

## Ф И З И К А

УДК 621.315.592:535.215

### О ПРОБЛЕМАХ СОЗДАНИЯ ЧЕТЫРЕХКАСКАДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С СОГЛАСОВАННОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКОЙ

Богатов Н. М., Нестеренко И. И., Скачков А. Ф.

#### ABOUT THE PROBLEMS OF CREATING FOUR-JUNCTION SOLAR CELLS WITH A MATCHED CRYSTAL LATTICE

Bogatov N. M., Nesterenko I. I., Skachkov A. F.

Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia  
e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru

*Abstract.* The structure of a four-junction solar cell based on  $A^3B^5$  compounds with a matched crystal lattice is developed. The processes for obtaining the required composition of the epitaxial layers of the emitter and the base of the fourth junction, which are consistent with the Ge, lattice parameter of the crystal lattice, are achieved, the necessary level of doping of the layers is achieved. The layers of the back side field and the tunnel diode are obtained between the third and fourth stages. All the waste layers are embedded in the basic epitaxial structure of a three-stage solar cell (SC). The light volt-ampere characteristics obtained for a four-stage solar cell were measured. The analysis of the obtained results is carried out, the potential advantages of a four-stage solar cell in front of a three-stage solar cell in terms of energy conversion efficiency and an increase in the lifetime of solar cells made of four-stage solar cells in outer space are considered.

*Keywords:* semiconductors, solar cell, four-stage structure, epitaxy, heterojunction, tunnel diode, current-voltage characteristic

#### Введение

Разработка новых высокоэффективных фотоэлектрических полупроводниковых структур — одно из перспективных направлений современной физики полупроводников. Актуальность этого направления возрастает в связи с развитием солнечной энергетики [1]. Эффективность современных солнечных элементов (СЭ) приближается к теоретическому пределу за счет создания многопереходных структур [2–4], структур с квантовыми точками [5–9], снижения рекомбинационных, оптических потерь и толщины, использования диэлектрических пленок на поверхности [10, 12, 13]. Для повышения КПД выполняют моделирование и оптимизацию конструкции СЭ [14–18], выявляют физические причины, снижающие эффективность преобразования энергии [19–25]. Фотоэлектрическое преобразование ИК-области спектра является дополнительной возможностью

повышения КПД СЭ. Для этого разрабатываются СЭ с преобразованием энергии фотонов за счет создания промежуточной подзоны [6, 25].

В настоящее время одним из наиболее перспективных типов солнечных элементов являются многокаскадные структуры, использующие полупроводниковые соединения  $A^3B^5$ , КПД которых при освещении заатмосферным солнечным спектром превышает 30 %. Структуры таких СЭ получают методом МОС-гидридной эпитаксии, последовательно осаждавая десятки различных слоев на подложку Ge. Увеличение эффективности преобразования солнечного излучения в электрическую энергию напрямую связано с увеличением количества каскадов солнечных элементов, приводящее к повышению спектральной чувствительности СЭ [26, 27].

Основная сложность изготовления эпитаксиальной структуры СЭ с количеством

Богатов Николай Маркович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики и информационных систем Кубанского государственного университета, действительный член Академии инженерных наук РФ им. А. М. Прохорова; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru.

Нестеренко Игорь Игоревич, аспирант кафедры физики и информационных систем Кубанского государственного университета; e-mail: nesterenkoi@saturn-kuban.ru.

Скачков Александр Федорович, аспирант кафедры физики и информационных систем Кубанского государственного университета; e-mail: skachkov@saturn-kuban.ru.

