

## Раздел IV. Моделирование и проектирование

УДК 621.383.52

DOI 10.18522/2311-3103-2016-10-122128

**И.В. Писаренко**

### **РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ФОТОДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ КОММУТАЦИИ\***

*Данная статья направлена на решение проблемы исследования и разработки моделей и методов моделирования оптоэлектронных компонентов оптических межсоединений для интегральных схем. Рассматривается концепция создания многоядерных ультрабольшой интегрально-оптических схем, которые комбинируют кремниевые цифровые ядра и интегральные системы оптической коммутации на основе материалов типа  $A^{III}B^V$ . Объектами исследования являются быстродействующие полупроводниковые фотодетекторы, предназначенные для функционирования в составе интегральных межъядерных оптических соединений совместно с лазерами-модуляторами, которые характеризуются терагерцовыми частотами модуляции генерируемых оптических сигналов. Целью работы является разработка моделей и средств моделирования, которые позволяют описывать переходные процессы, протекающие в структурах фотодетекторов для интегральных систем оптической коммутации при детектировании субпикосекундных лазерных импульсов. Апробация предлагаемых численных моделей, методики диффузионно-дрейфового моделирования и программных средств осуществлялась для исследования характеристик GaAs p-i-n структур и фотодиодов с барьерами Шоттки. Научная новизна работы заключается в том, что в ней предложена методика численного диффузионно-дрейфового моделирования, основанная на применении явной и противоположной разностных схем, метода Гуммеля и комбинированного базиса переменных и позволяющая в три раза снизить затраты временных и вычислительных ресурсов на получение результатов моделирования при сохранении адекватности последних. Для реализации предлагаемых моделей и методов моделирования разработаны прикладные программные средства на языке MATLAB в среде GNU Octave, позволяющие исследовать p-i-n структуры и фотодиоды с барьерами Шоттки с различными электрофизическими и конструктивно-технологическими параметрами.*

*Интегральные системы оптической коммутации; быстродействующие фотодетекторы; численное моделирование; диффузионно-дрейфовые модели.*

**I.V. Pisarenko**

### **DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODELS AND SIMULATION METHODS DESIGNED FOR THE INVESTIGATION OF HIGH-SPEED PHOTODETECTORS FOR INTEGRATED OPTICAL COMMUTATION SYSTEMS**

*In this paper, we discuss the problem of research and development of models and methods designed for the simulation of optoelectronic components for optical interconnections of integrated circuits. The prospective concept of the implementation of multi-core ultra-large-scale optical integrated circuits with silicon digital cores and  $A^{III}B^V$  inter-core integrated optical commutation*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-07-00018) и Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 8.797.2014К).

*systems is under consideration. High-speed semiconductor photodetectors designed for the operation as parts of integrated inter-core optical interconnections together with the lasers-modulators are the objects of this research. The aforementioned lasers-modulators can generate optical signals with terahertz modulation frequencies. This paper is aimed at the development of models and modelling aids allowing simulating the transients which take place in structures of photosensitive devices during the detection of subpicosecond laser pulses. We have applied the proposed numerical models, technique of drift-diffusion simulation, and software for the research of the performance of GaAs p-i-n structures and Schottky-barrier photodiodes. The scientific novelty of this paper is determined by the development of the effective technique of drift-diffusion numerical simulation based on the application of upwind and explicit difference schemes, Gummel iteration method, and different variable bases. The consumption of computational and time resources necessary for the implementation of the proposed technique is three times less than it is required for its analogs. We have developed the applied software in GNU Octave program using the MATLAB programming language for the implementation of the aforementioned models and methods. This software allows studying the p-i-n and Schottky-barrier photodiodes with different electrophysical, constructive and technological parameters.*

*Integrated optical commutation systems; high-speed photodetectors; numerical simulation; drift-diffusion models.*

**Введение.** Одним из активно развивающихся научных направлений микро- и наноэлектроники является поиск решения проблемы улучшения характеристик межэлементных соединений в интегральных схемах (ИС). В настоящее время предложены различные подходы, направленные как на модернизацию и оптимизацию традиционных металлических межсоединений, так и на реализацию принципиально новых методов коммутации [1–5]. По мнению большинства экспертов, перспективной концепцией является создание микросхем с интегрированными оптическими соединениями [6–8].

