

ПОДАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ЛАЗЕРОВ КЛАССА В

Д.А. Анчиков¹, А.А. Кренц^{1,2}, Н.Е. Молевич^{1,2}, А.В. Пахомов^{1,2}

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия,

²Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

Аннотация

В данной работе проведено исследование пространственно-временных неустойчивостей стационарной генерации широкоапертурных лазеров класса В. Аналитически найдены условия возникновения филаментационной неустойчивости и её пространственно-временные характеристики. Рассмотрены возможности стабилизации лазерной генерации при изменении управляющих параметров. Показано, что эффективное подавление неустойчивых гармоник поля может достигаться при инжекции в резонатор внешнего оптического излучения.

Ключевые слова: широкоапертурный лазер, филаментация, оптическая инжекция, неустойчивости и хаос, стабилизация лазеров.

Цитирование: Анчиков, Д.А. Подавление пространственно-временных неустойчивостей излучения широкоапертурных лазеров класса В / Д.А. Анчиков, А.А. Кренц, Н.Е. Молевич, А.В. Пахомов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 31-35. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-31-35.

Введение

Использование широкоапертурных лазеров обеспечивает увеличение выходной мощности излучения, позволяя в то же время избежать проблем, связанных с термическим разрушением элементов конструкции лазера вследствие оптического нагрева. Однако широкоапертурные лазеры подвержены явлениям филаментации выходного излучения и возбуждения поперечных мод высоких порядков [1–4]. Это приводит к многократному снижению яркости излучения лазера и потере пространственной и временной когерентности лазерного пучка, имеющих принципиальное значение для большинства приложений.

Появление филаментации является следствием развития неустойчивых поперечных пространственных компонент оптического поля. Определение этих компонент позволяет исследовать порог возникновения филаментации и способы её подавления с целью улучшения параметров работы лазера.

Целью настоящей работы было аналитически и численно исследовать условия возникновения и динамику развития филаментационной неустойчивости генерации лазеров динамического класса В. Изучена также пространственно-временная динамика широкоапертурного лазера при инжекции в резонатор внешнего оптического излучения, и исследованы возможности данного метода для подавления пространственно-временных неустойчивостей выходного излучения.

Устойчивость стационарной генерации лазера

Для описания динамики оптического поля широкоапертурного лазера использовалась система уравнений Максвелла–Блоха, описывающая генерацию на одной продольной моде резонатора Фабри–Перо в приближении среднего поля для однородно уширенной линии усиления [5–6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial t} = ia\Delta_{\perp} E + \sigma(P - (1 - i\delta)E), \\ \frac{\partial P}{\partial t} = -(1 + i\delta)P + DE, \\ \frac{\partial D}{\partial t} = -\gamma \left[D - r + \frac{1}{2}(E^* P + P^* E) \right], \end{cases} \quad (1)$$

где E , P , D – безразмерные огибающие электрического поля, поляризации и инверсии населённости соответственно; $\gamma = \gamma_{\parallel} / \gamma_{\perp}$ и $\sigma = k / \gamma_{\perp}$, где γ_{\perp} , γ_{\parallel} и k – скорости релаксации поляризации среды, инверсии населённости и электрического поля в резонаторе соответственно; $\delta = (\omega_{21} - \omega) / (\gamma_{\perp} + k)$ – безразмерная отстройка между центром линии усиления и частотой резонатора; $a = c^2 / (2\omega\gamma_{\perp} n_{gr} n_{ph} d^2)$ – дифракционный параметр, где d – характерный пространственный размер задачи, n_{gr} и n_{ph} – групповой и фазовый показатели преломления соответственно; r – величина накачки, нормированная на её пороговое значение.

Стационарная генерация в системе (1) возможна выше лазерного порога при настройке собственной частоты резонатора выше частоты оптического перепада (т.е. в наших обозначениях $\delta < 0$ [7]):

$$\begin{aligned} D_{st} &= 1 + \delta^2; |E_{st}| = \sqrt{r - D_{st}}; \\ P_{st} &= (1 - i\delta)E_{st}; I_{st} = |E_{st}|^2. \end{aligned} \quad (2)$$

В приближении среднего поля, т.е. считая усиление за один проход вдоль оси резонатора пренебрежимо малым, основным механизмом, отвечающим за селекцию пространственных Фурье-мод (т.е. наклонных волн) в резонаторе, становится дисперсия усиления активной среды лазера.