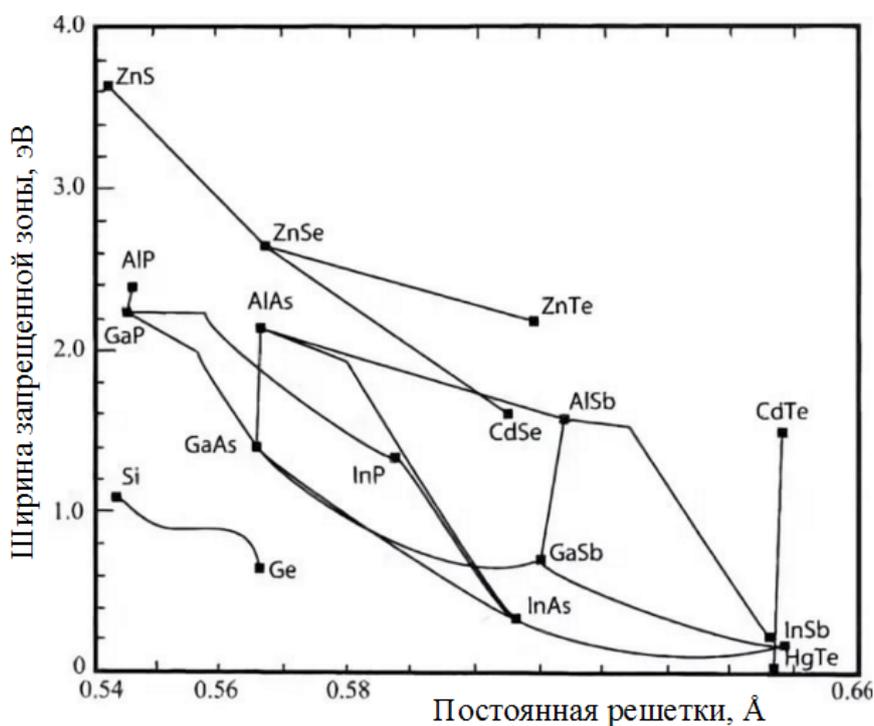


Рис. 1. Диаграмма зависимости ширины запрещенной зоны от постоянной кристаллической решетки [31]

каскадов более трех заключается в подборе материалов с требуемыми оптическими параметрами и близкими значениями постоянной кристаллической решетки. Существует несколько методов решения этой проблемы.

Применение градиентного метаморфного буфера в эпитаксиальной структуре СЭ дает возможность значительно расширить спектр материалов, доступных к использованию, позволяя в процессе эпитаксиального роста изменять значение постоянной кристаллической решетки. Однако применение градиентного буфера сопряжено с появлением дополнительных дислокаций и дефектов кристаллической решетки, которые являются центрами рекомбинации носителей заряда, снижающими конечные параметры СЭ [28, 29].

При изготовлении многокаскадных СЭ может применяться метод механической стыковки двух и более отдельных эпитаксиальных структур. Однако стык также является источником дополнительных дислокаций. Кроме того, данный метод изготовления многокаскадных солнечных элементов является достаточно дорогостоящим и очень трудоемким, так как подразумевает проведение нескольких процессов эпитаксиального роста на раз-

ных подложках, чем значительно усложняет технологический процесс при производстве такого типа СЭ [30].

Повысить эффективность СЭ возможно внедрением в структуру СЭ квантовых ям, что позволяет расширять спектральную чувствительность отдельных каскадов без изменения постоянной кристаллической решетки.

Цель данной работы — создание четырехкаскадного СЭ с согласованной кристаллической решеткой.

### 1. Методика получения структуры четырехкаскадного СЭ

В качестве базовой структуры для четырехкаскадного фотоэлектрического преобразователя была взята эпитаксиальная структура трехкаскадного солнечного элемента GaInP/GaAs/Ge. На основе диаграммы зависимости ширины запрещенной зоны от постоянной кристаллической решетки для различных полупроводников (рис. 1) были выбраны материалы, подходящие для создания четвертого каскада, тыльного потенциального барьера и туннельного диода между третьим и четвертым каскадами.