В статье рассматривается концепция реализации многоядерных УБИС, комбинирующих кремниевые цифровые ядра, изготовленные по традиционным технологиям микроэлектроники, и интегральные системы оптической межъядерной коммутации на основе материалов типа  $A^{III}B^V$  [9, 10]. К настоящему моменту разработаны модели и методы моделирования интегральных инжекционных лазеров с двойными  $A^{III}B^V$ -наногетероструктурами и функционально интегрированными модуляторами излучения [11, 12]. Согласно результатам моделирования, частота модуляции оптического сигнала в подобных устройствах может достигать 1 ТГц и выше.

Актуальной проблемой является разработка фотодетекторов, предназначенных для функционирования в составе оптических межсоединений совместно с вышеупомянутыми лазерами-модуляторами. Перспективными вариантами быстродействующих интегральных фотодетекторов являются p-i-n-структуры и фотодиоды с барьерами Шоттки [13].

Целью данной работы является разработка численных моделей и средств моделирования, позволяющих исследовать переходные процессы, которые протекают в GaAs p-i-n-структурах и фотодиодах Шоттки интегральных систем оптической коммутации, а также рассчитывать их ожидаемые характеристики и обоснованно оптимизировать электрофизические и конструктивно-технологические параметры.

**Постановка задачи исследования.** В данной работе рассматриваются структуры фотодетекторов для интегральных систем оптической коммутации, которые представлены на рис. 1. Указанные приборы имеют встроенные оптические резонаторы, образованные полу- и полностью отражающими зеркалами 2, 3 и служащие для повышения квантовой эффективности фотодиодов. Максимальная мощность оптического излучения оценивается в соответствии с характеристиками лазеров-модуляторов и составляет 1 мВт. Энергия падающих фотонов принимается равной ширине запрещенной зоны GaAs при комнатной температуре. Моделиро-

вание осуществляется на одномерной координатной сетке. Поглощение света оценивается в рамках интегрального подхода, что обуславливает возможность адекватного моделирования данных приборов в одномерном приближении. В статье рассматривается фотодиодный режим работы фотодетекторов для интегральных систем оптической коммутации [14]. Исходными данными при решении рассматриваемой задачи являются:

- ◆ электрофизические и конструктивно-технологические параметры фоточувствительных приборов;
- ◆ параметры управляющих воздействий;
- ◆ начальные приближения распределения электрического потенциала;
- ◆ координатная и временная сетки.

На основе данных параметров рассчитываются граничные и начальные условия, которые в дальнейшем используются для моделирования нестационарных процессов.

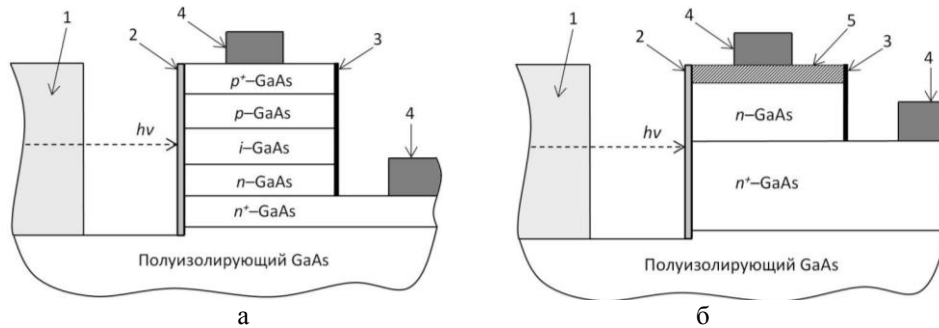


Рис. 1. Структуры исследуемых фотодетекторов для интегральных систем оптической коммутации: а – GaAs p-i-n структура; б – GaAs фотодиод Шоттки с приконтактной областью n-типа (1 – интегральные оптические волноводы; 2 – полупрозрачные зеркала; 3 – полностью отражающие зеркала; 4 – омические контакты; 5 – слой металла, образующий контакт Шоттки)

