

2. Ng H. M. et al. The role of dislocation scattering in n-type GaN films, *Applied physics letters*, 1998, Vol. 73, No. 6, pp. 821-823.
3. Nakamura S., Mukai T., Senoh M. In situ monitoring and Hall measurements of GaN grown with GaN buffer layers, *J. Appl. Phys.*, 1992, Vol. 71, pp. 5543-5549.
4. Koblmüller G., Wu F., Mates T. [et al.] High electron mobility GaN grown under N-rich conditions by plasma assisted molecular beam epitaxy, *Applied Physics Letters*, 2007, Vol. 91, pp. 221905-1–221905-3.
5. James S. Speck et al. Molecular beam epitaxy of In AlN lattice-matched to GaN with homogeneous composition using ammonia as nitrogen source, *Applied Physics Letters*, 2012, Vol. 100, No. 7, pp. 072107.

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

Алексеев Алексей Николаевич – ЗАО “Научное и технологическое оборудование”; e-mail: petrov@semiteq.ru; г. Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27, корпус 5; тел.: +78123135451; генеральный директор.

Петров Станислав Игоревич – начальник прикладной лаборатории.

Красовицкий Дмитрий Михайлович – главный конструктор.

Чалый Виктор Петрович – директор.

Мамаев Виктор Викторович – инженер.

Сидоров Валерий Георгиевич – СПбПУ; г. Санкт-Петербург, Политехническая, 29; тел.: +78123135429; профессор.

Alexeev Alexey Nikolaevich – SemiTEq JSC; e-mail: petrov@semiteq.ru; 27, Engels av., building 5, Saint-Petersburg, Russia; phone: +78123135451; director.

Petrov Stanislav Igorevich – head of application lab.

Krasovitsky Dmitry Mikhaylovich – chief designer.

Chaly Viktor Petrovich – director.

Mamaev Victor Viktorovich – engineer.

Sidorov Valery Georgievich – St. Petersburg Polytechnic University; 29, Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia; phone: +78123135429; professor.

УДК 621.373.826

Е.А. Рындин, М.А. Денисенко

ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ С ДВОЙНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРОЙ*

На основе анализа фундаментальной системы уравнений полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении и уравнений кинетики лазеров предложена физико-топологическая модель, позволяющая проводить численный анализ динамики процессов в инжекционных лазерах с учетом их структурно-топологических особенностей, зонных диаграмм, профиля легирования, механизмов спонтанной и стимулированной рекомбинации, неравномерности пространственных распределений концентраций электронов, дырок и фотонов в активной области лазера, особенностей пространственного распределения плотности тока, влияния периферийных областей лазера на его характеристики. Предложенная физико-топологическая модель позволяет, в зависимости от используемых гранич-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты: № 13-07-00274, № 14-07-31234) и Минобрнауки РФ (проекты: 8.797.2014К и 14.575.21.0045).

ных условий, выполнять анализ переходных процессов в лазерах при заданном изменении во времени как тока накачки, так и напряжения на контактах. На основе анализа результатов численного моделирования инжекционных лазеров с двойной гетероструктурой определены границы применимости предложенной диффузионно-дрейфовой модели.

Инжекционный лазер с двойной гетероструктурой; модель.

Е.А. Ryndin, М.А. Denisenko

PHYSICAL-AND-TOPOLOGICAL MODEL OF INJECTION LASERS WITH THE DOUBLE HETEROSTRUCTURE

Physical-and-topological model is offered on the basis of the fundamental system of equations analysis in a semiconductor diffusion-and-drift approximation and kinetic equations of lasers. It allows to carry out the numerical analysis of dynamics processes in injection lasers taking into account their structural- and- topological features, band diagrams, a dopant profile, mechanisms of a spontaneous and stimulated recombination, unevenness of spatial distributions of electrons concentration, holes and photons in active area of the laser, features of spatial distribution of current density, influence of the peripheral areas of the laser on its characteristics. The physical-and-topological model allows assuming the analysis of transition processes in lasers both at the set change in time as rating current, and voltage on contacts, depending on the boundary conditions. Based on the analysis results of numerical modeling of injection double heterostructure laser, the limits of the offered diffusive-and-drift model applicability are defined.