Верхний каскад базовой структуры выполнен из GaInP, поэтому для создания четвертого каскада необходим материал с шириной запрещенной зоны более 1,82 эВ, чтобы обеспечить пропускание светового излучения для нижних каскадов. В качестве такого материала выбран четырехкомпонентный твердый раствор AlInGaP с  $E_g = 1,95$  эВ. Ключевым фактором является то, что AlInGaP может быть выращен с постоянной кристаллической решетки, близкой к значению параметра решетки Ge 5,56 ангстрем.

Тыльный потенциальный барьер было решено выполнить из AlInP, а туннельный диод — из GaInP, так как материалы обладают необходимыми характеристиками, удовлетворяющими требованиям предъявляемым к функциональным элементам эпитаксиальной структуры, для которых они подбирались, таким как ширина запрещенной зоны и возможность получения слоев туннельного диода с высоким уровнем легирования.

Оптимизация режимов роста эпитаксиальных слоев включает 4 основных этапа:

- 1) Получение оптимального состава эпитаксиального слоя на подложке GaAs.
- 2) Определение оптимальной скорости роста.
- 3) Внедрение оптимальной концентрации легирующей примеси в эпитаксиальный слой полученного состава.
- 4) Внедрение слоя в общую эпитаксиальную структуру.

Отметим, что в литературе отсутствуют данные по оптимизации методики получения четырехкомпонентного состава твердого раствора AlInGaP.

Для контроля состава четырехкомпонентного твердого раствора AlInGaP выполнялась оценка соответствия параметров получаемых эпитаксиальных слоев требуемым параметрам материала. Для определения соотношения компонентов в твердом растворе измерялся угол рассогласования дифракционного максимума слоя AlInGaP относительно дифракционного максимума подложки GaAs с помощью рентгеновского дифрактометра Vector фирмы Nanometrics. Значение ширины запрещенной зоны полученного материала определялось на основе измерения пика интенсивности длины волны фотолюминесценции на установке RPM Sigma фирмы Accent. Одним из критериев согласованности кристаллической решетки слоев являлась «зер-

кальная» поверхность эпитаксиального слоя с отсутствием видимых точечных дефектов и линий рассогласования.

В результате оптимизации состава эпитаксиальных слоев были получены структуры, имеющие «зеркальную» поверхность без наличия различного рода дефектов.

Рассогласование дифракционных максимумов по рентгенограмме составило  $-233,5$  угл. сек. при пике интенсивности фотолюминесценции на длине волны 634,5 нм, соответствующей значению запрещенной зоны 1,95 эВ, что подтверждает получение требуемого состава AlInGaP.

Режимы роста слоев тыльного потенциального барьера (ТПБ) AlInP и туннельного диода (ТД) GaInP были аналогичными с ранее отработанными режимами роста широкозонного окна AlInP с рассогласованием дифракционных максимумов 223 угл. сек. и каскада GaInP с рассогласованием дифракционных максимумов  $-206,9$  угл. сек. в трехкаскадном СЭ.

Поскольку толщина каскада AlGaInP не превышала 1 мкм, оптимальная скорость роста была взята 0,7–0,8 мкм/ч. Скорость роста для ТПБ AlInP и ТД GaInP была установлена 0,3 мкм/ч.

Уровни легирования эмиттера  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  с электронной проводимостью и базы  $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  с дырочной проводимостью были получены с использованием легирующих примесей Si и Zn соответственно.

После окончания калибровок эпитаксиальная слоев для четвертого каскада, они были внедрены в структуру трехкаскадного СЭ GaInP/GaAs/Ge. Полученная эпитаксиальная структура схематично изображена на рис. 2.

## 2. Результаты исследований и их обсуждение

В результате отработки режимов эпитаксиального роста были получены экспериментальные образцы четырехкаскадных солнечных элементов с верхним субэлементом, выполненным из твердого раствора AlInGaP. Измерены вольт-амперные характеристики изготовленных четырехкаскадных СЭ при помощи имитатора заатмосферного солнечного излучения (AM0, 28 °C) фирмы TS Space System (рис. 3).

