

УДК 621.382.2/3

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОПЕРЕХОДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ОДНОСТАДИЙНЫМ И ДВУСТАДИЙНЫМ МЕТОДОМ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ТРАВЛЕНИЯ

***Е.В. Контрош¹, А.В. Малевская¹, Н.М. Лебедева¹, Е.А. Гребенщикова¹,
Л.В. Контрош², Н.Д. Ильинская¹, В.С. Калиновский¹***

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

РФ 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

тел. 8(812) 297-22-45

²СПбГЭТУ им. В.И. Ленина

РФ 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5

тел. 8(812) 346-29-23; e-mail: kontrosh@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.009

Заключение совета рецензентов: 07.10.15 Заключение совета экспертов: 12.10.15 Принято к публикации: 19.10.15

В данной работе проведено исследование влияния постростовой технологии на фотоэлектрические характеристики многопереходных солнечных элементов. Выполнены исследования различных методов химического жидкостного травления структуры многопереходных солнечных элементов (МП СЭ) *GaInP/GaAs/Ge*, проведен анализ темновых вольтамперных характеристик (ВАХ), определено влияние постростовой технологии на эффективность солнечных элементов. Предложен метод одностадийного разделительного травления структуры, обеспечивающий гладкую боковую поверхность мезы, надежную пассивацию, хорошую стабильность характеристик и высокую эффективность преобразования концентрированного солнечного излучения.

В результате проведенных исследований установлено, что применение предложенного метода формирования мезы МП СЭ позволяет снизить поверхностные токи утечки, повысить качество пассивации боковой поверхности мезы чипов и, следовательно, увеличить выход годных многопереходных СЭ до 90–95 % с КПД больше 35 %, ($C = 10...100$, АМО, 1 367 Вт/м²). Кроме того, технология одностадийного разделительного травления снижает количество операций, стоимость производства чипов и повышает надёжность при эксплуатации СЭ.

Данная разработка может применяться для создания высокоэффективных наногетероструктурных концентраторных многопереходных солнечных элементов как для наземных, так и для космических целей.

Ключевые слова: многопереходные солнечные элементы, солнечная энергетика, химическое жидкостное травление.

STUDY OF THE PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS OF MULTI-JUNCTION SOLAR CELLS FABRICATED BY ONE-STEP AND TWO-STEP SEPARATION ETCHING

***E.V. Kontrosh¹, A.V. Malevskaya¹, N.M. Lebedeva¹, E.A. Grebenschikova¹,
L.V. Kontrosh², N.D. Il`inskaya¹, V.S. Kalinovsky¹***

¹Ioffe Physical-Technical Institute

26 Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, 194021 Russian Federation

ph.: 8(812) 297-22-45

²Electrotechnical University "LETI"

5 Professor Popov str., St. Petersburg, 197376 Russian Federation

ph.: 8(812) 297-22-45, e-mail: kontrosh@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.19.009

Referred 7 October 2015 Received in revised form 12 October 2015 Accepted 19 October 2015

The present work investigates the influence of the post-growth technology on solar cell photovoltaic characteristics. Moreover, it researches the various methods of chemical wet etching of multi-junction *GaInP/GaAs/Ge* solar cell mesa structures. The paper pays attention to the analysis of the initial dark current-voltage characteristics and the in-

fluence of the post-growth technology on the solar cell efficiency. It suggests the method of one-step separation etching of the mesa structure providing its smooth side surface, a reliable passivation, good stability of characteristics and high conversion efficiency of concentrated solar radiation.

As a result of the research, it has been established that application of the proposed method for forming mesa multi-junction solar cells allows reducing the surface leakage current, improving the quality of passivation mesa side surface of a chip and, consequently, increasing the yield of multijunction solar cells up to 90–95% with an efficiency greater than 35% at sunlight concentration $C = 10 \dots 100$. The technology of one-step separation etching reduces the number of operations, the manufacturing cost of the chips and improves the reliability of the solar cell operation.

Keywords: multi-junction solar cells, solar energy, chemical wet etching.



Контрош Евгений Владимирович
Evgeny V. Kontrosh

Сведения об авторе: магистр, аспирант, ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Образование: СПбГУ Петра Великого.

