

УДК 539.23
DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-3-18-26

ИНДУЦИРОВАННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ НИТЯМИ

© 2017 г. С.Н. Чеботарев^{1,2}, М.Л. Лунина², Д.Л. Алфимова²,
Г.А. Еримеев¹, Л.М. Гончарова¹, А.А.А. Мохамед¹

Аннотация. Предложен метод расчета упругих механических напряжений и индуцированных электрических полей в приграничной области «квантовая нить – матричный материал». Поверхность квантовой нити произвольной формы можно аппроксимировать ограниченным числом элементарных участков. Это позволяет провести интегрирование функции Грина в аналитическом виде с использованием подхода Штро. Объектами исследования служили квантовые нити арсенида индия квадратного сечения, помещенные в бесконечное пространство матричного материала из арсенида галлия, а также квантовые нити нитрида индия гексагонального сечения, заключенные в бесконечное пространство нитрида алюминия. Установлено, что на границе «квантовая нить – матричный материал» формируется скачок механических напряжений для обоих типов квантовых нитей. Упругие напряжения в центре квадратной нити InAs ($\gamma_{xx} + \gamma_{zz}$) = 0,107, в центре гексагональной нити InN – ($\gamma_{xx} + \gamma_{zz}$) = 0,196. Внутри квадратной квантовой нити InAs распределение x -компоненты напряженности поля возрастает и достигает максимума $E_x = 0,4 \cdot 10^7$ В/м. Для гексагональной нити на границе создается скачок напряженности x -составляющей электрического поля, симметрично спадающий по обе стороны границы. В центре гексагональной нити InN напряженность электрического поля становится отрицательной и снижается до $E_x = -47 \cdot 10^7$ В/м. На границе квадратной нити InAs и матрицы GaAs наблюдается максимум $E_z = -0,8 \cdot 10^7$ В/м. В отличие от квадратных нитей для гексагональных нитей в приграничной области InN/AlN создается поле $E_z = -138 \cdot 10^7$ В/м.

Ключевые слова: гетероструктуры с квантовыми нитями, функция Грина, упругие напряжения, индуцированные электрические поля.

INDUCED MECHANICAL STRAIN AND ELECTRIC FIELDS IN NANOHETEROSTRUCTURES WITH QUANTUM WIRES

S.N. Chebotarev^{1,2}, M.L. Lunina², D.L. Alfimova²,
G.A. Erimeev¹, L.M. Goncharova¹, A.A.A. Mohamed¹

Abstract. We proposed a method for calculation of elastic mechanical strain and induced electric fields in the boundary region “quantum wire – matrix material”. It is shown that the surface of a quantum wire of arbitrary shape can be approximated by a limited number of elementary line segments. This approach makes it possible to integrate the Green’s function in analytical form using the Stroh approach. The objects of investigation were square quantum wires of indium arsenide placed in an infinite space of gallium arsenide matrix material, as well as hexagonal indium nitride quantum wires enclosed in an aluminum nitride infinite space. It is established that a mechanical strain jump is formed at the quantum wire – matrix material boundary for both types of quantum wires. The elastic strain at the center of the InAs square wire is ($\gamma_{xx} + \gamma_{zz}$) = 0.107, at the center of the InN hexagonal wire is ($\gamma_{xx} + \gamma_{zz}$) = 0.196. Inside the square InAs quantum wire the distribution

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Rostov Region, Russian Federation), Российская Федерация, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, e-mail: chebotarev.sergei@gmail.com

² Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

of the x -component of the field strength increases and reaches maximum $E_x = 0.4 \cdot 10^7$ V/m. at the boundary. Jump in the strength of the electric field x -component, symmetrically falling on both sides of the boundary, is created for a hexagonal wire. At the center of the InN hexagonal wire the electric field becomes negative and falls to $E_x = -47 \cdot 10^7$ V/m. It is shown that maximum $E_z = -0.8 \cdot 10^7$ V/m is observed at the boundary of the InAs square wire and the GaAs matrix. It was found that for a hexagonal wire, unlike square one, a field $E_z = -138 \cdot 10^7$ V/m is created in the near-boundary region InN/AlN.

Keywords: heterostructures with quantum dots, Green's function, elastic strain, induced electric fields.