Для данных образцов характерно увеличение напряжения холостого хода с 2680 мВ

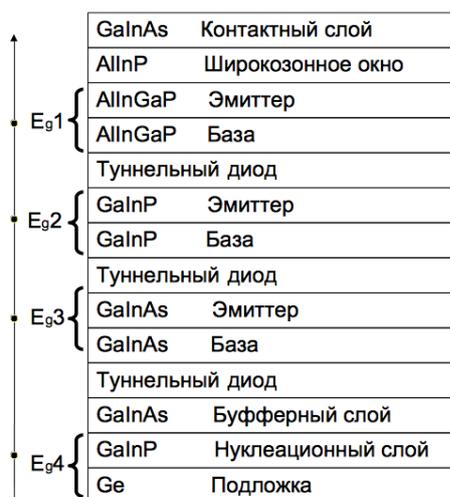


Рис. 2. Эпитаксиальная структура четырехкаскадного СЭ

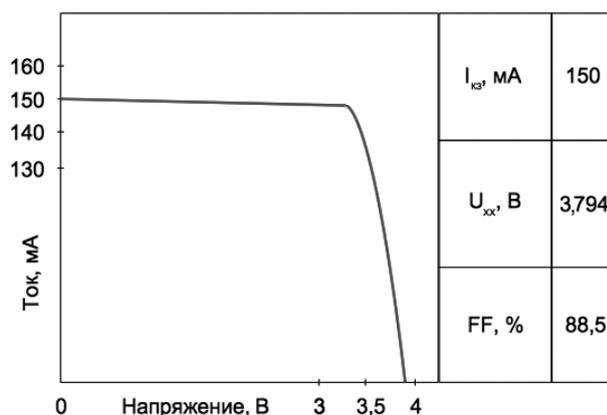


Рис. 3. Световые вольт-амперные характеристики четырехкаскадного СЭ

(для трехкаскадных СЭ) до 3794 мВ. Полученные СЭ имеют высокий коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики 88,5 %, что обусловлено низкой плотностью дислокаций на границах раздела эпитаксиальных слоев.

Производство четырехкаскадных СЭ позволит не только повысить КПД, но и увеличить срок их активного существования за счет повышения радиационной стойкости СЭ [32], что достигается благодаря уменьшению толщины второго каскада и, следовательно, меньшей степени деградации слоев.

Рост четырехкаскадной структуры осуществляется методом металлоорганической газовой эпитаксии на установке Aix2600G3IC производства фирмы AIXTRON при температурах от 550 °С до 670 °С и давлении в реакторе 100 мбар. Несущим газом был сверхчистый водород с содержанием примесей порядка нескольких ppb.

Дальнейшее совершенствование четырехкаскадной структуры идет в направлении оптимизации толщин полупроводниковых слоев, внедрения квантовых ям, что позволит увеличить спектральную чувствительность отдельных каскадов солнечного элемента и приведет к повышению тока короткого замыкания всего четырехкаскадного СЭ.

### Литература

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнеч-

ной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 32. Вып. 8. С. 937–946.

2. Власов А.С., Хвостиков В.П., Карлина Л.Б. и др. Концентраторные фотоэлектрические модули со спектральным расщеплением света с солнечными элементами на основе структур AlGaAs/GaAs/GaSb и GaInP/InGaAs(P) // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 7. С. 106–110.
3. Zhao X., Li D., Zhang T. et al. Short circuit current and efficiency improvement of SiGe solar cell in a GaAsP-SiGe dual junction solar cell on a Si substrate // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2017. Vol. 159. Iss. 1. P. 94–101.
4. Mellor A., Hylton N.P., Maier S.A. et al. Interstitial light-trapping design for multi-junction solar cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2017. Vol. 159. Iss. 1. P. 219–226.
5. Лукин Л.С., Сысоев И.А., Чеботарев С.Н. и др. Формирование квантовых точек InAs на подложках GaAs методом ионно-лучевого осаждения // Наука Юга России. 2010. Т. 6. № 4. С. 46–49.
6. Ramiro I., Antolin E., Marti A. et al. Experimental demonstration of the effect of field damping layers in quantum-dot intermediate band solar cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2015. Vol. 140. Iss. 9. P. 299–305.
7. Kwak G.Y., Lee S.H., Jang J.S. et al. Band engineering of a Si quantum dot solar cell by modification of B-doping profile // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2017. Vol. 159. Iss. 1. P. 80–85.
8. Utrilla A.D., Reyes D.F., Llorens J.M. et