**Модели и методы моделирования.** В данном исследовании для моделирования процессов переноса и накопления носителей заряда в структурах фотодетекторов применялись нестационарные полуклассические физико-топологические модели (ФТМ) на основе фундаментальной системы уравнений полупроводника (ФСУ) в диффузионно-дрейфовом приближении. Указанная система уравнений в векторном виде может быть представлена следующим образом [15]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \text{div} \left\{ \mu_n \left[ -n \cdot \text{grad}(\varphi) + \varphi_T \cdot \text{grad}(n) \right] \right\} + G - R; \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \text{div} \left\{ \mu_p \left[ p \cdot \text{grad}(\varphi) + \varphi_T \cdot \text{grad}(p) \right] \right\} + G - R; \quad (2)$$

$$\text{div} \left[ \varepsilon \cdot \text{grad}(\varphi) \right] = \frac{q}{\varepsilon_0} \cdot (n - p - N_D + N_A), \quad (3)$$

где  $n$ ,  $p$  – концентрации электронов и дырок;  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок;  $t$  – время;  $q$  – элементарный заряд;  $\varphi$  – электростатический потенциал;  $\varphi_T$  – температурный потенциал;  $G$ ,  $R$  – скорости генерации и рекомбинации электронно-дырочных пар;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $N_D$ ,  $N_A$  – концентрации ионизированных доноров и акцепторов.

При моделировании использовались классические для диффузионно-дрейфовых моделей граничные условия, соответствующие фотодиодному режиму работы фотоприемников в предположении бесконечной скорости рекомбинации на контактах приборов [16]. Расчет начальных условий осуществлялся путем численного решения стационарной ФСУ в стандартном базисе переменных  $\{F_n, F_p, \varphi\}$ , где  $F_n, F_p$  – экспоненты квазиуровней Ферми для электронов и дырок.

Для вычисления подвижностей носителей заряда  $\mu_n$  и  $\mu_p$  применялась известная аналитическая модель Коэ-Томаса, учитывающая зависимости данных электрофизических параметров от температуры полупроводника и концентрации легирующих примесей [17]. Генерация электронно-дырочных пар, происходящая при освещении структур фоточувствительных приборов лазерными импульсами, описывалась с использованием следующей модели:

$$G_{opt} = \frac{\eta \cdot P(t)}{E_{ph}}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – внешняя квантовая эффективность фотодетектора с резонатором, рассчитывавшаяся по формуле из работы [18] для пикового значения, которое соответствует условию резонанса;  $P(t)$  – объемная плотность мощности оптического излучения, падающего на фотоприемник в момент времени  $t$ ;  $E_{ph}$  – энергия фотонов падающего излучения.

Для численного решения нестационарной ФСУ (1)–(3) с соответствующими граничными и начальными условиями была разработана методика численного диффузионно-дрейфового моделирования, комбинирующая различные методы решения задач математической физики и моделирования элементов ИС. Представленная методика имеет следующие характерные особенности:

- ◆ для дискретизации уравнений используется метод конечных разностей [19];
- ◆ при решении стационарной ФСУ для расчета начальных условий используется итерационный метод Гуммеля [16];
- ◆ дискретизация производных по времени осуществляется с использованием явной разностной схемы [19];
- ◆ при дискретизации правых частей уравнений непрерывности используется противопоточная схема 1-го порядка [20];
- ◆ для моделирования переходных процессов осуществляется численное решение нестационарной дискретной ФСУ в комбинированном базисе  $\{n, p, F_n, F_p, \varphi\}$  методом Гуммеля с одной итерацией на каждом шаге по времени;
- ◆ системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) решаются прямым методом.

Применение явной и противопоточной схем дискретизации в комплексе с методом Гуммеля позволяет свести задачу реализации нестационарных численных диффузионно-дрейфовых моделей полупроводниковых приборов к решению на каждом шаге по времени одной СЛАУ с размерностью, соответствующей рассматриваемой координатной сетке, и выполнению ряда сопутствующих математических операций. Очевидно, что подобная методика характеризуется в три раза меньшими затратами временных и вычислительных ресурсов по сравнению с традиционным подходом [16] при сохранении адекватности результатов моделирования. Это позволяет сделать вывод о том, что предлагаемая методика численного диффузионно-дрейфового моделирования характеризуется оптимизированным балансом между адекватностью результатов моделирования и затратами временных и вычислительных ресурсов на их получение.