1. Васильевский И.С., Пушкарев С.С., Грехов М.М., Виниченко А.Н., Лаврухин Д.В., Коленцова О.С. 2016. Особенности диагностики метаморфных наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии в режиме омега-сканирования. *Физика и техника полупроводников*. 50(4): 567–573.
2. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Zhivotova E.N., Erimeev G.A., Lunina M.L. 2017. Obtaining and doping of InAs-QD/GaAs(001) nanostructures by ion beam sputtering. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 8(1): 12–20. doi: 10.3762/bjnano.8.2
3. Лозовский В.Н., Ирха В.А., Чеботарев С.Н. 2012. Методика получения нанометок и их применение для позиционирования в сканирующей зондовой микроскопии. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 78(9): 33–36.
4. Лозовский В.Н., Лозовский С.В., Чеботарев С.Н., Ирха В.А. 2007. Осаждение тугоплавких металлов на рельефные подложки методом зонной сублимационной перекристаллизации. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 4: 68–70.
5. Gordeev N.Y., Rumyantsev O.I., Savenko I.G., Payusov A.S., Zubov F.I., Maximov M.V., Zhukov A.E. 2013. Refractive index of laser active region based on InAs/InGaAs quantum dots. *Journal of Nanophotonics*. 7(1): 073087. doi: 10.1117/1.JNP.7.073087
6. Лозовский В.Н., Лозовский С.В., Чеботарев С.Н. 2006. Моделирование массопереноса примесей при зонной сублимационной перекристаллизации в цилиндрической ростовой зоне. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 3: 60–63.
7. Лозовский В.Н., Чеботарев С.Н., Ирха В.А., Валов Г.В. 2010. Получение и использование позиционных меток в сканирующей зондовой микроскопии. *Письма в журнал технической физики*. 36(16): 1–5.
8. Timofeev V.A., Nikiforov A.I., Zinovyev V.A., Teys S.A., Pchelyakov O.P. 2015. Formation of Ge/Si nanoscale structures at different growth conditions by molecular beam epitaxy. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 10(1): 99–103. doi: 10.1166/jno.2015.1714
9. Лунин Л.С., Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунина М.Л. 2012. Ионно-лучевая кристаллизация нанокластеров Ge на Si (001). *Вестник Южного научного центра*. 8(2): 9–12.
10. Лунин Л.С., Сысоев И.А., Алфимова Д.Л., Чеботарев С.Н., Пащенко А.С. 2011. Исследование фоточувствительных ге-

- тероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками, выращенных методом ионно-лучевого осаждения. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 6: 58–62.
- Luque A., Linares P.G., Mellor A., Andreev V., Marti A. 2013. Some advantages of intermediate band solar cells based on type II quantum dots. *Applied Physics Letters*. 103(12): 123901. doi: 10.1063/1.4821580
 - Li S., Chen Q., Sun S., Li Y., Zhu Q., Li J., Wang X., Han J., Zhang J., Chen C., Fang Y. 2013. InAs/GaAs quantum dots with wide-range tunable densities by simply varying V/III ratio using metal-organic chemical vapor deposition. *Nanoscale Research Letters*. 8(1): 1–5. doi: 10.1186/1556-276X-8-367
 - Лозовский В.Н., Лозовский С.В., Чеботарев С.Н. 2007. Исследование краевого температурного эффекта при зонной сублимационной перекристаллизации. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 5: 52–56.
 - Elarde V.C., Rangarajan R., Borchardt J.J., Coleman J.J. 2005. Room-temperature operation of patterned quantum-dot lasers fabricated by electron beam lithography and selective area metal-organic chemical vapor deposition. *Photonics Technology Letters*. 17(5): 935–937. doi: 10.1109/LPT.2005.844555
 - Чеботарев С.Н., Пашченко А.С., Лунин Л.С., Ирха В.А. 2016. Закономерности ионно-лучевой кристаллизации свойства полупроводниковых наногетероструктур InAs-QD/GaAs(001). *Российские нанотехнологии*. 11(7–8): 51–57.
 - Чеботарев С.Н., Пашченко А.С., Williamson A., Лунин Л.С., Ирха В.А., Гамидов В.А. 2015. Ионно-лучевая кристаллизация наноструктур InAs/GaAs(001). *Письма в журнал технической физики*. 41(13): 102–110.
 - Белянкова Т.И., Калинин В.В. 2014. К проблеме анализа динамических свойств слоистого полупространства. *Акустический журнал*. 60(5): 492–504.
 - Белянкова Т.И., Калинин В.В. 2016. Функция Грина для предварительно напряженного термоупругого полупространства с неоднородным покрытием. *Прикладная механика и техническая физика*. 57(5): 76–89.
 - Чеботарев С.Н., Пашченко А.С., Лунина М.Л. 2015. К проблеме анализа упругой деформации на поверхности полупространства полупроводника с заглубленными квантовыми точками. *Вестник Южного научного центра*. 11(3): 30–37.
 - Чеботарев С.Н., Лунина М.Л., Лунин Л.С., Пашченко А.С., Арустамян Д.А., Еримеев Г.А., Яценко А.Н. 2016. Моделирование упругой деформации и пьезоэлектрического потенциала на поверхности полупроводника AlN(0001) с внедренными гексагональными квантовыми точками InN. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 4(177): 32–39.
 - Yu P.Y., Cardona M. 2010. *Fundamentals of Semiconductors: physics and materials properties*. Berlin, Springer: 775 p.
 - diffraction in the ω -scanning mode. *Semiconductors*. 50(4): 559–565. doi: 10.1134/S1063782616040242
 - Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Zhivotova E.N., Erimeev G.A., Lunina M.L. 2017. Obtaining and doping of InAs-QD/GaAs(001) nanostructures by ion beam sputtering. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 8(1): 12–20. doi: 10.3762/bjnano.8.2
 - Lozovskii V.N., Irkha V.A., Chebotarev S.N. 2012. [Method of obtaining nanomarks and their use for positioning in scanning probe microscopy]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 78(9): 33–36. (In Russian).
 - Lozovskii V.N., Lozovskii S.V., Chebotarev S.N., Irkha V.A. 2007. [Deposition of refractory metals on relief substrates by zone sublimation regrowth]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 4: 68–70. (In Russian).
 - Gordeev N.Y., Rumyantsev O.I., Savenko I.G., Payusov A.S., Zubov F.I., Maximov M.V., Zhukov A.E. 2013. Refractive index of laser active region based on InAs/InGaAs quantum dots. *Journal of Nanophotonics*. 7(1): 073087. doi: 10.1117/1.JNP.7.073087
 - Lozovskii V.N., Lozovskii S.V., Chebotarev S.N. 2006. [Modeling of impurity mass transfer under zone of sublimation recrystallization in cylindrical growth zone]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 3: 60–63. (In Russian).
 - Lozovskii V.N., Chebotarev S.N., Irkha V.A., Valov G.V. 2010. Formation and use of positioning marks in scanning probe microscopy. *Technical Physics Letters*. 36(8): 737–738. doi: 10.1134/S1063785010080171
 - Timofeev V.A., Nikiforov A.I., Zinovyev V.A., Teys S.A., Pchelyakov O.P. 2015. Formation of Ge/Si nanoscale structures at different growth conditions by molecular beam epitaxy. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 10(1): 99–103. doi: 10.1166/jno.2015.1714
 - Lunin L.S., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunina M.L. 2012. [Ge-nanoclusters' ion-beam crystallization on Si (001)]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 8(2): 9–12. (In Russian).
 - Lunin L.S., Sysoev I.A., Alfimova D.L., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S. 2011. 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*. 5(3): 559–562. doi: 10.1134/S1027451011060127
 - Luque A., Linares P.G., Mellor A., Andreev V., Marti A. 2013. Some advantages of intermediate band solar cells based on type II quantum dots. *Applied Physics Letters*. 103(12): 123901. doi: 10.1063/1.4821580
 - Li S., Chen Q., Sun S., Li Y., Zhu Q., Li J., Wang X., Han J., Zhang J., Chen C., Fang Y. 2013. InAs/GaAs quantum dots with wide-range tunable densities by simply varying V/III ratio using metal-organic chemical vapor deposition. *Nanoscale Research Letters*. 8(1): 1–5. doi: 10.1186/1556-276X-8-367
 - Lozovskii V.N., Lozovskii S.V., Chebotarev S.N. 2007. [Study of edge temperature effect in zone sublimation recrystallization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 5: 52–56. (In Russian).
 - Elarde V.C., Rangarajan R., Borchardt J.J., Coleman J.J. 2005. Room-temperature operation of patterned quantum-dot lasers