Основной интерес представляет проведение анализа устойчивости стационарной генерации (2) для

частного случая динамического класса В (что подразумевает $\gamma \ll \sigma \ll 1$), который включает большинство из наиболее востребованных для приложений типов лазеров (полупроводниковые, твердотельные). В результате оказывается возможным получить в явном виде выражения, описывающие неустойчивые гармоники поля (подробный вывод будет приведён нами в другом месте. – *Примеч. авт.*):

$$\begin{aligned} \lambda &= \Lambda \pm i\Omega; \\ \Omega^2(q) &= a^2 q^4 + \frac{2\gamma\sigma I_{st}}{1+\delta^2}; \\ \Lambda(q) &= \frac{1}{1+\delta^2} \left(2\sigma\delta a q^2 - \frac{\gamma r}{2} \right) + \\ &+ \frac{\gamma}{2} \cdot \frac{ra^2 q^4 - 2aq^2\sigma\delta I_{st}}{a^2 q^4(1+\delta^2) + 2\gamma\sigma I_{st}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь q – волновое число пространственной гармоники возмущения, Λ – соответствующий инкремент нарастания. Выражения (3) отвечают волновой неустойчивости с определённым ненулевым значением волнового числа моды, имеющей максимальный инкремент нарастания.

На рис. 1 показана бифуркационная диаграмма устойчивости для значений параметров $\sigma = 0,01$, $\gamma = 0,00001$, характерных для полупроводниковых лазеров.

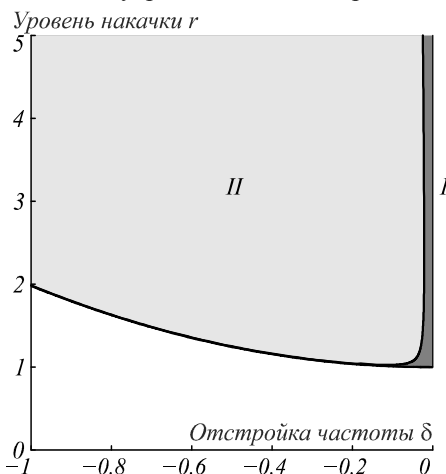


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма при $\sigma = 0,01$, $\gamma = 0,00001$; I – область устойчивой стационарной генерации; II – область волновой неустойчивости

Из рис. 1 видно, что устойчивая приосевая генерация может наблюдаться лишь при очень малых значениях частотной отстройки δ . В то же время в реальных лазерах столь небольшие значения отстройки, достаточные для перевода лазера в область неустойчивости на рис. 1, могут быть легко достижимы вследствие, к примеру, термического нагрева или факторов технического характера. Поэтому появление поперечно-неоднородного профиля выходного излучения представляется наиболее вероятным.

В случае одномерной задачи, соответствующей лазерам планарной геометрии, обнаруженная неустойчивость может приводить к сложной картине бегущих и стоячих поперечных автоволн различной структуры,

подобных рассматривавшийся ранее в [8–10], либо к сериям их последовательных переключений [11].

В данной работе было проведено численное моделирование для более реалистичного двумерного случая. Для численного моделирования использовался псевдоспектральный фурье-метод с расщеплением (Split-Step Fourier Method), имеющий более высокие точность и быстродействие в сравнении с конечно-разностными методами. Начальные условия брались в виде случайного дельта-коррелированного шума. Граничные условия предполагались периодическими, что формально соответствует бесконечно широкой апертуре и позволяет исключить из рассмотрения влияние граничных условий на краю области накачки и рассматривать только собственные механизмы неустойчивости. Такое приближение оправдано для широкоапертурных лазеров с большими поперечными размерами.

Для модельных параметров, отвечающих наличию неустойчивых поперечных пространственных гармоник, получена филаментационная картина излучения лазера, что иллюстрирует пример на рис. 2а, б.

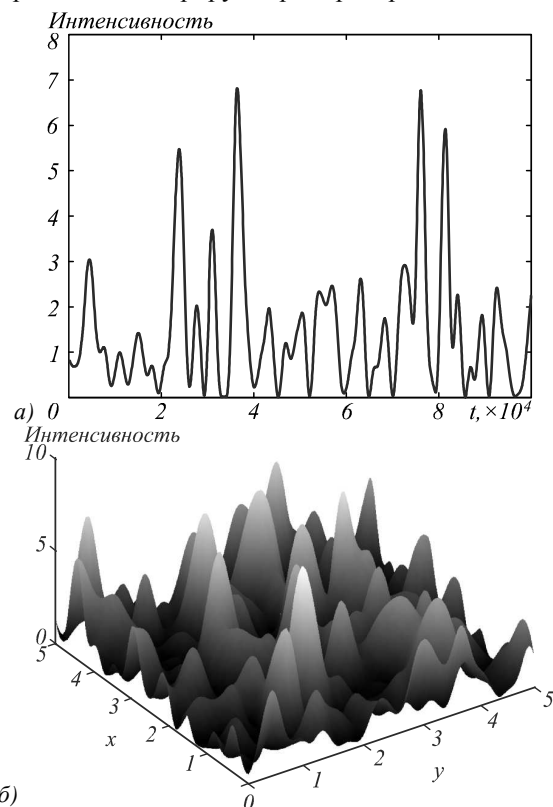


Рис. 2. Картина филаментации излучения; $\sigma = 0,01$, $\gamma = 0,00001$, $\delta = -0,5$, $r = 1,5$: а) временная зависимость интенсивности; б) поперечный профиль интенсивности

Наблюдаемая динамика характеризуется нерегулярными изменениями интенсивности как во времени, так и в поперечном профиле выходного пучка.

