

УДК 539.23

**С.Н. Чеботарев, М.Л. Лунина, Л.С. Лунин, А.С. Пашченко,
Д.А. Арустамян, Г.А. Еремеев, А.Н. Яценко**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ
И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПОВЕРХНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКА ALN(0001) С ВНЕДРЕННЫМИ
ГЕКСАГОНАЛЬНЫМИ КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ INN***

Проведен расчет энергии деформации и пьезоэлектрического потенциала на поверхности полупроводника AlN(0001) с заглубленными гексагональными квантовыми точками InN. В гетероструктурах с квантовыми точками из-за различий постоянных кристаллической решетки формируется внутреннее поле упругих напряжений, влияющее на смещение положений экстремумов зоны Бриллюэна и появление встроенного электрического поля вследствие пьезоэффекта. Показано, что поверхность квантовой точки произвольной формы можно представить в виде совокупности плоских треугольников. Установлено, что такая аппроксимация допускает аналитическое интегрирование функции Грина, что позволяет рассчитать энергию деформации и пьезоэлектрический потенциал. Теоретические расчеты показывают, что вблизи вершины гексагональных квантовых точек создаются сильные пьезоэлектрические поля. Установлено, что распределение энергии деформации и пьезоэлектрического потенциала на поверхности полупространства с гексагональными точкам симметрично относительно оси вращения. Над квантовыми точками формируется сильные деформации растяжения. Распределение пьезоэлектрического потенциала коррелирует с распределением деформаций и также симметрично. Картина пьезоэлектрических возмущений в центральной части более выражена, нежели для механических напряжений. Под основанием квантовой точки образуется устойчивая полоса с низкими значениями пьезоэлектрического потенциала. Полученные зависимости с физической точки зрения можно объяснить тем, что кристаллическая решетка подложки воздействуя на кристаллическую решетку квантовой точки, приводит к формированию в приграничных к квантовой точке слоев напряжений сжатия в плоскости xu и напряжений растяжения в вдоль оси z . На практике этот эффект можно использовать для повышения коэффициента захвата носителей заряда квантовыми точками.

Энергия деформации; гетероструктуры с квантовыми точками; функция Грина; ионно-лучевая кристаллизация; пьезоэлектрический потенциал.

**S.N. Chebotarev, M.L. Lunina, L.S. Lunin, A.S. Pashchenko,
D.A. Arustamyan, G.A. Ereemeev, A.N. Yatsenko**

**SIMULATION OF ELASTIC DEFORMATION AND PIEZOELECTRIC
POTENTIAL ON THE SURFACE OF SEMICONDUCTOR ALN (0001)
WITH BURRIED INN HEXAGONAL QUANTUM DOTS**

The calculation of strain energy and piezoelectric potential on the AlN (0001) semiconductor surface with recessed InN hexagonal quantum dots was done. In heterostructures with quantum dots due to the difference of the lattice constant there is an internal field of elastic stresses affecting the offset provisions of the extrema in the Brillouin zone and the appearance of the built-in electric field due to the piezoelectric effect. It is shown that surface of the quantum dot of any form can be represented as a set of flat triangles. It was found that this approximation of an analytic integration of Green's functions, which allow to calculate the strain energy and the piezoelectric potential. Theoretical calculations show that near the top of the hexagonal quantum dots formed strong piezoelectric field. It is found that the distribution of strain energy distribution and the potential on the surface of the piezoelectric half hexagonal points symmetrically with respect to the axis. Above the quantum dot is formed strong tensile strain. The distribution of the piezoelectric potential is correlated with the strain distribution and also symmetrical. Painting piezoelectric per-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-08-08263-а) а также гранта Президента Российской Федерации МК-5115.2016.8.

turbation in the central part is more pronounced than for mechanical stresses. Under the base of the quantum dot is formed a stable band with low values of the piezoelectric potential. The dependences obtained from a physical point of view can be explained by the fact that the crystal lattice of the substrate acting on the crystal lattice of the quantum dot leads to the formation of the border to the quantum dot layers of compressive stresses in the xy plane and tensile stresses in the z direction. In practice, this effect can be used to enhance the rate of capture of carriers quantum dots.

Strain energy; quantum dots heterostructures; Green's function; ion-beam crystallization; piezoelectric potential.

