

Jityaev Igor Leonidovich – e-mail: jityaev.igor@gmail.com; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

Spiridonov Oleg Borisovich – Southern Laser Innovation Technological Center; e-mail: o.spiridonov@slitc.ru; 1, Aviatorov square, Taganrog, 347923, Russia; phone: +78634340855; cand. of eng. sc.; CEO.

УДК 621.373.826

Е.А. Рынди́н, М.А. Денисенко, А.С. Исаева

**ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНАЛЬНО ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ
ЛАЗЕРОВ-МОДУЛЯТОРОВ**

Рассмотрен метод построения функционально интегрированных инжекционных лазеров-модуляторов, объединяющих в единой наногетероструктуре инжекционный лазер и быстродействующий модулятор оптического излучения, что позволяет, с одной стороны, расширить диапазон частот модуляции до единиц терагерц, а с другой, – обеспечить высокую технологичность и возможность реализации лазеров и модуляторов на кристалле интегральной схемы в едином технологическом цикле. В цепи питания лазера-модулятора задается ток накачки, обеспечивающий инверсную заселенность при неизменном во времени суммарном числе носителей заряда в квантовых ямах гетероструктуры активной области. Амплитудная модуляция лазерного излучения осуществляется посредством изменения управляющего поля, поперечного к направлению плотности тока накачки. Изменение направления поперечного управляющего поля при неизменном токе накачки приводит к передислокации носителей заряда в пространственно смещенных квантовых областях, результатом которой является пространственное совмещение или разделение максимумов плотности электронов и дырок в квантовых ямах зоны проводимости и валентной зоны, приводящее к увеличению или уменьшению интенсивности лазерного излучения. Проведен сравнительный анализ ограничений, свойственных современным моделям инжекционных лазеров, основанным на уравнениях кинетики и уравнениях фундаментальной системы. На основе анализа фундаментальной системы уравнений полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении и уравнений кинетики лазеров разработаны физико-топологическая и схемотехническая модели, позволяющие с различной степенью детализации проводить численный анализ динамики процессов в инжекционных лазерах-модуляторах с учетом их принципов функционирования, режимов работы, структурно-топологических особенностей, профиля легирования, неравномерности пространственных распределений концентраций электронов, дырок и фотонов в активной области лазера, особенностей пространственного распределения плотности тока, влияния периферийных областей лазера-модулятора на его характеристики.

Инжекционный лазер; модулятор оптического излучения; модель.

E.A. Ryndin, M.A. Denisenko, A.S. Isaeva

**PHYSICAL-TOPOLOGICAL AND CIRCUIT MODELS OF FUNCTIONALLY
INTEGRATED INJECTION LASERS-MODULATORS**

The method of constructing of functionally integrated injection laser-modulator that combines in a single nanoheterostructure injection laser and a fast modulator of optical radiation, which allows, on the one hand, to extend the range of modulation frequencies up to one terahertz, and the other, to guarantee high productivity and possibility of realization of lasers and modulators on a chip of integrated circuit in a single technological cycle. The power circuit of the laser-modulator sets the constant pump current, which provides the fixed in time total number of charge carriers in quantum wells of heterostructure active region. Amplitude modulation of laser radi-

tion is carried out by changing the controlling field transverse to the direction of the pump current density. The change in the direction of transverse operating field at a constant pumping current leads to the relocation of charge carriers in quantum spatially shifted areas, the result of which is a spatial combination or splitting of maximums density of electrons and holes in quantum wells of the conduction and valence bands, leading to an increase or a decrease in the intensity of the laser radiation. A comparative analysis of the limitations of conventional models of injection lasers based on equations of kinetics and the equations of the fundamental system has been implemented. Based on the analysis of the fundamental system of equations of semiconductor in the diffusion-drift approximation and kinetic equations of the lasers physical-topological and circuit models were developed with different levels of detail to conduct numerical analysis of the dynamics of processes in the injection lasers-modulators with regard to their structural and topological features, doping profile, the uneven spatial distributions of electrons, holes and photons concentrations in the active region of the laser, the characteristics of the spatial distribution of the current density, the influence of peripheral areas of the laser-modulator on its characteristics.

Injection laser; modulator of optical radiation; model.

Введение. Одной из проблем увеличения производительности ультрабольших интегральных схем (УБИС) является недостаточно высокая эффективность применяющихся металлических межъядерных соединений [1–3]. Перспективным считается переход к интегральным системам оптической коммутации, основными элементами которых являются, в частности, интегральные инжекционные лазеры и модуляторы оптического излучения [2].

