGaN/GaN, GaAs/AlGaAs, c-Si) на соответствующую долю интегральной плотности мощности излучения (k_i, i = InGaN/GaN, GaAs/AlGaAs, c-Si), приходящуюся на рабочий спектральный диапазон каждого ФЭП:

$$\eta = \sum_i (\eta_i k_i) = \eta_{\text{InGaN/GaN}} k_{\text{InGaN/GaN}} + \eta_{\text{GaAs/AlGaAs}} k_{\text{GaAs/AlGaAs}} + \eta_{\text{c-Si}} k_{\text{c-Si}}$$

Расчет суммарного КПД приведен в табл. 6.

На рис. 6 представлены результаты моделирования ВАХ трех ФЭП на основе гетероструктур InGaN/GaN, GaAs/AlGaAs и c-Si, установленных в модуль со спектральным расщеплением света.

В случае использования неоптимизированных ФЭП на основе гетероструктур InGaN/GaN и GaAs/AlGaAs, а также c-Si суммарный КПД снизился до 21 %. После замены ФЭП c-Si на ФЭП GaAs/AlGaAs (аналогичный рассмотренному в диапазоне ΔE₂ = 1,7÷2,48 эВ) КПД увеличился до 37 %. Таким об-

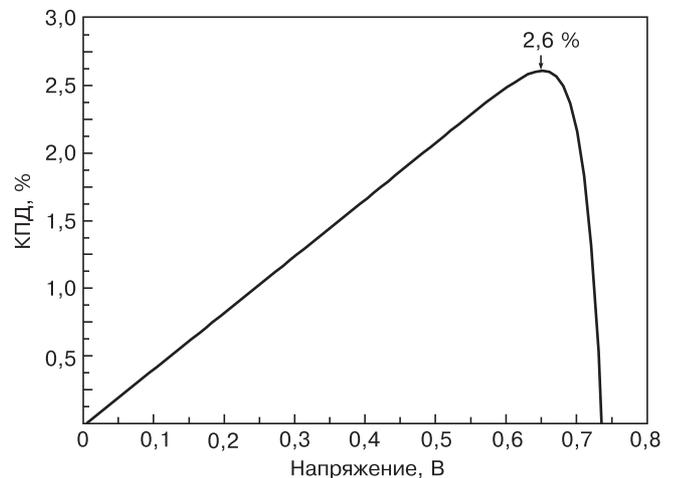


Рис. 5. Зависимость КПД ФЭП на основе c-Si от напряжения

Таблица 6

Расчет полного КПД системы из трех ФЭП

ФЭП (i)	Рабочий диапазон Δλ, нм	КПД при концентрации M = 1000 (η _i), %	Доля интегральной плотности мощности излучения (k _i), %	Произведение (η _i · k _i), %
InGaN/GaN	<500	45,1	18,3	8,3
GaAs/AlGaAs	500—725	53,9	32,8	17,7
c-Si	>725	2,6	48,9	1,3
Суммарный КПД (∑ _i η _i k _i), %				27,3

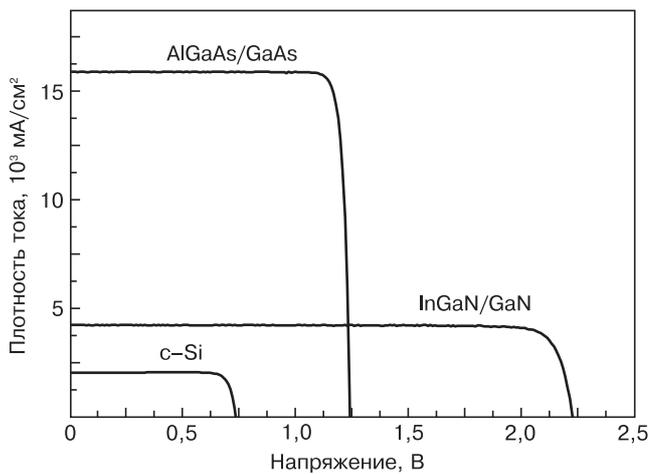


Рис. 6. ВАХ трех однопереходных элементов, установленных в модуль со спектральным расщеплением света

разом, в зависимости от дизайна гетероструктур однокаскадных ФЭП и вариантов оптических систем суммарный КПД (на всем спектре) системы со спектральным расщеплением солнечного излучения варьировался от 21 до 37 %.

Заключение

Исследованы однокаскадные ФЭП на основе гетероструктур InGaN/GaN, GaAs/AlGaAs и c-Si. После оптимизации дизайна гетероструктур ФЭП получены следующие максимальные КПД: в диапазоне $\Delta E_1 > 2,48$ эВ (InGaN/GaN) — 45,1 %; в диапазоне $\Delta E_2 = 1,7\div 2,48$ эВ (GaAs/AlGaAs) — 53,9 %; в диапазоне $\Delta E_3 < 1,7$ эВ (c-Si) — 2,6 %. Суммарный КПД (на всем спектре) для рассматриваемой системы составил 27,3 %. Низкий КПД c-Si обусловлен низким коэффициентом поглощения данного материала в указанном диапазоне (максимальный КПД 18,9 % для c-Si был достигнут в диапазоне $> 2,48$ эВ). После замены c-Si на гетероструктуру GaAs/AlGaAs (аналогичную рассмотренной в диапазоне $\Delta E_2 = 1,7\div 2,48$ эВ) КПД увеличился до 37 %. Установлено, что в диапазоне $\Delta E_3 < 1,7$ эВ целесообразнее использовать ФЭП на основе германия или антимоноидов.