Введение. Наноструктуры с внедренными квантовыми точками обладают значительным прикладным потенциалом для создания высокоэффективных оптоэлектронных устройств: светодиодов [1], лазеров [2], фотоэлектрических преобразователей [3, 4]. Наногетероструктуры с массивами квантовых точек являются упругонапряженными. Актуальность исследования внутренних напряжений в таких наноструктурах определяется тем, что они могут приводить к искажению зоны Бриллюэна и появлению внутренних электрических полей из-за пьезоэффекта [5]. Наиболее исследованными гетероструктурами с квантовыми точками являются прямозонные наносистемы InAs/GaAs [6–8] и непрямозонные Ge/Si [9–11]. Ранее нами было проведено моделирование и исследование внутренних механических напряжений в гетеросистеме InAs/GaAs с внедренными пирамидальными квантовыми точками [12, 13].

Помимо указанных типов квантово-размерных гетероструктур с пирамидальными квантовыми точками в последнее время приобрели особую актуальность нитридные наноматериалы с гексагональными квантовыми точками [14, 15]. Это обусловлено их значительным перспективами для изготовления высокоэффективных светодиодов и лазеров [16, 17]. Кроме того, успехи достигнутые в исследованиях самоорганизованного роста InAs-наноструктур позволяют использовать эти достижения также и для получения нитридных структур. Известно, что на свойство однородности массивов квантовых точек оказывает сильное влияние механические напряжения и вызываемые ими пьезоэлектрические поля внутри и в ближайшем окружении нитридных квантовых точек [18]. Под однородностью здесь понимается идентичность размеров, формы и локальной поверхностной плотности.

Цель представленной работы заключается в расчете упругой деформации и пьезоэлектрического потенциала на поверхности бесконечного полупространства подложки AlN(0001) с заглубленными гексагональными квантовыми точками InN, используя аппарат функций Грина.

Методика расчета. Воспользуемся понятием трехмерной функции Грина, заданной для полупространства, ограниченного углом $\theta \in [0, \pi]$:

$$\bar{U}(\vec{x}; \vec{d}) = \bar{U}^\infty(\vec{x}; \vec{d}) + \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi A^* G_1 A^\tau d\theta, \quad (1)$$

где A^* и A^τ – комплексно сопряженная и транспонированная собственные матрицы Штро. Величина G_1 находится из соотношения:

$$(G_1)_{ij} = \frac{(B^{*-1}B)_{ij}}{-p_i^* x_3 + p_j d_3 - [(x_1 - d_1) \cos \theta + (x_2 - d_2) \sin \theta]}, \quad (2)$$

здесь p_j – собственные функции Штро.

Для нахождения упругих напряжений, вызванных несоответствием параметров кристаллических решеток матричного материала и квантовой точки, необходимо найти производные трехмерной функции Грина:

$$\frac{\partial \bar{U}(\vec{x}; \vec{d})}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{U}^\infty(\vec{x}; \vec{d})}{\partial x_j} - \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi A^* G_2 \langle g_j \rangle A^\tau d\theta, \quad (3)$$

Компоненты G_2 находим из:

$$(G_2)_{ij} = \frac{(B^{*-1}B)_{ij}}{\{-p_i^*x_3 + p_jd_3 - [(x_1 - d_1)\cos\theta + (x_2 - d_2)\sin\theta]\}^2}, \quad (4)$$

$$\langle g_1 \rangle = \text{diag}[\cos\theta, \cos\theta, \cos\theta]$$

$$\langle g_2 \rangle = \text{diag}[\sin\theta, \sin\theta, \sin\theta],$$

$$\langle g_3 \rangle = \text{diag}[\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3]$$

Предположим, что квантовую точку любой формы можно аппроксимировать конечным числом плоских треугольников, тогда:

$$u_k(\vec{d}) = \frac{1}{2\pi^2} C_{ijlm} \gamma_{lm}^* n_i \int_0^\pi \left[\int_{\Delta} G_1 d\Delta(\vec{x}) \right] A^\tau d\theta, \quad (5)$$

Для интегрирования (5) достаточно найти:

$$F_1(d_j, \theta) = \frac{1}{f_1} \left[\frac{f_1 l_2 + f_3}{f_2 - f_1 l_2 / h} \ln \left(\frac{f_2 h + f_3}{f_1 l_2 + f_3} \right) - \frac{-f_1 l_1 + f_3}{f_2 + f_1 l_1 / h} \ln \left(\frac{f_2 h + f_3}{-f_1 l_1 + f_3} \right) \right], \quad (6)$$

$$F_2(d_j, \theta) = \frac{1}{f_1} \left[\frac{1}{f_2 + f_1 l_1 / h} \ln \left(\frac{f_2 h + f_3}{-f_1 l_1 + f_3} \right) - \frac{1}{f_2 - f_1 l_2 / h} \ln \left(\frac{f_2 h + f_3}{f_1 l_2 + f_3} \right) \right].$$

Подставляя полученные соотношения в (5) и интегрируя внутри угла $\theta \in [0, \pi]$ можно рассчитать деформацию в любой точке полупространства.