Лазер с внешней оптической инжекцией

Инжекция внешнего оптического сигнала является хорошо известным способом стабилизации параметров излучения лазеров [12]. В частности, такой подход используется для синхронизации рабочего лазера с управ-

ляющим с целью уменьшения шума от спонтанного излучения и сопутствующего спектрального уширения линии генерации или для стабилизации формы огибающей импульса и снижения величины временного джиттера в импульсно-периодических лазерах [13–15].

В данной работе было предложено исследовать возможности этого метода для подавления поперечных неустойчивостей в широкоапертурных лазерах. Для моделирования работы лазера с оптической инжекцией в уравнение для поля системы (1) вводился добавочный член $\sigma E_{inj} \cdot e^{j\theta t}$, где E_{inj} – комплексная амплитуда инжектируемого излучения, θ – частотная расстройка.

Было продемонстрировано, что когерентная инжекция позволяет полностью устранить поперечную филаментационную неустойчивость. Важно отметить, что обнаруженное подавление филаментации имеет пороговый характер, то есть происходит при превышении амплитудой инжектируемого излучения некоторого порогового значения.

При этом пороговая величина амплитуды инжектируемого излучения оказывается мала по сравнению с амплитудой оптического поля выходного излучения. Последнее условие отвечает оптическому резонатору лазера, в котором вводимое излучение не играет определяющей роли в его работе. Возможность стабилизации излучения уже при такой относительно слабой инжекции позволяет рассматривать предложенный подход как потенциально эффективный способ улучшения выходных характеристик мощных широкоапертурных лазеров.

На рис. 3 показан пример дисперсионных кривых, содержащих неустойчивые пространственные гармоники возмущения для лазера в режиме свободной генерации и абсолютно устойчивых для лазера с инжекцией когерентного излучения в резонатор. Параметры лазера взяты теми же, что и на рис. 2.

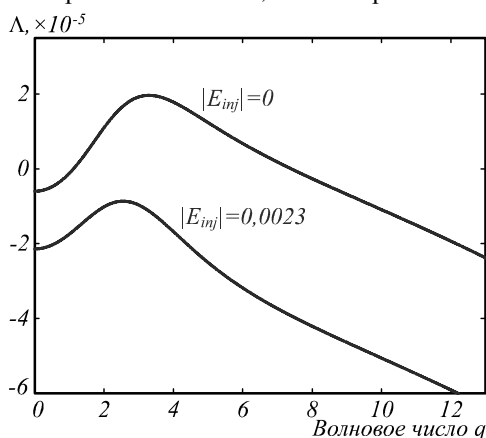


Рис. 3. Дисперсионные кривые, определяющие инкременты нарастания пространственных гармоник возмущения оптического поля

Ещё одним вопросом, представляющим интерес, является характер переходных процессов в лазере. Так как оптическая инжекция вызывает потерю фазовой инвариантности, она радикально изменяет отклик лазера на внешнее возмущение его стационарной генерации. При включении накачки лазер класса В из-

лучает последовательность интенсивных пиков и затем демонстрирует медленно затухающие релаксационные колебания к стационарной генерации. Проведённые расчёты показывают, что релаксационные колебания и пиковая генерация могут быть подавлены в широкоапертурных лазерах с когерентной или близкой к когерентной оптической инжекцией.

Заключение

В настоящей работе проведён бифуркационный анализ для приосевой стационарной генерации в широкоапертурных лазерах класса В. Получены в явном виде аналитические выражения, описывающие неустойчивые моды. Численное моделирование показало, что развитие обнаруженных неустойчивостей приводит к установлению филаментационной структуры поперечного профиля излучения. При этом характерно, что лазер в режиме свободной генерации может демонстрировать устойчивую генерацию лишь в узком диапазоне значений параметров. Предложен и исследован механизм стабилизации излучения посредством инжекции в резонатор внешнего оптического сигнала. Показано, что такой подход позволяет эффективно подавлять неустойчивые гармоники поля, а также улучшает динамические характеристики лазера при внешней модуляции.

Благодарности

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ по Программе повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013–2020 гг. и Государственному заданию вузам и научным организациям в сфере научной деятельности, проект 1451, НИР №ГР 114091840046, РФФИ (грант 16-32-60151 мол_а_дк).