- al. GaAsSb capping layers for improved performance of InAs/GaAs quantum dot solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 159. Iss. 1. P. 282–289.
9. *Boustanji H., Jaziri S., Lazzari J.-L.* Contribution of a single quantum dots layer in intermediate band solar cells: A capacitance analysis // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 159. Iss. 1. P. 633–639.
  10. *Унтала Г.Г., Кост Т.Н., Чеботарева А.Б., Закс М.В. и др.* Солнечный элемент из кремния *p*-типа, двусторонний, концентраторный // *Физика и техника полупроводников*. 2012. Т. 46. Вып. 9. С. 1217–1223.
  11. *Mahadik D.B., Lakshmi R.V., Varshilia H.C.* High performance single layer nano-porous antireflection coatings on glass by sol-gel process for solar energy applications // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. Vol. 140. Iss. 9. P. 61–68.
  12. *Арустамян Д.А., Чеботарев С.Н., Лунина М.Л. и др.* Зависимость характеристик солнечных элементов на основе AlGaAs от толщины и уровня легирования базы // *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2016. Т. 55. № 4. С. 7–12.
  13. *Foldyna M., Togonal A.S., Rusli et al.* Optimization and optical characterization of vertical nanowire arrays for core-shell structure solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 159. Iss. 1. P. 640–648.
  14. *Gudovskikh A.S., Kaluzhniy N.A., Lantratov V.M. et al.* Numerical modelling of GaInP solar cells with AlInP and AlGaAs windows // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516. Iss. 20. P. 6739–6743.
  15. *Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунина М.Л.* Моделирование зависимостей функциональных характеристик кремниевых солнечных элементов, полученных методом ионно-лучевого осаждения, от толщины и уровня легирования фронтального слоя // *Наука Юга России*. 2011. Т. 7. № 4. С. 25–30.
  16. *Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунина Л.С. и др.* Моделирование кремниевых тонкопленочных трехкаскадных солнечных элементов  $\alpha$ -Si:H/ $\mu$ C-Si:O/ $\mu$ C-Si:H // *Наука Юга России*. 2013. Т. 9. № 4. С. 18–25.
  17. *Мусалимов С.Б., Бычков И.В., Анзулевич А.П. и др.* Моделирование двух и трехслойных просветляющих покрытий для гетероструктурных солнечных элементов // *Вестник Челябинского государственного университета*. 2015. № 7. С. 60–63.
  18. *Богатов Н.М.* Распределение заряда в резком несимметричном равновесном *n-p*-переходе // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2016. № 3. С. 12–17.
  19. *Богатов Н.М., Корнеев А.И., Матвеев М.П. и др.* Влияние неравновесного заряда границы SiO<sub>2</sub>-Si на нестационарность спектральной характеристики солнечных элементов с субмикронным *p-n*-переходом // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2006. № 4. С. 63–67.
  20. *Богатов Н.М., Матвеев М.П., Першин Н.В. и др.* Определение времени захвата неравновесного поверхностного заряда в полупроводниковых структурах по спаду фотоэдс // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 2008. № 2. С. 57–61.
  21. *Богатов Н.М., Матвеев М.П., Першин Н.В. и др.* Определение времени захвата неравновесного поверхностного заряда в полупроводниковых структурах по спаду тока короткого замыкания // *Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Естественные науки*. 2008. № 6. С. 39–41.
  22. *Kuhnappel S., Gall S., Rech B. et al.* Towards monocrystalline silicon thin films grown on glass by liquid phase crystallization // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. Vol. 140. Iss. 9. P. 86–91.
  23. *Dupre O., Vaillon R., Green M.A.* Physics of the temperature coefficients of solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. Vol. 140. Iss. 9. P. 92–100.
  24. *Boucher J.W., Greenaway A.L., Egelhofer K.E. et al.* Analysis of performance-limiting defects in *pn* junction GaAs solar cells grown by water-mediated close-spaced vapor transport epitaxy // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017. Vol. 159. Iss. 1. P. 546–552.
  25. *Чеботарев С.Н., Лунина М.Л., Алфимова Д.Л.* Наноструктуры A<sup>IV</sup>B<sup>IV</sup> и A<sup>III</sup>B<sup>III</sup> для устройств оптоэлектроники. Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2014. 275 с.
  26. *Patel P., Aiken D., Chumney D. et al.* Initial results of the monolithically grown six-junction inverted metamorphic multi-junction solar cell // 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2012. P. 1–4.
  27. *Cornfeld A., Patel P., Spann J. et al.* Evolution of a 2.05eV AlGaInP top sub-cell for 5 and 6J-IMM applications // 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2012. P. 88–91.
  28. *Guter W., Kern R., Kostler W. et al.* III-V Multi-junction Solar Cells – New lattice matched products and development of upright metamorphic 3J solar cells // 7th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, 2011. P. 5–8.
  29. *Sasaki K., Agui T., Nakaido K. et al.* Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells // 9th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, 2013. P. 22–25.
  30. *Phillips S., Guter W., Welsch E. et al.* Present