Injection double heterostructure laser; model.

Введение. В настоящее время динамика процессов в инжекционных лазерах, как правило, описывается уравнениями кинетики, связывающими концентрацию подвижных носителей с плотностью тока накачки и плотностью фотонов в активной области лазера [1–3]. Представляя собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнения кинетики не учитывают ряд факторов, которые могут быть важны для анализа характеристик лазерных структур [4]:

- ◆ различие распределений по координатам концентраций электронов и дырок в активной области лазера (уравнения кинетики получены в предположении, что в пределах активной области лазера концентрации электронов и дырок равны);
- ◆ неравномерность пространственных распределений концентраций носителей заряда и фотонов в активной области;
- ◆ особенности пространственного распределения плотности тока;
- ◆ влияние периферийных областей лазера на его характеристики;
- ◆ невозможность анализа переходных процессов в инжекционном лазере в режиме заданного напряжения на контактах (исследуется только режим заданного тока инжекции).

Физико-топологическая модель. С целью учета перечисленных факторов предлагается уточненная физико-топологическая модель, полученная на основе анализа фундаментальной системы уравнений полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении [5–7] и уравнений кинетики лазеров [1–3], которая может быть записана следующим образом:

$$\nabla(\varepsilon \cdot \nabla \varphi) = \frac{e}{\varepsilon_0}(n - p - N); \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla \left[\mu_n (-n \nabla(\varphi + V_n) + \varphi_T \nabla n) \right] - \frac{\sqrt{np - n_i^2}}{\tau_s} - v_g g \cdot n_{ph}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \left[\mu_p (p \nabla(\varphi - V_p) + \varphi_T \nabla p) \right] - \frac{\sqrt{np - n_i^2}}{\tau_s} - v_g g \cdot n_{ph}; \quad (3)$$

$$\frac{dn_{ph}}{dt} = -\frac{n_{ph}}{\tau_f} + \frac{\beta\sqrt{np - n_i^2}}{\tau_s} + v_g g \cdot n_{ph}; \quad (4)$$

$$g = \begin{cases} g(n, p, n_{ph}) > 0, & E_{Fn} - E_{Fp} \geq E_C - E_V; \\ 0, & E_{Fn} - E_{Fp} < E_C - E_V, \end{cases} \quad (5)$$

где n , p , n_{ph} – концентрации электронов, дырок и фотонов; 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; t – время; e – элементарный заряд; ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; g – 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 лазера; v_g – скорость фотонов в активной области лазера; E_{Fn} , E_{Fp} – квазиуровни Ферми для электронов и дырок; E_C , E_V – уровни «дна» зоны проводимости и «потолка» валентной зоны.

Одним из ключевых параметров инжекционных лазеров является коэффициент оптического усиления g . Зависимость коэффициента оптического усиления от концентраций носителей заряда и фотонов в активной области лазера традиционно определяется моделями, приведенными в [2, 3]. В предложенной системе уравнений (1)–(5) значения коэффициента оптического усиления $g(n, p, n_{ph})$ определяются аналогичными приведенным в [2, 3] выражениями, в которых для учета влияния концентраций электронов, дырок и фотонов обобщенная концентрация носителей заряда (предполагающая равенство $n = p$ в активной области лазера)

заменена выражением $\sqrt{np - n_i^2}$, более точно определяющим степень отклонения концентраций электронов и дырок от равновесных значений.