В работах [4–9] представлен метод построения интегральных оптоэлектронных элементов, объединяющих в единой наногетероструктуре инжекционные лазеры и быстродействующие модуляторы, что позволяет, с одной стороны, расширить диапазон частот модуляции до единиц терагерц, а с другой, – обеспечить высокую технологичность и возможность реализации лазеров и модуляторов на кристалле УБИС в едином технологическом цикле.

Метод построения лазеров-модуляторов. Лазер-модулятор представляет собой полупроводниковую наногетероструктуру, в которой функционально интегрированы лазер с соответствующими омическими (питающими) контактами и области модулятора с дополнительными (управляющими) контактами [7, 8]. Зонные диаграммы одного из вариантов активной области лазера-модулятора схематически показаны на рис. 1 [7]. В цепи питания лазера-модулятора задается ток накачки, обеспечивающий инверсную заселенность при неизменном во времени суммарном числе носителей заряда в квантовых ямах активной области. Амплитудная модуляция лазерного излучения осуществляется посредством изменения управляющего поля, поперечного к направлению плотности тока накачки. В соответствии с рис. 1, при одном направлении поперечного поля наблюдается передислокация и пространственное совмещение максимумов плотности электронов и дырок в квантовых ямах зоны проводимости и валентной зоны, приводящее к увеличению интенсивности лазерного излучения, а при противоположном направлении управляющего поля – обратная передислокация, приводящая к пространственному разделению максимумов плотности подвижных носителей и к снижению интенсивности генерируемого излучения [7].

Поскольку изменение управляющего поля при неизменном токе накачки не меняет суммарного числа носителей заряда в квантовых ямах активной области лазера-модулятора, максимальная частота модуляции не ограничена относительно инерционными переходными процессами в цепи питания лазера, а определяется временем управляемой передислокации максимумов плотности электронов и дырок в квантовых ямах гетероструктуры, которое может достигать 0,1 пс и менее, что соответствует терагерцовому диапазону [4].

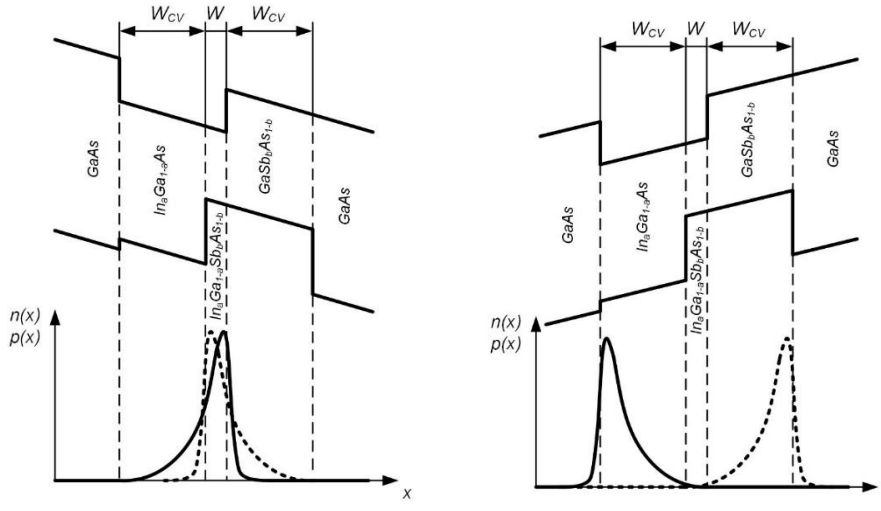


Рис. 1. Зонные диаграммы и распределения концентраций электронов ($n(x)$ – сплошные линии) и дырок ($p(x)$ – пунктирные линии) в активной области лазера-модулятора при противоположных направлениях управляющего поля

Физико-топологическая модель лазеров-модуляторов. Для исследования процессов в инжекционных лазерах широко используются уравнения кинетики, имеющие, в общем случае, следующий вид [10–12]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{j(t)}{eD} - \frac{n}{\tau_s} - v_g n_{ph} g(n, n_{ph}); \quad (1)$$

$$\frac{dn_{ph}}{dt} = -\frac{n_{ph}}{\tau_f} + \beta \frac{n}{\tau_s} + v_g n_{ph} g(n, n_{ph}), \quad (2)$$

где n – концентрация носителей заряда в активной области лазера; n_{ph} – плотность фотонов; j – плотность тока накачки; t – время; e – элементарный заряд; D – размер активной области; $g(n, n_{ph})$ – коэффициент оптического усиления; β – доля спонтанного излучения, попадающего в лазерную моду; τ_s – время спонтанной излучательной рекомбинации; τ_f – время жизни фотона в активной области; v_g – скорость фотонов в активной области лазера.