Область научных интересов: солнечная энергетика, полупроводники, однопереходные и многопереходные наногетероструктурные концентраторные солнечные элементы.

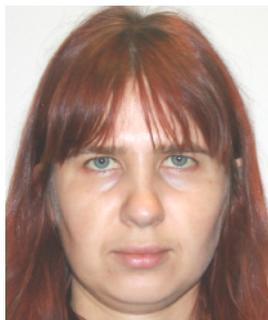
Публикации: 9.

Information about the author: MA, postgraduate, Ioffe Institute.

Education: St. Petersburg Polytechnic University.

Research area: solar energy, semiconductors, single and multi-junction nanostructural concentrate solar cells.

Publications: 9.



Малевская Александра Вячеславовна
Alexandra V. Malevskaya

Сведения об авторе: младший научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Образование: СПбГУ Петра Великого.

Область научных интересов: Солнечная энергетика, физика и химия полупроводников, однопереходные и многопереходные наногетероструктурные концентраторные солнечные элементы, фотолитография.

Публикации: 20.

Information about the author: Jr. researcher, Ioffe Institute.

Education: St. Petersburg Polytechnic University.

Research area: solar energy, physics and chemistry of semiconductors, single and multi-junction nanostructural concentrate solar cells, photolithography.

Publications: 20.



Лебедева Наталья Михайловна
Nataliya M. Lebedeva

Сведения об авторе: аспирант, ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Образование: СПбГЭТУ им. В.И. Ленина.

Область научных интересов: солнечная энергетика, физика полупроводников и диэлектриков, однопереходные и многопереходные наногетероструктурные концентраторные солнечные элементы, фотолитография.

Публикации: 7.

Information about the author: postgraduate, Ioffe Institute.

Education: Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg.

Research area: solar energy, physics of semiconductors and dielectrics, single and multi-junction nanostructural concentrate solar cells, photolithography.

Publications: 7.



Гребенщикова Елена Александровна
Elena A. Grebenschikova

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Образование: ЛГУ им. А.А. Жданова.

Область научных интересов: солнечная энергетика, физика и химия полупроводников, однопереходные и многопереходные наногетероструктурные концентраторные солнечные элементы, фотолитография.

Публикации: 39.

Information about the author: PhD (physics and mathematics), senior researcher of Ioffe Institute.

Education: Zhdanov LSU.

Research area: solar energy, physics and chemistry of semiconductors, single and multi-junction nanostructural concentrate solar cells, photolithography.

Publications: 39.





Контрош Лидия Владимировна
Lidiya V. Kontrosh

Сведения об авторе: магистр, эколог СПбГЭТУ им. В.И. Ленина.

Образование: СПбГЭТУ им. В.И. Ленина.

Область научных интересов: солнечная энергетика, однопереходные и многопереходные наногетероструктурные концентраторные солнечные элементы, биотехнические системы и технологии защиты окружающей среды.

Публикации: 2.

Information about the author: MA, ecologist of Electrotechnical University "LETI".

Education: Electrotechnical University "LETI".

Research area: solar energy, single and multi-junction nanostructural concentrate solar cells, biotechnical systems and environmental technology.

Publications: 2.



Ильинская Наталья Дмитриевна
Nataliya D. Il'inskaya

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Образование: ЛПИ им Калинина.

Область научных интересов: солнечная энергетика, физика и химия полупроводников, однопереходные и многопереходные наногетероструктурные концентраторные солнечные элементы, фотолитография.

Публикации: 137.

Information about the author: PhD (physics and mathematics), senior researcher of Ioffe Institute.

Education: Leningrad Polytechnic institute.

Research area: solar energy, physics and chemistry of semiconductors, single and multi-junction nanostructural concentrate solar cells, photolithography.

Publications: 137.



Калиновский Виталий Станиславович
Vitaly S. Kalinovskiy

Сведения об авторе: старший научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Образование: ЛПИ им Калинина.

Область научных интересов: солнечная энергетика, физика полупроводников, однопереходные и многопереходные наногетероструктурные концентраторные солнечные элементы.

Публикации: 100.

Information about the author: senior researcher of Ioffe Institute.

Education: Leningrad Polytechnic Institute.

Research area: solar energy, physics of semiconductors, single and multi-junction nanostructural concentrate solar cells.

Publications: 100.