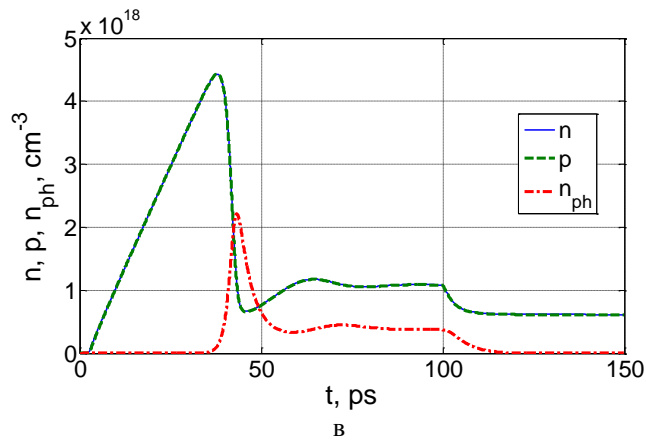
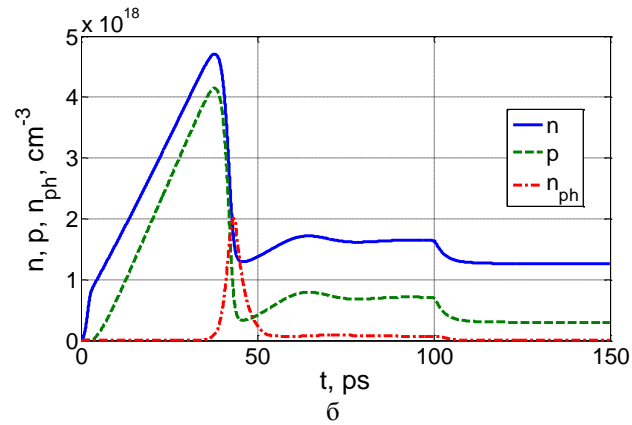
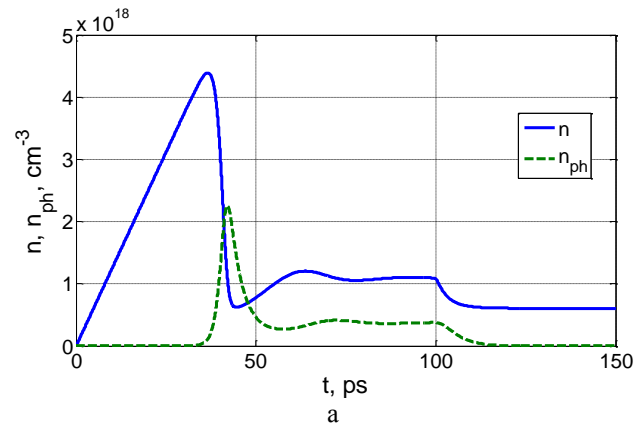
В отличие от уравнений кинетики, система уравнений (1)–(5) позволяет исследовать динамику изменения пространственных распределений концентраций электронов, дырок и фотонов не только в активной, но и в периферийных областях лазера, причем в зависимости от используемых граничных условий возможен анализ переходных процессов в лазере как при заданном токе накачки, так и при заданном напряжении на контактах. Учитывая огромное разнообразие структур инжекционных лазеров [8–10], важным является использование в уравнениях (1)–(5) в качестве исходных данных пространственных распределений гетероструктурного потенциала и профилей легирующих примесей, что позволяет получать результаты численного моделирования лазеров с учетом самых различных структурно-топологических особенностей, тем самым расширяя границы применимости предложенной модели.

Обсуждение результатов моделирования. Численное решение системы (1)–(5) выполнялось с использованием метода конечных разностей. С целью получения начального условия решение соответствующей стационарной задачи выполнялось с применением метода Ньютона [5].

На рис. 1–3 представлены результаты моделирования лазера с двойной гетероструктурой (ДГС) $n^+ - Al_{0,3}Ga_{0,7}As / i - GaAs / p^+ - Al_{0,3}Ga_{0,7}As$, с шириной активной области 50 нм, временем жизни фотонов в резонаторе $\tau_f = 3$ пс, временем спонтанной излучательной рекомбинации $\tau_s = 4$ нс, долей спонтанного излучения, попадающего в лазерную моду, $\beta = 10^{-4}$ для импульса плотности тока накачки длительностью $\tau_p = 100$ пс амплитудой $j = 10^5$ А/см². Результаты, приведенные на рис. 1,а, получены при решении уравнений кинетики. На рис. 1,б–г и рис. 2 показаны результаты,

полученные с использованием предложенной модели. Временные зависимости концентраций электронов, дырок и фотонов на рис. 1,б–г представлены для различных сечений активной области ДГС-лазера.