Уравнения (1), (2) не учитывают неравномерность пространственных распределений концентраций носителей заряда и фотонов в активной области, особенности пространственного распределения плотности тока, а также влияние периферийных областей лазера на его характеристики. Ввиду необходимости учета перечисленных факторов в процессе моделирования рассматриваемых лазеров-модуляторов, при выполнении данного исследования на основе анализа уравнений кинетики (1), (2) и фундаментальной системы уравнений полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении [13–15] разработана физико-топологическая модель, имеющая следующий вид:

$$\nabla(\varepsilon \nabla \varphi) = \frac{e}{\varepsilon_0} (n - p - N); \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} = \nabla[\mu_n(-n \nabla(\varphi + V_n) + \varphi_T \nabla n)] - \frac{\sqrt{np - n_i^2}}{\tau_s} - v_g n_{ph} g(\sqrt{np - n_i^2}, n_{ph}); \quad (4)$$

$$\frac{dp}{dt} = \nabla[\mu_p(p\nabla(\varphi - V_p) + \varphi_T\nabla p)] - \frac{\sqrt{np - n_i^2}}{\tau_s} - v_g n_{ph} g(\sqrt{np - n_i^2}, n_{ph}); \quad (5)$$

$$\frac{dn_{ph}}{dt} = -\frac{n_{ph}}{\tau_f} + \beta \frac{\sqrt{np - n_i^2}}{\tau_s} + v_g n_{ph} g(\sqrt{np - n_i^2}, n_{ph}), \quad (6)$$

$$g = \begin{cases} g(\sqrt{np - n_i^2}, n_{ph}) > 0, & \text{при } E_{Fn} - E_{Fp} \geq E_C - E_V; \\ 0, & \text{при } E_{Fn} - E_{Fp} < E_C - E_V, \end{cases} \quad (7)$$

где n , p – концентрации электронов и дырок, соответственно; N – эффективная концентрация примесей; n_i – собственная концентрация; φ – электростатический потенциал; φ_T – температурный потенциал; V_n , V_p – гетероструктурный потенциал в зоне проводимости и в валентной зоне, соответственно; μ_n , μ_p – подвижности электронов и дырок; ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; E_{Fn} , E_{Fp} – квазиуровни Ферми для электронов и дырок; E_C , E_V – уровни «дна» зоны проводимости и «потолка» валентной зоны.

В предложенной системе (3)–(7) коэффициент оптического усиления g определяется аналитическими выражениями, аналогичными приведенным в [16], в которых обобщенная концентрация носителей заряда заменена выражением $\sqrt{np - n_i^2}$.

Схемотехническая модель лазеров-модуляторов. Численное решение системы (3)–(7) требует, как правило, значительных затрат времени и вычислительных ресурсов [17–20]. Поэтому на основе анализа результатов физико-топологического моделирования, полученных с использованием уравнений (3)–(7), разработана более компактная схемотехническая модель лазеров-модуляторов, позволяющая значительно сократить затраты времени и требуемые вычислительные ресурсы:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{j(t)}{eL} - \frac{n}{\tau_s} - v_g n_{ph} g(n, n_{ph}) + \quad (8)$$

$$+ \frac{1}{2W} \cdot \frac{\mu_n + \mu_p}{W_{CV} + W} \left[(n_{CV} W_{CV} + nW) \left(E_0 + \frac{U_G(t)}{W_G} \right) + 2\varphi_T (n_{CV} - n) \right];$$

$$\frac{dn_{CV}}{dt} = \frac{j(t)}{eL} - \frac{n_{CV}}{\tau_s} - \quad (9)$$

$$- \frac{1}{2W_{CV}} \frac{\mu_n + \mu_p}{W_{CV} + W} \left[(n_{CV} W_{CV} + nW) \left(E_0 + \frac{U_G(t)}{W_G} \right) + 2\varphi_T (n_{CV} - n) \right];$$

$$\frac{dn_{ph}}{dt} = -\frac{n_{ph}}{\tau_f} + \beta \frac{n}{\tau_s} + v_g n_{ph} g(n, n_{ph}), \quad (10)$$