Введение

На сегодняшний день наибольшей эффективностью (КПД) преобразования энергии падающего прямого солнечного излучения в электрическую обладают многопереходные наногетероструктурные солнечные элементы (МП СЭ) [1]. В МП СЭ, за счёт увеличения количества фотоактивных *p-n*-переходов, происходит снижение общего фототока, что в свою очередь требует необходимости учёта влияния туннельно-ловушечного (избыточного) и рекомбинационного (Саа-Нойс-Шокли) механизмов токопрохождения. Эти механизмы отрицательно сказываются на КПД МП СЭ, поскольку вносят существенный вклад в рост поверхностных токов утечки. Для снижения влияния поверхностных токов утечки на КПД МП СЭ разработана технология, которая позволяет формировать ровные боковые поверхности структуры *InGaP/Ga(In)As/Ge* МП СЭ при разделении на чипы в одностадийном процессе жидкостного химического травления.

В приведённом исследовании применялась методика, согласно которой расчёт эффективностей преобразования падающего прямого солнечного излучения созданных *InGaP/Ga(In)As/Ge* МП СЭ производился на основе анализа темновой вольтамперной характеристики (ВАХ) и связи с зависимостью КПД – ток генерации (η - J), что подробно рассмотрено в работах [2–4].

В ходе проведенных исследований было выявлено, что при выполнении финальной стадии разделения *InGaP/Ga(In)As/Ge* гетероструктуры на чипы методами химического травления в большинстве традиционно используемых травителей происходит неравномерное протравливание различных слоев с образованием уступов на боковой поверхности мезы. Формирование подобного профиля боковой поверхности мезы происходит вследствие как различия скоростей травления разных по составу слоев структуры и их напряженности, так и материала подложки. Формирование такого профиля мезы приводит к возрастанию токов утечки.

Эксперимент

Были проведены исследования различных методов: одностадийного и двухстадийного химического жидкостного и электрохимического травлений для оптимизации технологического процесса формирования разделительной мезы с ровной вертикальной боковой поверхностью мезоструктуры.

При проведении двухстадийного травления *InGaP/Ga(In)As/Ge* гетероструктуры на первой стадии осуществляется травление многослойной структуры *GaInP/GaInAs* селективно до германиевой подложки методом жидкостного химического травления в травителе на основе бихромата калия и бромистоводородной кислоты следующего состава: $K_2Cr_2O_7$ 80–110 г/л +

+HBr 80–110 г/л [5]. На второй стадии осуществляется травление германиевой подложки методом электрохимического травления в электролите на основе водного раствора глицерина. Состав электролита для электрохимического травления германия варьируется в диапазонах 25–50 г/л глицерина и 0,2–21 г/л КОН.

Преимуществом данного метода является малая экспозиция и хорошее качество травления поверхности германиевого *p-n*-перехода и подложки, а недостатком – крайне сложный профиль боковой поверхности *InGaP/Ga(In)As* слоёв структуры МП СЭ (рис. 1), что резко усложняет процесс последующей защиты боковой поверхности мезы чипов и существенно снижает качество пассивирующего покрытия.