На рис. 2, 3 можно видеть существенную неравномерность распределений концентраций электронов, дырок и фотонов по координатам в пределах активной области лазера, в результате чего, в соответствии с рис. 1, количественное несоответствие результатов, полученных при решении уравнений кинетики (см. рис. 1,а) и решении предложенной системы уравнений (1)–(5) (см. рис. 1,б–г) для отдельных сечений активной области лазера составляет более 50 %.



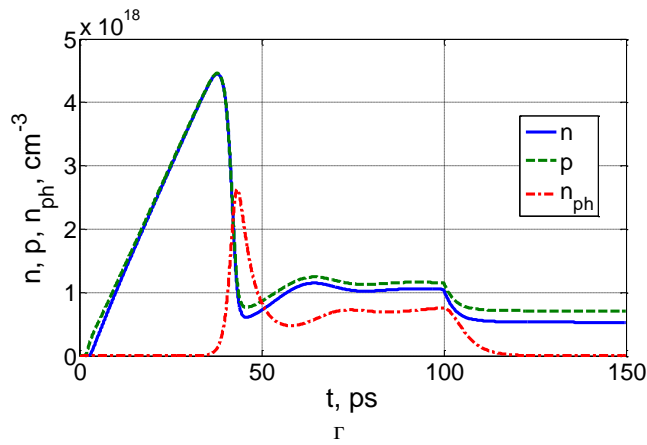


Рис. 1. Результаты численного моделирования переходного процесса в ДГС-лазере, полученные при решении уравнений кинетики (а) и уравнений предложенной модели для центрального (в) и периферийных (б, г) сечений активной области

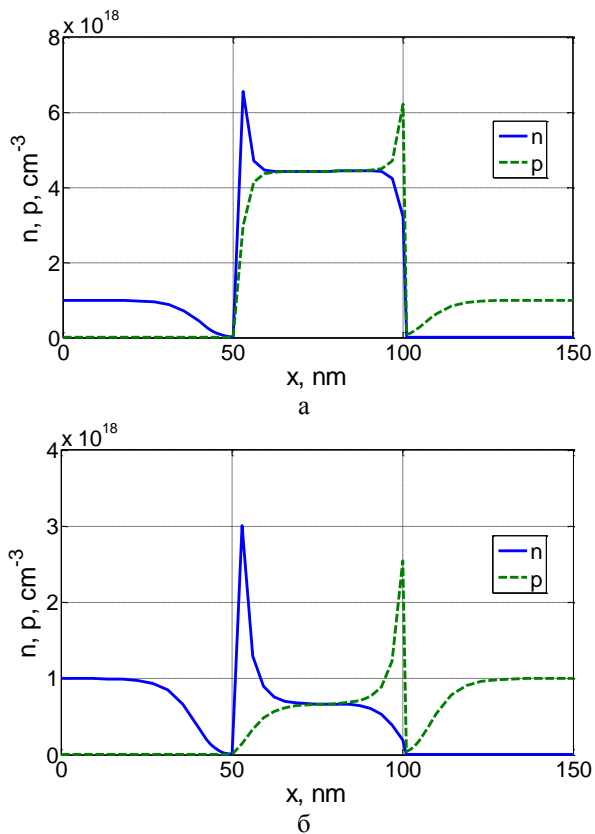


Рис. 2. Концентрации электронов и дырок в ДГС-лазере в моменты достижения первого максимума (а) и первого минимума (б) в центральном сечении активной области