status in the development of III-V multi-junction solar cells // Next Generation of Photovoltaics, Luxembourg, Springer Verlag, 2012. P. 1–22.

31. Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы нанотехнологии. Новосибирск: НГТУ, 2004. 106 с.
32. Baur C., Meusel M., Dimroth F. et al. Analysis of the radiation hardness of triple- and quintuple-junction solar cells // 31st IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2005. P. 548–551.

### References

1. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. Tendentsii i perspektivy razvitiya solnechnoy fotoenergetiki [Trends and prospects for the development of solar photovoltaics]. *Fizika i tehnologii poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2004, vol. 32, iss. 8, pp. 937–946. (In Russian)
2. Vlasov A.S., Khvostikov V.P., Karlina L.B. Kontsentratornye fotoelektricheskie moduli so spektral'nym rasshchepleniem sveta s solnechnymi elementami na osnove struktur AlGaAs/GaAs/GaSb i GaInP/InGaAs(P) [Concentrator photoelectric modules with spectral splitting of light with solar cells based on AlGaAs/GaAs/GaSb and GaInP/InGaAs(P) structures]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2013, vol. 83, no. 7, pp. 106–110. (In Russian)
3. Zhao X., Li D., Zhang T. et al. Short circuit current and efficiency improvement of SiGe solar cell in a GaAsP-SiGe dual junction solar cell on a Si substrate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, vol. 159, iss. 1, pp. 94–101.
4. Mellor A., Hylton N.P., Maier S.A. et al. Interstitial light-trapping design for multi-junction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, vol. 159, iss. 1, pp. 219–226.
5. Lunin L.S., Sysoev I.A., Chebotarev S.N. et al. Formirovanie kvantovykh toчек InAs na podlozhkakh GaAs metodom ionno-luchevogo osazhdeniya [Formation of InAs quantum dots on GaAs substrates by ion-beam deposition]. *Nauka Yuga Rossii* [Science of the South of Russia], 2010, vol. 6, no. 4, pp. 46–49. (In Russian)
6. Ramiro I., Antolin E., Marti A. et al. Experimental demonstration of the effect of field damping layers in quantum-dot intermediate band solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, vol. 140, iss. 9, pp. 299–305.
7. Kwak G.Y., Lee S.H., Jang J.S. et al. Band engineering of a Si quantum dot solar cell by modification of B-doping profile. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, vol. 159, iss. 1, pp. 80–85.
8. Utrilla A.D., Reyes D.F., Llorens J.M. et al. GaAsSb capping layers for improved performance of InAs/GaAs quantum dot solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, vol. 159, iss. 1, pp. 282–289.