где L – длина активной области лазера-модулятора; W – ширина области пространственного пересечения потенциальных ям (рис. 1); W_{CV} – ширина областей пространственного смещения потенциальных ям (рис. 1); n – концентрация носителей заряда, усредненная по объему области пространственного пересечения потенциальных ям; n_{CV} – усредненная концентрация электронов и дырок в областях про-

пространственного смещения потенциальных ям зоны проводимости и валентной зоны; U_G – управляющее напряжение; E_0 – напряженность встроенного поля гетероструктуры; W_G – расстояние между металлургическими границами управляющих переходов.

Реализация модели (8)–(10) может осуществляться с использованием имеющихся на рынке программных средств (например, SPICE).

Обсуждение результатов моделирования. На рис. 2 приведены полученные с использованием модели (8)–(10) временные зависимости мощности оптического излучения $P(t)$ лазера-модулятора с параметрами $L = 200$ нм, $W = 5$ нм, $W_{CV} = 20$ нм, $W_G = 125$ нм, $\beta = 10^{-4}$, $\tau_f = 5$ пс, $\tau_s = 4$ нс. Модуляция оптического излучения осуществлялась двумя способами: импульсным изменением тока накачки от $3 \cdot 10^4$ А/см² до 0 в интервале времени 20–30 нс при нулевом управляющем напряжении (рис. 2,а) и подачей запирающего импульса управляющего напряжения амплитудой 0,5 В в том же временном интервале при неизменном токе накачки (рис. 2,б). Напряженность встроенного поля E_0 и длина активной области L определялись по результатам численного моделирования с использованием модели (3)–(7).

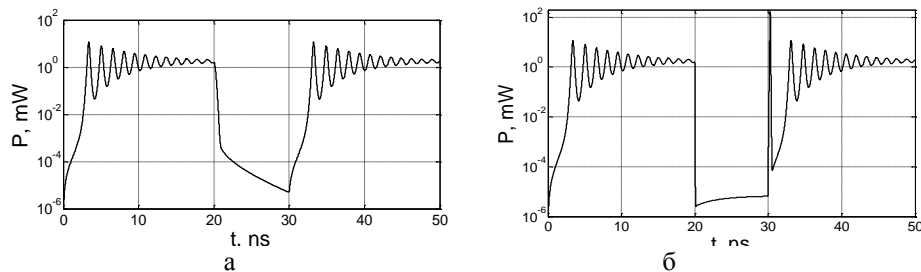


Рис. 2. Модуляция мощности оптического излучения лазера-модулятора импульсами тока накачки (а) и управляющего напряжения (б)

В соответствии с результатами, приведенными на рис. 2,а, при модуляции током накачки длительности фронтов импульса оптической мощности составляют не менее 3,5 нс, что объясняется зависимостью длительности переходных процессов от скоростей накопления и релаксации электронов и дырок в активной области лазера-модулятора.

В соответствии с результатами, представленными на рис. 2,б, при модуляции импульсом управляющего напряжения и неизменном токе накачки длительности переднего и заднего фронтов импульса оптической мощности составляют, соответственно, 250 пс и 70 пс, что в 14–50 раз меньше, чем при модуляции током накачки. Это объясняется тем, что в процессе управляемой передислокации суммарное число носителей заряда в активной области лазера-модулятора изменяется незначительно и сравнительно инерционные процессы накопления и релаксации электронов и дырок в активной области не ограничивают быстрдействие лазера-модулятора.