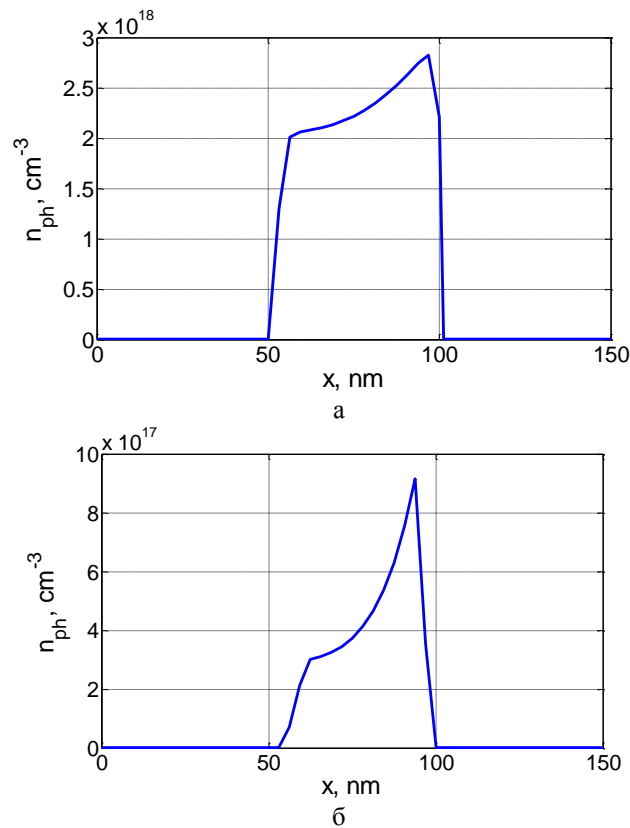


Рис. 3. Плотность фотонов при достижении первого максимума (а), в момент заднего фронта импульса тока (б)

Уравнения кинетики лазеров сформулированы в предположении, что при плотности тока накачки, превышающей пороговое значение, коэффициент оптического усиления g при протекании переходного процесса испытывает периодические изменения только во времени. Результаты численного моделирования, полученные с использованием предложенной модели (1)–(5), подтверждают возможность периодических изменений значений коэффициента оптического усиления лазера не только во времени, но и по координате, что позволяет проводить анализ переходных процессов в лазерных структурах с учетом данного эффекта.

Заключение. Проведенный сравнительный анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что уравнения кинетики с учетом принятых в них допущений могут использоваться для моделирования переходных процессов в инжекционных лазерах, если условия задачи не требуют учета неравномерности пространственных распределений концентраций электронов, дырок и фотонов в активной и периферийных областях и, как следствие, неравномерности значений коэффициента оптического усиления лазера по координатам, особенностей структуры лазера, его зонной диаграммы, пространственного распределения плотности тока.

Если же учет всех перечисленных факторов (или отдельных из них) по условию задачи моделирования необходим, или требуется исследовать переходные процессы в лазере для заданного импульса напряжения (а не тока) на внешних контактах, целесообразно использовать более точные модели, в частности систему уравнений, рассмотренную в данной работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. *Рындин Е.А., Денисенко М.А.* Модель функционально-интегрированных инжекционных лазеров-модуляторов для интегральных систем оптической коммутации // *Известия вузов. Электроника*. – 2012. – № 6 (98). – С. 26-35.
5. *Абрамов И.И.* Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. Ч. II. Модели полуклассического подхода // *Нано- и микро-системная техника*. – 2006. – № 9. – С. 26-36.
6. *Абрамов И.И., Харитонов В.В.* Численное моделирование элементов интегральных схем // Под ред. А.Г. Шашкова. – Минск.: Выш. шк., 1990. – 224 с.
7. *Бубенников А.Н., Садовников А.Д.* Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
8. *Alferov Z.I.* Double Heterostructure Lasers: Early Days and Future Perspectives // *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2000. – Vol. 6, No. 6. – P. 832-840.
9. *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. – Vol. 39, No. 11. – P. 986-989.
10. *Ryndin E.A., Denisenko M.A.* A Functionally Integrated Injection Laser–Modulator with the Radiation Frequency Modulation // *Russian Microelectronics*. – 2013. – Vol. 42, No. 6. – P. 360-362.