**Результаты моделирования.** На рис. 2 представлены результаты моделирования, полученные для случая освещения фотодетекторов сериями импульсов длительностью 0,1 пс. Как следует из графиков, приборы с длиной активной области 200 нм характеризуются большей крутизной фронтов импульсов фототока, чем их аналоги с увеличенными областями. Данный факт обусловлен меньшим временем пролета активной области носителями заряда при идентичных значениях их средних дрейфовых скоростей. Согласно графику на рис. 3, в, принципиальные различия в быстродействии исследованных р-і-п-структур и фотодиодов Шоттки отсутствуют.

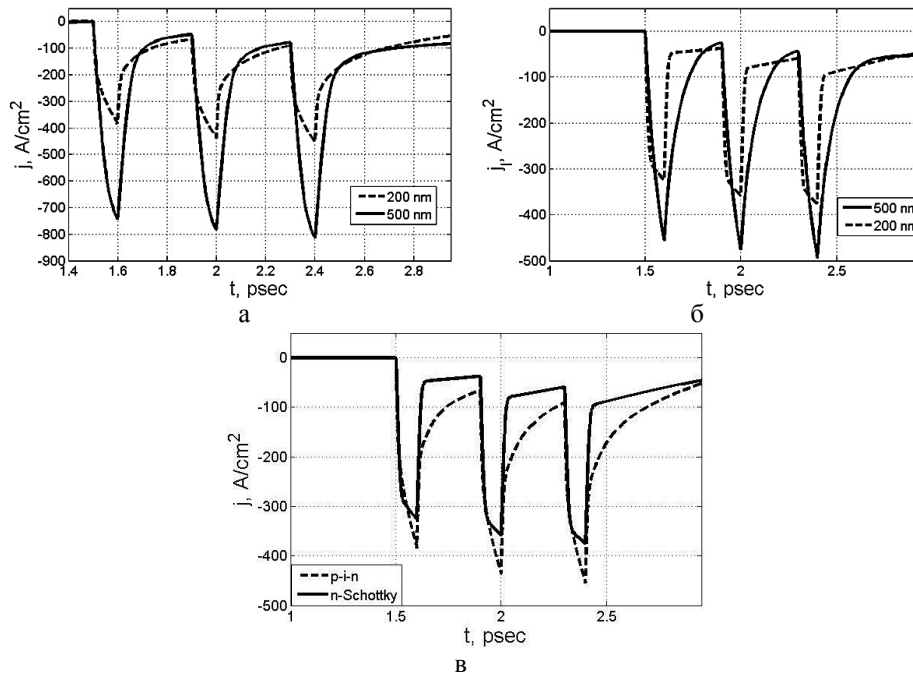


Рис. 2. Вид импульсов фототока в случае освещения р-і-п-структур (а) и фотодиодов Шоттки n-типа (б) с различными длинами активных областей сериями лазерных импульсов длительностью 0,1 пс; сравнение быстродействия р-і-п-структуры и фотодиода Шоттки n-типа с длинами активных областей 200 нм (в)