Заключение. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что предложенные физико-топологическая и схемотехническая модели позволяют исследовать переходные процессы в функционально интегрированных лазерах-модуляторах с учетом неравномерности пространственных распределений концентраций носителей заряда и фотонов в активной области, особенностей пространственного распределения плотности тока, а также влияния периферийных областей лазера-модулятора на его характеристики.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 13-07-00274, 14-07-31234) и Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 8.797.2014К).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Horowitz M., Chih-Kong Ken Yang, Sidiropoulos S.* High-speed electrical signaling: overview and limitations // *IEEE Micro*. – 1998. – No. 18 (1). – P. 12–24.
2. *Miller D.* Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips // *Proceedings IEEE*. – 2009. – No. 97 (7). – P. 1166-1185.
3. *Apostolopoulos D., Bakopoulos P., Kalavrouziotis D., Giannoulis G., Kanakis G., Iliadis N., Spatharakis C., Bauwelinck J., Avramopoulos H.* Photonic integration enabling new multiplexing concepts in optical board-to-board and rack-to-rack interconnects // *Proceedings of SPIE*. – Vol. 8991. – P. 89910D-1–89910D-15.
4. *Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A.* Injection laser with a functionally integrated frequency modulator based on spatially shifted quantum wells // *Technical Physics Letters*. – 2013. – No. 39 (11). – P. 986-989.
5. *Ryndin E.A., Denisenko M.A.* A functionally integrated injection laser-modulator with the radiation frequency modulation // *Russian Microelectronics*. – 2013. – No. 42 (6). – P. 360-362.
6. *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.
7. *Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Денисенко М.А.* Интегральный инжекционный лазер с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда. Патент РФ 2400000. 2010.
8. *Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Денисенко М.А.* Интегральный инжекционный лазер с модуляцией частоты излучения посредством управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда. Патент РФ 2520947. 2014.
9. *Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Агеев О.А., Варзарев Ю.Н., Коломийцев А.С.* Сверхбыстродействующие элементы интегральных схем на основе связанных квантовых областей // *Наукоемкие технологии для инновационной индустрии южного макрорегиона*. – 2011. – С. 83-99.
10. *Ozyazici M.S.* The complete electrical equivalent circuit of a double heterojunction laser diode using scattering parameters // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. – 2004. – Vol. 6, No. 4. – P. 1243-1253.
11. *Lim D.W., Cho H.U., Sung H.K., Yi J.C., Jhon Y.M.* A PSPICE circuit modeling of strained AlGaInN laser diode based on the multilevel rate equations // *Journal of the Optical Society of Korea*. – 2009. – Vol. 13, No. 3. – P. 386-391.
12. *Tucker R.S.* Large-signal circuit model for simulation of injection-laser modulation dynamics // *IEE Proceedings*. – 1981. – Vol. 128, No. 5. – P.180-184.
13. *Абрамов И.И., Харитонов В.В.* Численное моделирование элементов интегральных схем / Под ред. А.Г. Шашкова. – Минск: Выш. шк., 1990. – 224 с.
14. *Бубенников А.Н., Садовников А.Д.* Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
15. *Абрамов И.И.* Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. Часть II. Модели полуклассического подхода // *Нано- и микросистемная техника*. – 2006. – № 9. – С. 26-36.
16. *Zarifkar A., Ansari L., Moravvej-Farshi M.K.* An equivalent circuit model for analyzing separate confinement heterostructure quantum well laser diodes including chirp and carrier transport effects // *Fiber and Integrated Optics*. – 2009. – No. 28. – P. 249-267.

17. Konoplev B.G., Ryndin E.A. A Study of the Transport of Charge Carriers in Coupled Quantum Regions // *Semiconductors*. – 2008. – Vol. 42, No. 13. – P. 1462-1468.
18. 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, No. 6. – P. 587-590.
19. Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Numerical modeling of functionally integrated injection lasers-modulators // *Proceedings of SPIE*. 2014. International Conference on Micro- and Nano-Electronics. – 2014. – Vol. 9440. – P. 944014-1-944014-11.
20. Рындин Е.А., Денисенко М.А. Физико-топологическая модель инжекционных лазеров с двойной гетероструктурой // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2014. – № 9 (158). – С. 32-39.