Компоненты тензора деформации $\gamma_{kp}(d)$ находятся из:

$$\gamma_{kp} \frac{1}{2} \gamma_{Lm}^* C_{iJLm} \int_{\partial V} [U_{J,d_p}^k(x; d) + U_{J,d_k}^k(x; d)] n_i(x) dS(x), \quad (7)$$

Компоненты электрического поля находим, интегрируя выражение:

$$E_p(d) = \gamma_{Lm}^* C_{iJLm} \int_{\partial V} U_{J,d_p}^4(x; d) n_i dS(x), \quad (8)$$

Результаты и их обсуждение. Перейдем к описанию результатов теоретического исследования механических напряжений и пьезоэлектрических полей, образованных заглубленными квантовыми точками InN в полупространстве подложки AlN(0001). При моделировании использовались следующие материальные константы для выбранной гетеросистемы InN/AlN(0010), приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Материальные константы для AlN(0001) и InN(001) [19]

| Параметр | InN(0001) | AlN(0001) |
|---|-----------|-----------|
| $C_{11} = C_{22}$ (ГПа) | 223,0 | 396,0 |
| C_{33} (ГПа) | 224,0 | 373,0 |
| C_{12} (ГПа) | 115,0 | 137,0 |
| $C_{13} = C_{23}$ (ГПа) | 92,0 | 108,0 |
| $C_{44} = C_{55}$ (ГПа) | 48,0 | 116,0 |
| C_{66} (ГПа) | 54,0 | 129,5 |
| $e_{15} = e_{24}$ (Кл/м ²) | -0,22 | -0,48 |
| $e_{31} = e_{32}$ (Кл/м ²) | -0,57 | -0,58 |
| e_{33} (Кл/м ²) | 0,97 | 1,55 |
| $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22}$ (Ф/м) | 132,81 | 79,69 |
| ε_{33} (Ф/м) | 132,81 | 97,37 |
| $\gamma_{11}^* = \gamma_{22}^*$ | 0,1357 | 0,1357 |
| γ_{33}^* | 0,1267 | 0,1267 |

Схематичное изображение формы квантовой точки, расположенной внутри полупространства подложки, приведено на рис. 1.

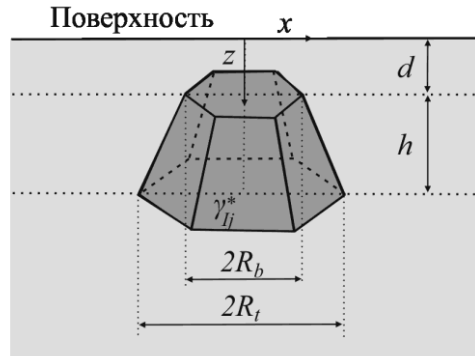


Рис. 1. Схематическое изображение моделируемой гексагональной квантовой точки

Размеры квантовой точки равнялись $R_b = 8,5$ нм и $R_t = 4,1$ нм. Величина заглибления составляла $d = 6,9$ нм. Эти параметры выбирались на основе экспериментальных данных, взятых из экспериментальной работы [20]. Получение информации о распределении поля напряжений на поверхности подложки с внедренными квантовыми точками имеет важное значение для понимания условий роста однородных по размерам и форме квантовых точек.

На рис. 2 представлены результаты моделирования картины распределения энергии деформации и пьезоэлектрического потенциала на поверхности полупространства подложки AlN(0001) с заглибленными гексагональными квантовыми точкам InN. Видно, что распределение обоих параметров симметрично относительно z -оси. Отметим, высокие значения механических напряжений, возникающие на поверхности пластины. Над квантовой точкой формируется сильное деформации растяжения. Распределение пьезоэлектрического потенциала коррелирует с распределением деформаций и также симметрично относительно оси вращения квантовой точки. Картина пьезоэлектрических возмущений в центральной части более выражена, нежели для механических напряжений.