**Заключение.** Таким образом, разработанные модели, методы моделирования и ПО позволяют исследовать переходные процессы, протекающие в GaAs р-і-п-структурах и фотодиодах Шоттки для интегральных систем оптической коммутации, а также рассчитывать их ожидаемые характеристики и обоснованно оптимизировать параметры с целью повышения быстродействия и технологичности. Новизна предложенной методики численного решения диффузионно-дрейфовой системы уравнений обусловлена тем, что ее использование позволяет в три раза уменьшить количество СЛАУ, решаемых на каждом шаге сетки по времени, и достичь оптимизированного баланса между адекватностью результатов моделирования и затратами временных и вычислительных ресурсов на их получение.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. International Technology Roadmap for Semiconductors: 2013 Edition. Interconnect // Semiconductor Industry Association. – URL: <http://www.itrs2.net/itrs-reports.html>.
2. Rakheja S., Naeemi A. Modeling interconnects for post-CMOS devices and comparison with copper interconnects // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2011. – Vol. 58. – P. 1319-1328.
3. Subash S., Kolar J., Chowdhury M.H. A new spatially rearranged bundle of mixed carbon nanotubes as VLSI interconnection // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. – 2013. – Vol. 12. – P. 3-12.
4. Naeemi A., Meindl J.D. Conductance modeling for graphene nanoribbon (GNR) interconnects // *IEEE Electron Device Letters*. – 2007. – Vol. 28. – P. 428-431.
5. Chang M.-C.F., Socher E., Tam S.-W., Cong J., Reinman G. RF Interconnects for Communications On-Chip // *Proceedings of the IEEE International Symposium on Physical Design, Portland, USA, 13–16 April 2008*. – P. 78-83.
6. Miller D.A.B. Optical interconnects to electronic chips // *Applied Optics*. – 2010. – Vol. 49. – P. F59-F70.
7. Ohashi K., Nishi K., Shimizu T., Nakada M., Fujikata J., Ushida J., Toru S., Nose K., Mizuno M., Yukawa H., et al. On-chip optical interconnect // *Proceedings of the IEEE*. – 2009. – Vol. 97. – P. 1186-1198.
8. Белкин М., Сизов А. Оптические межсоединения в интегральных схемах // *Наноиндустрия*. – 2012. – № 1 (31). – С. 8-14.
9. Ohira K., Kobayashi K., Iizuka N., Yoshida H., Ezaki M., Uemura H., Kojima A., Nakamura K., Furuyama H., Shibata H. On-chip optical interconnection by using integrated III-V laser diode and photodetector with silicon waveguide // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18. – P. 15440-15447.
10. Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Денисенко М.А. Метод построения интегральных систем оптической коммутации многоядерных УБИС // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 4 (117). – С. 21-27.
11. Pisarenko I.V., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Diffusion-drift model of injection lasers with double heterostructure // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – Vol. 586. – P. 012-015.
12. Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Diffusion-drift model of the transport of charge carriers and photons in injection lasers // *Technical Physics Letters*. – 2015. – Vol. 41. – P. 587-590.
13. Saleh B.E.A., Teich M.C. *Fundamentals of Photonics*. – 2nd. ed. – Wiley-Interscience, 2007.
14. Дирочка А.И., Курбатов Л.Н. Фотозлектроника // *Базовые лекции по электронике. Т. II. Твердотельная электроника: Сб. под общ. ред. В.М. Пролейко*. – М.: Техносфера, 2009. – С. 206-250.
15. Абрамов И.И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и наноэлектроники. Ч. II. Модели полуклассического подхода // *Нано- и микро-системная техника*. – 2006. – № 9. – С. 26-36.
16. Абрамов И.И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. – Мн.: БГУ, 1999. – 189 с.
17. Palankovski V., Quay R. *Analysis and Simulation of Heterostructure Devices*. – Wien: Springer-Verlag, 2004.
18. Unlu M.S., Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices // *J. Appl. Phys.* – 1995. – Vol. 78, No. 2. – P. 607-639.
19. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: учеб. пособие для вузов. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
20. Куликова И.В., Лысенко И.Е., Приступчик Н.К., Лысенко А.С. Численное решение нестационарной фундаментальной системы уравнений полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2014. – № 9 (158). – С. 106-111.

## REFERENCES

1. International Technology Roadmap for Semiconductors: 2013 Edition. Interconnect, *Semiconductor Industry Association*. Available at: <http://www.itrs2.net/itrs-reports.html>.
2. Rakheja S., Naeemi A. Modeling interconnects for post-CMOS devices and comparison with copper interconnects, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, Vol. 58, pp. 1319-1328.
3. Subash S., Kolar J., Chowdhury M.H. A new spatially rearranged bundle of mixed carbon nanotubes as VLSI interconnection, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2013, Vol. 12, pp. 3-12.
4. Naeemi A., Meindl J.D. Conductance modeling for graphene nanoribbon (GNR) interconnects, *IEEE Electron Device Letters*, 2007, Vol. 28, pp. 428-431.