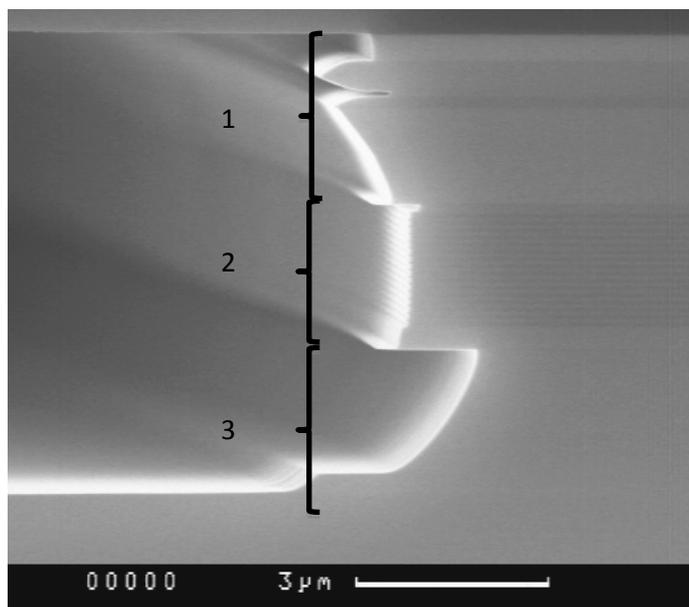


Рис. 1. Фото сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) мезы гетероструктуры после двухстадийного травления:
1 – *InGaP/Ga(In)As* гетероструктура; 2 – Брегговский отражатель; 3 – *Ge p-n*-переход и *Ge*-подложка
Fig. 1. Photo of the scanning electron microscope for heterostructures made by two-stage etching:
1 – *InGaP/Ga(In)As* heterostructure, 2 – Bragg reflector, 3 – *Ge p-n*-junction and *Ge* substrate

Для выравнивания профиля боковой поверхности разделительной мезы был разработан травитель для одностадийного разделительного травления многослойной гетероструктуры *InGaP/Ga(In)As* и германиевой подложки на основе бромистоводородной кислоты и перекиси водорода следующего состава: HBr : H₂O₂ : H₂O в объемном соотношении 8:1:140 [6]. Использование данного травителя позволяет выровнять скорость травления слоев структуры и получить ровную вертикальную боковую поверхность мезы чипа МП СЭ. Важным аспектом травления в сильно разбавленном травителе является сохранение пропорционального соотношения объемов реагентов травителя – бромистоводородной кислоты и перекиси водорода – с площадью поверхности травления струк-

туры. В противном случае быстрее расходуется один из компонентов, состав травителя меняется и нарушается однородность процесса травления, происходит неравномерное протравливание структуры по слоям.

Для решения данной проблемы необходимо пропорционально с увеличением площади МП СЭ увеличивать объем травителя. На рис. 2 представлена фотография СЭМ одностадийного травления многослойных гетероструктур с Брегговским отражателем в травителе следующего состава HBr 80 мл : H₂O₂ 8 мл : H₂O объемом 1 100 мл при исходной площади структуры 22 см². Профиль поверхности травления структуры ровный и без протравов, что обеспечивает снижение влияния поверхностных токов утечки и лучшие условия пассивации боковой поверхности чипов СЭ.



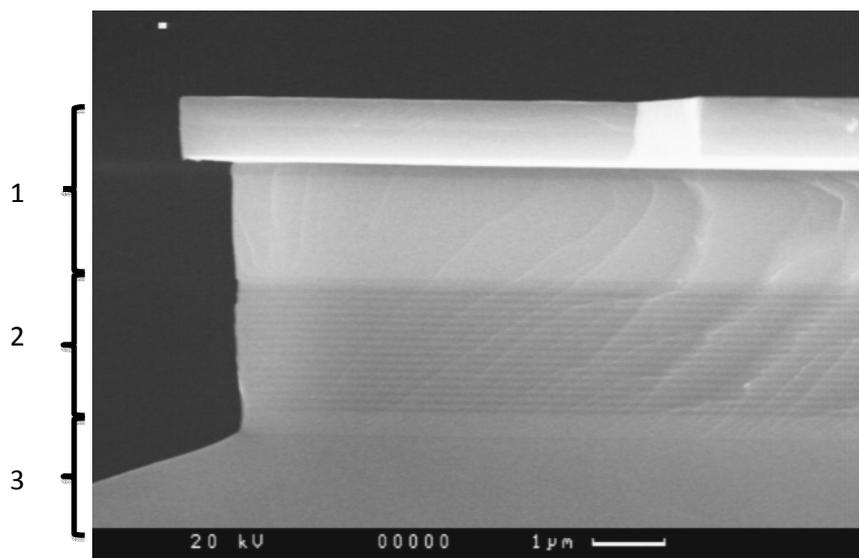


Рис. 2. Фото сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) разделительной мезы гетероструктуры после одностадийного травления: 1 – *InGaP/Ga(In)As* гетероструктура; 2 – Брегговский отражатель; 3 – *Ge p-n*-переход и *Ge*-подложка
Fig. 2. Photo of scanning electron microscope for heterostructures made by one-step etching: 1 – *InGaP/Ga(In)As* heterostructure, 2 – Bregg reflector, 3 – *Ge p-n*-junction and *Ge* substrate



Данный метод травления позволяет снизить количество постростовых операций путём проведения процесса в одном технологическом цикле с использованием одного травителя. Это особенно важно для постростовой технологии изготовления утонённых *InGaP/Ga(In)As/Ge* структур с толщинами меньше 100 мкм.