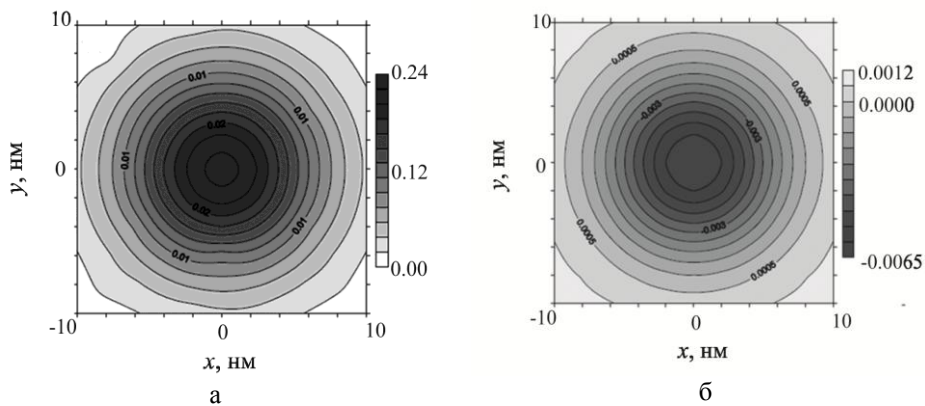


Рис. 2. Распределение энергии деформации на поверхности

Рис. 3 демонстрирует изменения значений γ_{xx} , γ_{yy} и γ_{zz} . Параметры $\gamma_{xx} = \gamma_{yy}$, равны из-за осевой симметрии квантовой точки, выбранной формы. Полученные зависимости с физической точки зрения можно объяснить тем, что кристаллическая решетка подложки воздействуя на кристаллическую решетку квантовой точки, приводит к формированию в приграничных к квантовой точке слоях напряжений сжатия в плоскости xu и напряжений растяжения в вдоль оси z . Из рис. 3,б видно, что значения достигают максимумов на оси симметрии квантовой точки. В экспериментах этот эффект проявляется в виде самосогласованного упорядочивания вертикально-связанных массивов квантовых точек, когда наблюдается встраивание адатомов в ростовой зародыш именно над центром нижележащей квантовой точки. Картины распределения параметров γ_{xx} , γ_{yy} , и γ_{zz} вдоль оси x симметричны относительно центра осевой симметрии квантовой точки, но отличаются знаком, обозначающем напряжения сжатия и растяжения.

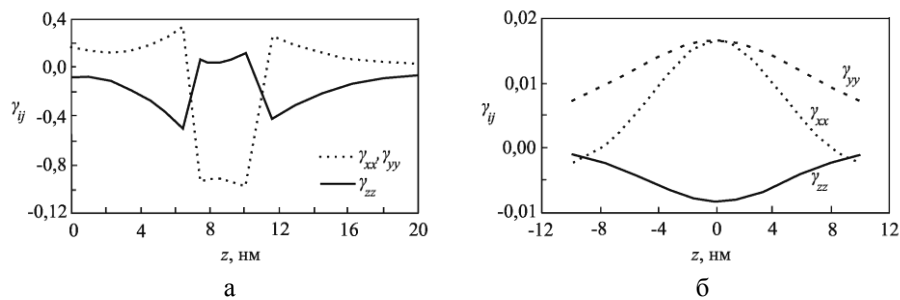


Рис. 3. Изменение параметров γ_{ij} вдоль осей Oz (а) и Ox (б)

Распределение пьезоэлектрического потенциала в xz -плоскости при $y = 0$ визуализирована на рис. 4. Темные участки относятся к областям с низкими значениями пьезоэлектрического потенциала, светлые – к областям с большими пьезоэлектрическими полями.

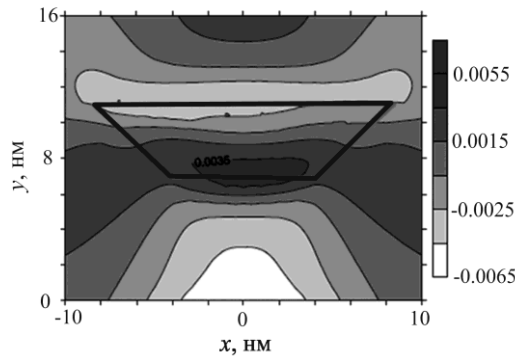


Рис. 4. Распределение пьезоэлектрического потенциала в плоскости Oxz при $y = 0$

Из рис. 4 можно видеть, что области с высоким пьезоэлектрическим потенциалом образуются вблизи вершины гексагональной квантовой точки и симметрично распространяются вдоль ее боковой грани. В то время как под основанием квантовой точки наблюдается устойчивая полоса с низкими значениями пьезоэлектрического потенциала.