REFERENCES

1. Horowitz M., Chih-Kong Ken Yang, Sidiropoulos S. High-speed electrical signaling: overview and limitations, *IEEE Micro*, 1998, No. 18 (1), pp. 12–24.
2. Miller D. Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips, *Proceedings IEEE*, 2009, No. 97 (7), pp. 1166-1185.
3. Apostolopoulos D., Bakopoulos P., Kalavrouziotis D., Giannoulis G., Kanakis G., Iliadis N., Spatharakis C., Bauwelinck J., Avramopoulos H. Photonic integration enabling new multiplexing concepts in optical board-to-board and rack-to-rack interconnects, *Proceedings of SPIE*, Vol. 8991, pp. 89910D-1–89910D-15.
4. Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Injection laser with a functionally integrated frequency modulator based on spatially shifted quantum wells, *Technical Physics Letters*, 2013, No. 39 (11), pp. 986-989.
5. Ryndin E.A., Denisenko M.A. A functionally integrated injection laser-modulator with the radiation frequency modulation, *Russian Microelectronics*, 2013, No. 42 (6), pp. 360-362.
6. 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.
7. Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Integral'nyy inzhektionsionnyy lazer s upravlyаемoy peredislokatsiyey maksimuma amplitudy volnovykh funktsiy nositeley zaryada [Integrated injection laser with controlled relocation of amplitude maximum of wave functions of charge carriers]. Patent RF, No. 2400000, 2010.
8. Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Integral'nyy inzhektionsionnyy lazer s modulyatsiyey chastoty izlucheniya posredstvom upravlyаемoy peredislokatsii maksimuma amplitudy volnovykh funktsiy nositeley zaryada [Integrated injection laser with a fashion-stimulation frequency radiation through a managed relocation of the maximum of the amplitude wave functions of charge carriers]. Patent RF, No. 2520947, 2014.
9. Konoplev B.G., Ryndin E.A., Ageev O.A., Varzarev Yu.N., Kolomiytsev A.S. Cverkhbystrodeystvuyushchie elementy integral'nykh skhem na osnove svyazannykh kvantovykh oblastey [Ultrahigh-speed IC elements based on coupled quantum fields], *Naukoemkie tekhnologii dlya innovatsionnoy industrii yuzhnogo makroregiona* [Knowledge-intensive technology innovation for industry in the South macroregion], 2011, pp. 83-99.
10. Ozyazici M.S. The complete electrical equivalent circuit of a double heterojunction laser diode using scattering parameters, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2004, Vol. 6, No. 4, pp. 1243-1253.
11. Lim D.W., Cho H.U., Sung H.K., Yi J.C., Jhon Y.M. A PSPICE circuit modeling of strained AlGaInN laser diode based on the multilevel rate equations, *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, Vol. 13, No. 3, pp. 386-391.
12. Tucker R.S. Large-signal circuit model for simulation of injection-laser modulation dynamics, *IEE Proceedings*, 1981, Vol. 128, No. 5, pp.180-184.

13. *Abramov I.I., Kharitonov V.V.* Chislennoe modelirovanie elementov integral'nykh skhem [Numerical modeling of elements of integrated circuits], ed. by A.G. Shashkova. Minsk: Vysh. shk., 1990, 224 p.
14. *Bubennikov A.N., Sadovnikov A.D.* Fiziko-tehnologicheskoe proektirovanie bipolyarnykh elementov kremnievykh BIS [Physico-technological design of silicon bipolar LSI elements]. Moscow: Radio i svyaz', 1991, 288 p.
15. *Abramov I.I.* Problemy i printsipy fiziki i modelirovaniya pribornykh struktur mikro- i nanoelektroniki. Part 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 mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2006, No. 9, pp. 26-36.
16. *Zarifkar A., Ansari L., Moravvej-Farshi M.K.* An equivalent circuit model for analyzing separate confinement heterostructure quantum well laser diodes including chirp and carrier transport effects, *Fiber and Integrated Optics*, 2009, No. 28, pp. 249-267.
17. *Konoplev B.G., Ryndin E.A.* A Study of the Transport of Charge Carriers in Coupled Quantum Regions, *Semiconductors*, 2008, Vol. 42, No. 13, pp. 1462-1468.
18. *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, No. 6, pp. 587-590.
19. *Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A.* Numerical modeling of functionally integrated injection lasers-modulators, *Proceedings of SPIE. 2014. International Conference on Micro- and Nano-Electronics*, 2014, Vol. 9440, pp. 944014-1-944014-11.
20. *Ryndin E.A., Denisenko M.A.* Fiziko-topologicheskaya model' inzhetsionnykh lazerov s dvoynoy geterostrukturoy [Physical-and-topological model of injection lasers with the double heterostructure], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 32-39.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Рындин Евгений Адальбертович – Южный федеральный университет; email: earyndin@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634311584; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор.

Денисенко Марк Анатольевич – email: dema.bmfe@gmail.com; тел.: +79061833629; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

Исаева Алина Сергеевна – email: isaevaas@gmail.com; тел.: +79889972166; к.т.н.; научный сотрудник.

Ryndin Evgeniy Adalbertovich – Southern Federal University; e-mail: earyndin@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634311584; the department of electronic apparatuses design; professor.

Denisenko Mark Anatolievich – email: dema.bmfe@gmail.com; phone: +79061833629; the department of electronic apparatuses design; assistant.

Isaeva Alina Sergeevna – email: isaevaas@gmail.com; phone: +79889972166; research associate.