9. Boustanji H., Jaziri S., Lazzari Jean-Louis. Contribution of a single quantum dots layer in intermediate band solar cells: A capacitance analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, vol. 159, iss. 1, pp. 633–639.
10. Untila G.G., Kost T.N., Chebotareva A.B. et al. Solnechnyy element iz kremniya n-tipa, dvustoronniy, kontsentratornyy [Solar cell of silicon of n-type, two-sided, concentrator]. *Fizika i tehnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2012, vol. 46, iss. 9, pp. 1217–1223. (In Russian)
11. Mahadik D.B., Lakshmi R.V., Barshilia H.C. High performance single layer nano-porous antireflection coatings on glass by sol-gel process for solar energy applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, vol. 140, iss. 9, pp. 61–68.
12. Arustamyan D.A., Chebotarev S.N., Lunina M.L. et al. Zavisimost' kharakteristik solnechnykh elementov na osnove AlGaAs ot tolshchiny i urovnya legirovaniya bazy [Dependence of the characteristics of solar cells based on AlGaAs on the thickness and doping level of the base]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federalnogo universiteta* [Bull. of the North-Caucasian Federal University], 2016, vol. 55, no. 4, pp. 7–12. (In Russian)
13. Foldyna M., Togonal A.S., Rusli et al. Optimization and optical characterization of vertical nanowire arrays for core-shell structure solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, vol. 159, iss. 1, pp. 640–648.
14. Gudovskikh A.S., Kaluzhniy N.A., Lantratov V.M. et al. Numerical modelling of GaInP solar cells with AlInP and AlGaAs windows. *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, iss. 20, pp. 6739–6743.
15. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunina M.L. Modelirovanie zavisimostey funktsional'nykh kharakteristik kremnievykh solnechnykh elementov, poluchennykh metodom ionno-luchevogo osazhdeniya, ot tolshchiny i urovnya legirovaniya frontal'nogo sloya [Modeling of the dependences of the functional characteristics of silicon solar cells obtained by the ion-beam deposition method on the thickness and doping level of the frontal layer]. *Nauka Yuga Rossii* [Science of the South of Russia], 2011, vol. 7, no. 4, pp. 25–30. (In Russian)
16. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S. et al. Modelirovanie kremnievykh tonkoplenochnykh trekhkaskadnykh solnechnykh elementov  $\alpha$ -Si:H/ $\mu$ C-Si:O/ $\mu$ C-Si:H [Modeling of silicon thin-film three-stage solar cells  $\alpha$ -Si:H/ $\mu$ C-Si:O/ $\mu$ C-Si:H]. *Nauka Yuga Rossii* [Science of the South of Russia], 2013, vol. 9, no. 4, pp. 18–25. (In Russian)
17. Musalinov S.B., Bychkov I.V., Anzulevich A.P.