Заключение. Таким образом, предложенная теоретическая модель расчета механических напряжений и пьезоэлектрических полей приводит к результатам, хорошо согласующимся с экспериментальными данными сторонних исследователей. Кроме того, обнаруженный эффект образования сильных пьезоэлектрических полей вблизи вершины заглубленной квантовой точки может найти практическое применение в при создании оптоэлектронных устройств из-за увеличения коэффициента захвата носителей заряда внутри квантовой точки из окружающей матрицы базового материала подложки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Xing E., Tong C., Rong J., Shu S., Wu H., Wang L., Tian S., Wang L.* Modulation of carrier dynamics and threshold characteristics in 1.3- μm quantum dot photonic crystal nanocavity lasers // *Optics and Laser Technology*. – 2016. – Vol. 82. – P. 10-16.
2. *Shang X., Yu Y., Li M., Wang L., Zha G., Ni H., Pettersson H., Fu Y., Niu Z.* Effect of tunable dot charging on photoresponse spectra of GaAs p-i-n diode with InAs quantum dots // *Journal of Applied Physics*. – 2015. – Vol. 118, No. 24. – P. 244503(1)-244503(4).
3. *Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Irkha V.A., Dudnikov S.A.* Simulation of volt-current voltage and spectral characteristics of InAs-QD/GaAs solar cells // *International Journal of Alternative Energy and Ecology*. – 2013. – No. 10 (132). – P. 28-32.
4. *Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Irkha V.A., Dudnikov S.A.* Ion-beam crystallization multi cascade photo heterostructures InAs-QD / GaAs // *International Journal of Alternative Energy and Ecology*. – 2013. – No. 6-2 (128). – P. 43-48.
5. *Andreev A.D., Downes J.R., Faux D.A., O'Reilly E.P.* Strain distributions in quantum dots of arbitrary shape // *Journal of Applied Physics*. – 1999. – Vol. 86, No. 1. – P. 297-305.
6. *Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Williamson A., Lunin L.S., Irkha V.A., Gamidov V.A.* Ion beam crystallization of InAs/GaAs(001) nanostructures // *Technical Physics Letters*. – 2015. – Vol. 41, No. 7. – P. 661-664.
7. *Lunin L.S., Sysoev I.A., Alfimova D.L., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S.* A study of photosensitive inas/gaas heterostructures with quantum dots grown by ion-beam deposition // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2011. – Vol. 5, No. 3. – P. 559-562.
8. *Pieczarka M., Sek G.* The ground state properties of In(Ga)As/GaAs low strain quantum dots // *Physica B: Condensed Matter*. – 2016. – Vol. 495. – P. 70-75.
9. *Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Irkha V.A.* Features in the Formation of Ge/Si Multilayer Nanostructures under Ion Beam Assisted Crystallization // *Technical Physics Letters*. – 2013. – Vol. 39, No. 8. P. 728-731.
10. *Pashchenko A.S., Chebotarev S.N., Lunin L.S., Irkha V.A.* Specific Features of Doping with Antimony during the Ion-Beam Crystallization of Silicon // *Semiconductors*. – 2016. – Vol. 50, No. 4. – P. 545-548.
11. *Talochkin A.B., Chistokhin I.B., Mashanov V.I.* Photoconductivity of ultra-thin Ge(GeSn) layers grown in Si by low-temperature molecular beam epitaxy // *Journal of Applied Physics*. – 2016. – Vol. 119, No. 13. – P. 134302(1)-134302(5).
12. *Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunina M.L.* On the problem of analysis of elastic deformation on the surface of a semiconductor with a half-recessed quantum dots // *Herald of Southern Scientific Centre RAS*. – 2015. – Vol. 11, No. 3. – P. 30-37.
13. *Lozovskii V.N., Chebotarev S.N., Irkha V.A., Valov G.V.* Formation and use of position marks in scanning probe microscopy // *Technical Physics Letters*. – 2009. – Vol. 35, No. 8. – P. 737-738.
14. *Medeiros R.G.* Epitaxial growth of strained nanocrystals // *Physica Status Solidi*. – 2002. – Vol. 230. – P. 443-450.
15. *Shetty A., Kumar M., Roul B., Vinoy K.J., Krupanidhi S.B.* InN quantum dot based infra-red photodetectors // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2016. – Vol. 16, No. 1. – P. 709-714.
16. *Downes J.R., Faux D.A., O'Reilly E.P.* A simple method for calculating strain distributions in quantum dot structures // *Journal of Applied Physics*. – 1997. – Vol. 81, No. 10. – P. 6700-6702.