REFERENCES

- Vasil'evskii I.S., Pushkarev S.S., Grekhov M.M., Vinichenko A.N., Lavrukhin D.V., Kolentsova O.S. 2016. Features of the diagnostics of metamorphic InAlAs/InGaAs/InAlAs nanoheterostructures by high-resolution X-ray

- fabricated by electron beam lithography and selective area metal-organic chemical vapor deposition. *Photonics Technology Letters*. 17(5): 935–937. doi: 10.1109/LPT.2005.844555
15. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Irkha V.A. Regularities of ion-beam-induced crystallization and properties of InAs-QD/GaAs(001) semiconductor nanoheterostructures. *Nanotechnologies in Russia*. 11(7–8): 435–443. doi: 10.1134/S1995078016040030
16. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Williamson A., Lunin L.S., Irkha V.A., Gamidov V.A. 2015. Ion beam crystallization of InAs/GaAs(001) nanostructures. *Technical Physics Letters*. 41(7): 661–664. doi: 10.1134/S1063785015070056
17. Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. 2014. On the problem of analyzing the dynamic properties of a layered half-space. *Acoustical Physics*. 60(5): 530–542. doi: 10.1134/S1063771014050017
18. Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. 2016. Green's function for a prestressed thermoelastic half-space with an inhomogeneous coating. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 57(5): 828–840. doi: 10.1134/S0021894416050096
19. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunina M.L. 2015. [On the problem of analyzing the elastic strain on half-space semiconductor with buried quantum dots]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 11(3): 30–37. (In Russian).
20. Chebotarev S.N., Lunina M.L., Lunin L.S., Pashchenko A.S., Arustamyan D.A., Erimeev G.A., Yatsenko A.N. 2016. [Simulation of elastic deformation and piezoelectric potential on the surface of semiconductor AlN (0001) with buried InN hexagonal quantum dots]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 4(177): 32–39. (In Russian).
21. Yu P.Y., Cardona M. 2010. *Fundamentals of Semiconductors: physics and materials properties*. Berlin, Springer: 775 p.

Поступила 03.07.2017