- et al. Modelirovanie dvukh i trekhslonnykh prosvetlyayushchikh pokrytiy dlya geterostrukturnykh solnechnykh elementov [Simulation of two and three-layer antireflection coatings for heterostructural solar cells]. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bull. of the Chelyabinsk State University], 2015, no. 7, pp. 60–63. (In Russian)
18. Bogatov N.M. Raspredelenie zaryada v rezkom nesimmetrichnom ravnovesnom  $n$ - $p$ -perekhode [Charge distribution in a sharp asymmetric equilibrium  $n$ - $p$ -transition]. *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2016, no. 3, pp. 12–17. (In Russian)
  19. Bogatov N.M., Korneev A.I., Matveyakin M.P. et al. Vliyanie neravnovesnogo zaryada granitsy  $\text{SiO}_2$ -Si na nestatsionarnost' spektral'noy kharakteristiki solnechnykh elementov s submikronnym  $p$ - $n$ -perekhom [Influence of the nonequilibrium charge of the  $\text{SiO}_2$ -Si interface on the nonstationary nature of the spectral characteristics of solar cells with a submicron  $p$ - $n$  junction]. *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2006, no. 4, pp. 63–67. (In Russian)
  20. Bogatov N.M., Matveyakin M.P., Pershin N.V. et al. Opredelenie vremeni zakhvata neravnovesnogo poverkhnostnogo zaryada v poluprovodnikovyykh strukturakh po spadu fotoeds [Determination of the time for the capture of a nonequilibrium surface charge in semiconductor structures from the decay of a photo-emf]. *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation]. 2008. № 2. P. 57–61.
  21. Bogatov N.M., Matveyakin M.P., Pershin N.V. et al. Determination of the capture time of a nonequilibrium surface charge in semiconductor structures from the drop in the short-circuit current. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennie nauki*, 2008, no. 6, pp. 39–41.
  22. Kuhnapfel S., Gall S., Rech B. et al. Towards monocrystalline silicon thin films grown on glass by liquid phase crystallization. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, vol. 140, iss. 9, pp. 86–91.
  23. Dupre O., Vaillon R., Green M.A. Physics of the temperature coefficients of solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, vol. 140, iss. 9, pp. 92–100.
  24. Boucher J.W., Greenaway A.L., Egelhofer K.E. et al. Analysis of performance-limiting defects in  $pn$  junction GaAs solar cells grown by water-mediated close-spaced vapor transport epitaxy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, vol. 159, iss. 1, pp. 546–552.
  25. Chebotarev S.N., Lunina M.L., Alfimova D.L. *Nanostrukturnyye  $A^{IV}B^{IV}$  i  $A^{III}B^{III}$  dlya ustroystv optoelektroniki* [ $A^{IV}B^{IV}$  and  $A^{III}B^{III}$  nanostructures for optoelectronic devices], Rostov-on-Don, UNCh RAN, 2014, 275 p. (In Russian)
  26. Patel P., Aiken D., Chumney D. et al. Initial results of the monolithically grown six-junction inverted metamorphic multi-junction solar cell. *38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2012, pp. 1–4.
  27. Cornfeld A., Patel P., Spann J. et al. Evolution of a 2.05eV AlGaInP top sub-cell for 5 and 6J-IMM applications. *38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2012, pp. 88–91.
  28. Guter W., Kern R., Kostler W. et al. III-V Multi-junction Solar Cells – New lattice matched products and development of upright metamorphic 3J solar cells. *7<sup>th</sup> Int. Conf. on Concentrating Photovoltaic Systems*, 2011, pp. 5–8.
  29. Sasaki K., Agui T., Nakaido K. et al. Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells. *9<sup>th</sup> Int. Conf. on Concentrating Photovoltaic Systems*, 2013, pp. 22–25.
  30. Philipps S., Guter W., Welsler E. et al. Present status in the development of III-V multi-junction solar cells. In: *Next Generation of Photovoltaics*, Luxembourg, Springer Verlag, 2012, pp. 1–22.
  31. Ilyushin V.A., Velichko A.A. *Protsessy nanotekhnologii* [Processes of nanotechnology]. Novosibirsk, NSTU, 2004, 106 p. (In Russian)
  32. Baur C., Meusel M., Dimroth F. et al. Analysis of the radiation hardness of triple- and quintuple-junction solar cells. *31<sup>st</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2005, pp. 548–551.