Библиографический список

1. Guter, W. W. Current-matched triple junction solar cell reaching 41,1 % conversion efficiency under contrated sunlight / W. W. Guter, J. Schone, S. P. Philipps, M. Steiner, G. Siefer, A. Wekkeli,

E. Welser, E. Oliva, A. W. Bett, F. Dimroth // Appl. Phys. Lett. — 2009. — V. 94, Iss. 22. — P. 223504.

2. Law, D. C. Future technology pathways of terrestrial III-V multijunction solar cells for concentrator photovoltaic systems / D. C. Law, R. R. King, H. Yoon, M. J. Archer, A. Boca, C. M. Fetzer, D. Mesropian, T. Isshiki, M. Haddad, K. M. Edmondson, D. Bhusari, J. Yen, R. A. Sherif, H. A. Atwater, N. H. Karam // Sol. Energy Mater. and Sol. Cells. — 2010. — V. 94, N 8. — P. 1314—1318.

3. Newman, F. D. Optimization of inverted metamorphic multijunction solar cells for field-deployed concentrating PV systems/ F. D. Newman, D. J. Aiken, P. M. Patel, D. R. Chumney, I. Aebly, R. W. Hoffman, P. R. Sharps // Proc. 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. — Philadelphia (PA), 2009. — P. 001611.

4. Lantratov, V. M. Vysokoeffektivnyye dvuhperehodnye GaInP/GaAs solnechnye elementy, poluchennyye metodom MOS-gidridnoi epitaksii / V. M. Lantratov, N. A. Kalyuzhnyi, S. A. Mintairov, N. H. Timoshina, M. Z. Shvarc, V. M. Andreev // FTP. — 2007. — T. 41, Iss. 6. — P. 751—755.

5. Fraas, I. Demonstration of a 33 % efficient Cassegrainian solar modul / I. Fraas, J. Avery, H. Huang, L. Minkin, E. Shifman // Proc. IEEE 4th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. — Hawaii, 2006.

6. Barnett, A. Very high efficiency solar cell modules / A. Barnett, D. Kirkpatrick, C. Honsberg, D. Moore, M. Wanlass, K. Emery, R. Schwartz, D. Carlson, S. Bowden, D. Aiken, A. Gray, S. Kurtz, L. Kazmerski, M. Steiner, J. Gray, T. Davenport, R. Buelow, L. Takacs, N. Shtatz, J. Bortz, O. Jani, K. Goossen, F. Kiamilev, A. Doolittle, I. Ferguson, B. Unger, G. Schmidt, E. Christensen, D. Salzman // Progr. Photovolt.: Res. Appl. — 2009. — V. 17, N 1. — P. 75.

7. Groß, B. Highly efficient light splitting photovoltaic receiver / 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.

8. Wang, X. Outdoor Measurements for High Efficiency Solar Cell Assemblies / X. Wang, N. Wait, P. Murcia, K. Emery, M. Steiner, F. Kiamilev, K. Goossen, C. Honsberg, A. Barnett // Ibid. — Hamburg, 2009. — P. 811.

9. Hvostikov, V. P. Vysokoeffektivnyi ($\eta = 39,6$ %, AM 1.5D) kaskad fotopreobrazovatelye v sisteme so spektral'nym rasshepleniem solnechnogo izlucheniya / V. P. Hvostikov, A. S. Vlasov, S. V. Sorokina, N. S. Potapovich, N. H. Timoshina, M. Z. Shvarc, V. M. Andreev // FTP. — 2011. — T. 45, Iss. 6. — P. 810—815.

10. Barnett, A. Initial test bed for very high efficiency solar cells / A. Barnett, X. Wang, N. Waite, P. Murcia, C. Honsberg, D. Kirkpatrick, D. Laubacher, F. Kiamilev, K. Goossen, M. Wanlass, M. Steiner, R. Schwartz, J. Gray, A. Gray, P. Sharps, K. Emery, L. Kazmerski // Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf. — San Diego, 2008. — P. 1563.

11. Khvostikov, V. P. Single-junction solar cells for spectrum splitting PV system / V. P. Khvostikov, S. V. Sorokina, N. S. Potapovich, A. S. Vlasov, M. Z. Shvarts, N. Kh. Timoshina, V. M. Andreev // Proc. 25th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition. — Valencia, 2010. — P. 167—171.

12. Brown, G. F. Finite element simulations of compositionally graded InGaIn solar cells / G. F. Brown, J. W. Ager, W. Walukiewicz, J. Wu // Sol. Energy Materials and Sol. Cells. — 2010. — V. 94, Iss. 3. — P. 478—483.

13. Shen, X. Simulation of the InGaIn-based tandem solar cells / X. Shen, S. Lin, F. Li, Y. Wei, S. Zhong, H. Wan, J. Li // Proc. SPIE 7045. Photovoltaic Cell and Module Technologies II, 70450E. — 2008.

14. Semiconductors on NSM // <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/>

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (государственный контракт от 16 марта 2012 г. № 12.527.12.3001).