REFERENCES

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. *Ryndin E.A., Denisenko M.A.* Model' funktsional'no-integrirovannykh inzhektionsnykh lazerov-modulyatorov dlya integral'nykh sistem opticheskoy kommutatsii [The model is functionally integrated injection lasers modulators for integrated optical switching systems], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Izvestiya vuzov. Electronics], 2012, No. 6 (98), pp. 26-35.
5. *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 for micro- and nanoelectronics. P. II. Model semiclassical approach], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano - and Microsystem technology], 2006, No. 9, pp. 26-36.
6. *Abramov I.I., Kharitonov V.V.* Chislennoe modelirovanie elementov integral'nykh skhem [Problems and principles of physics and modeling of device structures for micro - and nanoelectronics. Ch. II. Model semiclassical approach], Pod red. A.G. Shashkova. Minsk.: Vysh. shk., 1990, 224 p.
7. *Bubennikov A.N., Sadovnikov A.D.* Fiziko-tekhnologicheskoe proektirovanie bipolyarnykh elementov kremnievykh BIS [Physico-technological design of the bipolar elements silicon BIS]. Moscow: Radio i svyaz', 1991, 288 p.

8. *Alferov Z.I. Double Heterostructure Lasers: Early Days and Future Perspectives, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, Vol. 6, No. 6, pp. 832-840.
9. *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, Vol. 39, No. 11, pp. 986-989.
10. *Ryndin E.A., Denisenko M.A. A Functionally Integrated Injection Laser-Modulator with the Radiation Frequency Modulation, Russian Microelectronics*, 2013, Vol. 42, No. 6, pp. 360-362.

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

Рындин Евгений Адальбертович – Южный федеральный университет; e-mail: rynenator@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634311584; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор.

Денисенко Марк Анатольевич – e-mail: dema.bmfe@gmail.com; тел.: +79061833629; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; ассистент.

Ryndin Evgeniy Adalbertovich – Southern Federal University; e-mail: rynenator@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634311584; the department of electronic apparatuses design; dr. of eng. sc.; professor.

Denisenko Mark Anatolievich – e-mail: dema.bmfe@gmail.com; phone: +79061833629; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; assistant.

УДК 681.518: 666.1/28

С.П. Малюков, А.В. Саенко, Ю.В. Клунникова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ САПФИРА

Проведены экспериментальные исследования лазерной обработки сапфира и формирования пленок на поверхности сапфира на установке LIMO 100-532/1064-U. Обработка осуществлялась с помощью твердотельного Nd:YAG лазера с фиксированной длиной волны 1064 нм. При исследовании процессов лазерной обработки структур пленка-сапфир наиболее важным является расчет температуры и определение режимов термической обработки, обеспечивающих максимальный отжиг дефектов. Проведен расчет распределения температур в процессе лазерного воздействия на структуру пленка-сапфир численным моделированием нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности, заключающимися в аппроксимации частных производных исходных уравнений соответствующими конечными разностями. Результаты моделирования позволили определить оптимальные режимы обработки образца при различном нагреве лазерным излучением. Установлено, что при средней мощности лазерного излучения 80–90 Вт температура на поверхности составляет порядка 800–900 К, что является необходимым условием для роста пленки на поверхности подложки сапфира.

Технологический процесс; монокристаллы сапфира; распределение температуры; лазерная обработка.

S.P. Malyukov, A.V. Sayenko, Y.V. Klunnikova

PROCESS SIMULATION OF SAPPHIRE LASER PROCESSING

The experimental researches of sapphire laser processing and film formation on the sapphire surface were made on the plant LIMO 100-532/1064-U. The processing was realized by solid-state Nd:YAG laser with a fixed wavelength 1064 nm. The most important thing in the research of laser processing film – sapphire structures is to calculate the temperature and to determine the condition modes of heat treatment providing maximum of defects annealing. The calculation of temperature distribution in the course of laser action on the film – sapphire structure was made by numerical modeling of the non-stationary differential equations of heat conductivity that