Исследование вольтамперных характеристик чипов *InGaP/Ga(In)As/Ge* солнечных элементов

Для оценки качества *InGaP/Ga(In)As/Ge* СЭ, изготовленных одностадийным и двухстадийным методами разделительного травления, были измерены прямые темновые ВАХ элементов непосредственно на эпитаксиальных пластинах и проанализированы параметры полученных прямых темновых ВАХ *InGaP/Ga(In)As/Ge* СЭ. На основе этого анализа, с использованием методики упомянутой ранее [2–4], были рассчитаны зависимости эффективности от плотности токов генерации.

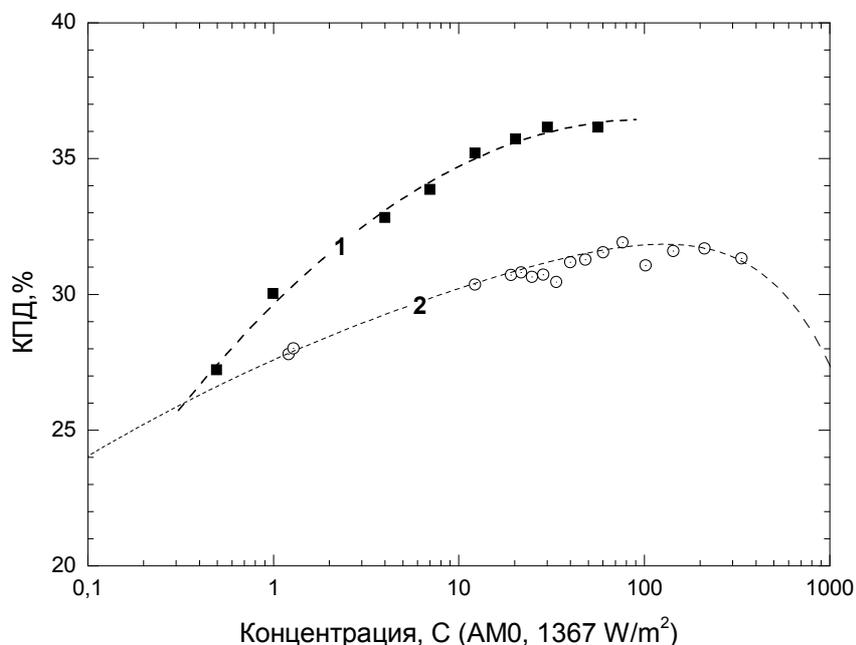


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные зависимости КПД от концентрации солнечного излучения СЭ, созданного с использованием одностадийного и многостадийного разделительного травления: 1 – одностадийный метод разделительного травления; 2 – двухстадийный метод разделительного травления
Fig. 3. Experimental and calculated dependences of the efficiency from the concentration of solar cell, made by one-stage and two-stage etching: 1 – one-step etching; 2 – two-step etching

На рис. 3 представлены расчётные и экспериментальные зависимости КПД от концентрации падающего солнечного излучения. Экспериментальные зависимости были получены на импульсном имитаторе со спектром солнечного излучения $AM0$ ($0,136 \text{ мВт/см}^2$) при комнатной температуре ($T = 300 \text{ К}$). Как видно из приведённых кривых, эффективность трёхпереходного $InGaP/Ga(In)As/Ge$ СЭ, полученного одностадийным методом разделительного травления в диапазоне кратностей концентрации падающего солнечного излучения от 1 до 100, выше, чем у элемента, полученного двустадийным методом, и увеличивается с ростом концентрации, достигая значения $KPD \geq 35\%$ ($C = 10-100$, $AM0$, $1\ 367 \text{ Вт/м}^2$).

Заключение

Используя методику анализа параметров темновых вольтамперных характеристик МП СЭ и последующего расчёта зависимости эффективности от плотности тока генерации, было исследовано влияние формы боковой поверхности на доминирующие механизмы токопрохождения при разных уровнях засветки. Установлено, что предложенный метод формирования боковой поверхности мезы МП СЭ позволяет: снизить вклад туннельно-ловушечного (избыточного) и рекомбинационного механизмов токопрохождения в рост поверхностных токов утечки, повысить качество пассивации боковой поверхности мезы чипов и увеличить выход годных МП СЭ до 90–95% с КПД больше 35% ($C = 10-100$, $AM0$, $1\ 367 \text{ Вт/м}^2$).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, Соглашение № 14-29-00178.