17. Hossain M., Abdullah-Al-Humayun M., Biswas M., Sadi M.A.H. A novel design of InN based quantum-dot laser operating at 1.55 μm // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 403-408. – P. 4321-4327.
18. Pearson G.S., Faux D.A. Analytical solutions for strain in pyramidal quantum dots // *Journal of Applied Physics*. – 2000. – Vol. 88, No. 2. – P. 730-736.
19. Saito T., Arakawa Y. Electronic structure of piezoelectric InGaN quantum dots in GaN calculated using a tight-binding method // *Physica E*. – 2002. – Vol. 15. – P. 169-181.
20. Glas F. Elastic relaxation of isolated and interacting truncated pyramidal quantum dots and quantum wires in a half space // *Applied Surface Science*. – 2002. – Vol. 188. – P. 9-18.

REFERENCES

1. Xing E., Tong C., Rong J., Shu S., Wu H., Wang L., Tian S., Wang L. Modulation of carrier dynamics and threshold characteristics in 1.3- μm quantum dot photonic crystal nanocavity lasers, *Optics and Laser Technology*, 2016, Vol. 82, pp. 10-16.
2. Shang X., Yu Y., Li M., Wang L., Zha G., Ni H., Pettersson H., Fu Y., Niu Z. Effect of tunable dot charging on photoresponse spectra of GaAs p-i-n diode with InAs quantum dots, *Journal of Applied Physics*, 2015, Vol. 118, No. 24, pp. 244503(1)-244503(4).
3. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Irkha V.A., Dudnikov S.A. Simulation of volt-current voltage and spectral characteristics of InAs-QD/GaAs solar cells, *International Journal of Alternative Energy and Ecology*, 2013, No. 10 (132), pp. 28-32.
4. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Irkha V.A., Dudnikov S.A. Ion-beam crystallization multi cascade photo heterostructures InAs-QD / GaAs, *International Journal of Alternative Energy and Ecology*, 2013, No. 6-2 (128), pp. 43-48.
5. Andreev A.D., Downes J.R., Faux D.A., O'Reilly E.P. Strain distributions in quantum dots of arbitrary shape, *Journal of Applied Physics*, 1999, Vol. 86, No. 1, pp. 297-305.
6. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Williamson A., Lunin L.S., Irkha V.A., Gamidov V.A. Ion beam crystallization of InAs/GaAs(001) nanostructures, *Technical Physics Letters*, 2015, Vol. 41, No. 7, pp. 661-664.
7. Lunin L.S., Sysoev I.A., Alfimova D.L., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S. A study of photo-sensitive InAs/GaAs heterostructures with quantum dots grown by ion-beam deposition, *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2011, Vol. 5, No. 3, pp. 559-562.
8. Pieczarka M., Sek G. The ground state properties of In(Ga)As/GaAs low strain quantum dots, *Physica B: Condensed Matter*, 2016, Vol. 495, pp. 70-75.
9. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Irkha V.A. Features in the Formation of Ge/Si Multilayer Nanostructures under Ion Beam Assisted Crystallization, *Technical Physics Letters*, 2013, Vol. 39, No. 8, pp. 728-731.
10. Pashchenko A.S., Chebotarev S.N., Lunin L.S., Irkha V.A. Specific Features of Doping with Antimony during the Ion-Beam Crystallization of Silicon, *Semiconductors*, 2016, Vol. 50, No. 4, pp. 545-548.
11. Talochkin A.B., Chistokhin I.B., Mashanov V.I. Photoconductivity of ultra-thin Ge(GeSn) layers grown in Si by low-temperature molecular beam epitaxy, *Journal of Applied Physics*, 2016, Vol. 119, No. 13, pp. 134302(1)-134302(5).
12. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunina M.L. On the problem of analysis of elastic deformation on the surface of a semiconductor with a half-recessed quantum dots, *Herald of Southern Scientific Centre RAS*, 2015, Vol. 11, No. 3, pp. 30-37.
13. Lozovskii V.N., Chebotarev S.N., Irkha V.A., Valov G.V. Formation and use of position marks in scanning probe microscopy, *Technical Physics Letters*, 2009, Vol. 35, No. 8, pp. 737-738.
14. Medeiros R.G. Epitaxial growth of strained nanocrystals, *Physica Status Solidi*, 2002, Vol. 230, pp. 443-450.
15. Shetty A., Kumar M., Roul B., Vinoy K.J., Krupanidhi S.B. InN quantum dot based infra-red photodetectors, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2016, Vol. 16, No. 1, pp. 709-714.
16. Downes J.R., Faux D.A., O'Reilly E.P. A simple method for calculating strain distributions in quantum dot structures, *Journal of Applied Physics*, 1997, Vol. 81, No. 10, pp. 6700-6702.
17. Hossain M., Abdullah-Al-Humayun M., Biswas M., Sadi M.A.H. A novel design of InN based quantum-dot laser operating at 1.55 μm , *Advanced Materials Research*, 2012, Vol. 403-408, pp. 4321-4327.