5. Chang M.-C.F., Socher E., Tam S.-W., Cong J., Reinman G. RF Interconnects for Communications On-Chip, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Physical Design, Portland, USA, 13–16 April 2008*, pp. 78-83.
6. Miller D.A.B. Optical interconnects to electronic chips, *Applied Optics*, 2010, Vol. 49, pp. F59-F70.
7. Ohashi K., Nishi K., Shimizu T., Nakada M., Fujikata J., Ushida J., Toru S., Nose K., Mizuno M., Yukawa H., et al. On-chip optical interconnect, *Proceedings of the IEEE*, 2009, Vol. 97, pp. 1186-1198.
8. Belkin M., Sigov A. Opticheskie mezhsoedineniya v integral'nykh skhemakh [Optical interconnects in integrated circuits], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2012, No. 1 (31), pp. 8-14.
9. Ohira K., Kobayashi K., Iizuka N., Yoshida H., Ezaki M., Uemura H., Kojima A., Nakamura K., Furuyama H., Shibata H. On-chip optical interconnection by using integrated III-V laser diode and photodetector with silicon waveguide, *Optics Express*, 2010, Vol. 18, pp. 15440-15447.
10. Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Metod postroeniya integral'nykh sistem opticheskoy kommutatsii mnogoyadernykh UBIS [Method of constructing integrated switching systems of multi-core ulsi], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 21-27.
11. Pisarenko I.V., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Diffusion-drift model of injection lasers with double heterostructure, *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, Vol. 586, pp. 012-015.
12. Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Diffusion-drift model of the transport of charge carriers and photons in injection lasers, *Technical Physics Letters*, 2015, Vol. 41, pp. 587-590.
13. Saleh B.E.A., Teich M.C. Fundamentals of Photonics. 2nd. ed. Wiley-Interscience, 2007.
14. Dirochka A.I., Kurbatov L.N. Fotoelektronika [Photonics], *Bazovye lektsii po elektronike* [Basic lectures on electronics]. Vol. II. Tverdotel'naya elektronika: Sb. pod obshch. red. V.M. Proleyko [Solid-state electronics: a Collection ed. by V.M. Proleiko]. Moscow: Tekhnosfera, 2009, pp. 206-250.
15. Abramov I.I. Problemy i printsipy fiziki i modelirovaniya pribornykh struktur mikro- i nanoelektroniki. Ch. II. Modeli poluklassicheskogo podkhoda [Problems and principles of physics and modeling of device structures of micro- and nanoelectronics. Part II. Model semiclassical approach], *Nano- i mikro-sistemnaya tekhnika* [Nano- and micro-system technique], 2006, No. 9, pp. 26-36.
16. Abramov I.I. Modelirovanie fizicheskikh protsessov v elementakh kremnievykh integral'nykh mikroskhem [Modeling of physical processes in elements of silicon integrated circuits]. Minsk: BGU, 1999, 189 p.
17. Palankovski V., Quay R. Analysis and Simulation of Heterostructure Devices. Wien: Springer-Verlag, 2004.
18. Unlu M.S., Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices, *J. Appl. Phys.*, 1995, Vol. 78, No. 2, pp. 607-639.
19. Samarskiy A.A., Gulin A.V. Chislennyye metody: ucheb. posobie dlya vuzov [Numerical methods: textbook. the manual for high schools]. Moscow: Nauka, 1989, 432 p.
20. Kulikova I.V., Lysenko I.E., Pristupchik N.K., Lysenko A.S. Chislennoe reshenie nestatsionarnoy fundamental'noy sistemy uravneniy poluprovodnika v diffuzionno-dreyfovom priblizhenii [Numerical solution of nonstationary fundamental equation system semiconductor in the diffusion-drift approximation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 106-111.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.А. Рындин.

**Писаренко Иван Вадимович** – ООО «Центр нанотехнологий»; e-mail: ivan123tgn@yandex.ru; 347900, г. Таганрог, пер. Тургеневский, 16; тел.: +78634371603; научный сотрудник.

**Pisarenko Ivan Vadimovich** – «Nanotechnology center» Limited Liability Company; e-mail: ivan123tgn@yandex.ru; 16, Turgenevskiy, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634371603; research assistant.