Список литературы

1. Dimroth F., Grave M., Beutel P., Fiedeler U., Karcher C., Tibbits T.N.D., Oliva E., Siefert G., Schachtner M., Wekkeli A., Bett A.W., Krause R., Piccin M., Blanc N., Drazek C., Guiot E., Ghyselen B., Salvétat T., Tauzin A., Signamarcheix T., Dobrich A., Hannappel T. and Schwarzbürg K. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency // *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2014. Vol. 22, Iss. 3. P. 277–282.
2. Андреев В.М., Евстропов В.В., Калиновский В.С., Лантратов В.М., Хвостиков В.П. Токопрохождение и потенциальная эффективность (КПД) солнечных элементов на основе $p-n$ -переходов из GaAs и GaSb // ФТП. 2009. Т. 43, Вып. 5. С. 671.
3. Kalinovsky V.S., Evstropov V.V. and et al. On dependence of the multijunction InGaP/GaAs/Ge, InGaP/GaAs solar cell efficiency on the sunlight concen-

tration // *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Humburg, Gemany, 2009. P. 733.

4. Andreev V.M., Kalinovsky V.S. and et al. // *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. Valencia, Spain, 2010. P. 979.

5. Патент 2391744 РФ МПК8: H01L 31/18. Способ изготовления чипов фотоэлектрических преобразователей / Андреев В.М., Ильинская Н.Д., Калюжный Н.А., Лантратов В.М., Малевская А.В., Минтаилов С.А // дата приоритета 30.12.2008.

6. Патент 2485628 РФ МПК2011: H01L 31/18. Способ изготовления чипов наногетероструктуры и травитель / Андреев В.М., Гребенщикова Е.А., Задиранов Ю.М., Ильинская Н.Д., Калиновский В.С., Малевская А.В., Усикова А.А. // дата приоритета 20.06.2013.

References

1. Dimroth F., Grave M., Beutel P., Fiedeler U., Karcher C., Tibbits T.N.D., Oliva E., Siefert G., Schachtner M., Wekkeli A., Bett A.W., Krause R., Piccin M., Blanc N., Drazek C., Guiot E., Ghy-selen B., Salvétat T., Tauzin A., Signamarcheix T., Dobrich A., Hannappel T. and Schwarzbürg K. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2014, vol. 22, iss. 3, pp. 277–282 (in Eng.).
2. Andreev V.M., Evstropov V.V., Kalinovsky V.S., Lantratov V.M., Hvoshtikov V.P. Tokoprohozhenie i potencial'naâ éffektivnost' (KPD) solnečnyh élementov na osnove $p-n$ -perehodov iz GaAs i GaSb. *FTP*, 2009, vol. 43, iss. 5, p. 671 (in Russ.).
3. Kalinovsky V.S., Evstropov V.V. and et al. On dependence of the multijunction In-GaP/GaAs/Ge, In-GaP/GaAs solar cell efficiency on the sunlight concentration. *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Humburg, Gemany, 2009, p. 733 (in Eng.).
4. Andreev V.M., Kalinovsky V.S. and et al. // *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia, Spain, 2010, p. 979 (in Eng.).
5. Andreev V.M., Il'inskaya N.D., Kalyuzhny N.A., Lantratov V.M., Malevskaya A.V., Mintairov S.A. Sposob izgotovleniâ čipov fotoèlektričeskih preobrazovatelej. Patent 2391744 Russian Federation MPK8: H01L 31/18 (30.12.2008) (in Russ.).
6. Andreev V.M., Grebenshchikova E.A., Zadiranov Yu.M., Il'inskaya N.D., Kalinovsky V.S., Malevskaya A.V., Usikova A.A. Sposob izgotovleniâ čipov nanogeterostruktury i travitel'. Patent 2485628 Russian Federation MPK2011: H01L 31/18 (20.06.2013) (in Russ.).

Транслитерация по ISO 9:1995