18. *Pearson G.S., Faux D.A.* Analytical solutions for strain in pyramidal quantum dots, *Journal of Applied Physics*, 2000, Vol. 88, No. 2, pp. 730-736.
19. *Saito T., Arakawa Y.* Electronic structure of piezoelectric InGaN quantum dots in GaN calculated using a tight-binding method, *Physica E*, 2002, Vol. 15, pp. 169-181.
20. *Glas F.* Elastic relaxation of isolated and interacting truncated pyramidal quantum dots and quantum wires in a half space, *Applied Surface Science*, 2002, Vol. 188, pp. 9-18.

Статью рекомендовала к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Л.А. Резниченко.

Чеботарев Сергей Николаевич – Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; e-mail: chebotarev.sergei@gmail.com; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132; тел.: 88635255459; профессор кафедры «Нанотехнология в электронике».

Арустамян Давид Арсенович – e-mail: galeriandavid@gmail.com; аспирант кафедры «Нанотехнология в электронике».

Яценко Алексей Николаевич – e-mail: alexuats-npi@ya.ru; аспирант кафедры «Нанотехнология в электронике».

Ермеев Георгий Александрович – e-mail: geo-777999@yandex.ru; аспирант кафедры «Нанотехнология в электронике».

Лунина Марина Леонидовна – Южный научный центр РАН; e-mail: Lunin_LS@mail.ru; 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41; старший научный сотрудник лаборатории «Солнечная энергетика».

Лунин Леонид Сергеевич – e-mail: Lunin_LS@mail.ru; заведующий отделом нанотехнологий, солнечной энергетике и энергосберегающих технологий.

Пашенко Александр Сергеевич – e-mail: as.pashchenko@gmail.com; старший научный сотрудник лаборатории «Кристаллы и структуры для твердотельной электроники».

Chebotarev Sergei Nikolaevich – Platov South Russian State Polytechnical University (NPI); e-mail: chebotarev.sergei@gmail.com; 132, Prosveshcheniya street, NovoCherkassk, 346428, Russia; phone: +78635255459; professor of nanotechnology in electronics department.

Arustamyan David Arsenovich – e-mail: galeriandavid@gmail.com; postgraduate student of nanotechnology in electronics department.

Yatsenko Alexey Nikolaevich – e-mail: alexuats-npi@ya.ru; postgraduate student of nanotechnology in electronics department.

Erimeev Georgii Alexandrovich – e-mail: geo-777999@yandex.ru; postgraduate student of nanotechnology in electronics department.

Lunina Marina Leonidovna – Southern Scientific Center RAS, e-mail: Lunin_LS@mail.ru; 41, Chekhov pr. Rostov-on-Don, 344006, Russia; senior researcher, laboratory of solar energy.

Lunin Leonid Sergeevich – e-mail: Lunin_LS@mail.ru; head of nanotechnology, solar energy and energy saving research department.

Pashchenko Alexander Sergeevich – e-mail: as.pashchenko@gmail.com; senior researcher, laboratory of crystals and structures for solid-state electronics.