Литература

1. **Fischer, I.** Complex spatio-temporal dynamics in the near-field of a broad-area semiconductor laser / I. Fischer, O. Hess, W. Elsässer, E. Gobel // *Europhysics Letters*. – 1996. – Vol. 35(8). – P. 579-584.
2. **Otsuka, K.** Generation of vortex array beams from a thin-slice solid-state laser with shaped wide-aperture laser-diode pumping / K. Otsuka, S. Chu // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34(1). – P. 10-12.
3. **Babushkin, I.V.** Eigenmodes and symmetry selection mechanisms in circular large-aperture vertical-cavity surface-emitting lasers / I.V. Babushkin, N.A. Loiko, T. Ackermann // *Physical Review E*. – 2004. – Vol. 69, Issue 6. – 066205.
4. **Gensty, T.** Wave chaos in real-world vertical-cavity surface-emitting lasers / T. Gensty, K. Becker, I. Fischer, W. Elsässer, C. Degen, P. Debernardi, G.P. Bava // *Physical Review Letters*. – 2005. – Vol. 94. – 233901.
5. **Lugiato, L.A.** Instabilities and spatial complexity in a laser / L.A. Lugiato, G.-L. Oppo, J.R. Tredicce, L.M. Narducci, M.A. Pernigo // *Journal of the Optical Society of America B*. – 1990. – Vol. 7(6). – P. 1019-1033.
6. **Ханин, Я.И.** Основы динамики лазеров / Я.И. Ханин. – М.: Наука, Физматлит, 1999. – 368 с.
7. **Jacobsen, P.K.** Space-time dynamics of wide-gain-section lasers / P.K. Jacobsen, J.V. Moloney, A.C. Newell, R. Indik // *Physical Review A*. – 1992. – Vol. 45(11). – P. 8129-8137.
8. **Заикин, А.П.** Периодические автоволновые структуры в широкоапертурном лазере с отстройкой частоты. 2. Распределенная модель / А.П. Заикин, А.А. Кургузкин,

- Н.Е. Молевич // Квантовая Электроника. – 1999. – Т. 27, № 3. – С. 249-252.
9. **Заикин, А.П.** Влияние скорости кросс-релаксации на поперечную динамику излучения широкоапертурного лазера / А.П. Заикин, Н.Е. Молевич // Квантовая Электроника. – 2004. – Т. 34, № 8. – С. 731-735.
 10. **Кренц, А.А.** Пространственно-временная динамика поперечного профиля оптического поля в лазере с отстройкой частоты / А.А. Кренц, Н.Е. Молевич // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 4. – С. 525-530.
 11. **Анчиков, Д.А.** Пространственно-временные неустойчивости в широкоапертурных лазерах / Д.А. Анчиков, А.А. Кренц, Н.Е. Молевич, А.В. Пахомов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 681-685.
 12. **Wieczorek, S.** The dynamical complexity of optically injected semiconductor lasers / S. Wieczorek, B. Krauskopf, T.B. Simpson, D. Lenstra // Physics Reports. – 2005. – Vol. 416. – P. 1-128.
 13. **Rebrova, N.** Stabilization of a passively mode-locked laser by continuous wave optical injection / N. Rebrova, T. Habruseva, G. Huyet, S. Hegarty // Applied Physics Letters. – 2010. – Vol. 97. – 101105.
 14. **Habruseva, T.** Dynamics of quantum-dot mode-locked lasers with optical injection / T. Habruseva, G. Huyet, S. Hegarty // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2011. – Vol. 17(5). – P. 1272-1279.
 15. **Drzewietzki, L.** Timing jitter reduction of passively mode-locked semiconductor lasers by self- and external-injection: Numerical description and experiments / L. Drzewietzki, S. Breuer, W. Elsässer // Optics Express. – 2013. – Vol. 21. – P. 16142-16161.

Сведения об авторах

Анчиков Дмитрий Александрович, 1988 года рождения, в 2011 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Лазерная техника и лазерные технологии». Аспирант кафедры физики СГАУ. Область научных интересов: динамика лазеров, численное моделирование. E-mail: swadimaz@mail.ru.

Кренц Антон Анатольевич, 1986 года рождения, в 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Работает доцентом кафедры физики СГАУ. Область научных интересов: динамика лазеров, хаос, поперечная нелинейная оптика. E-mail: krenz86@mail.ru.

Молевич Нонна Евгеньевна, 1959 года рождения, окончила с отличием Высшую школу физиков МИФИ – ФИАН в 1982 году. Является заведующим теоретическим сектором СФ ФИАН и профессором кафедры физики Самарского государственного аэрокосмического университета. Область научных интересов – нелинейная оптика, физика лазеров и нелинейная динамика неравновесных газовых сред. Опубликовала 200 научных работ. Лауреат Губернской премии 2002 года в области науки и техники за цикл работ «Акустика неравновесных сред», Лауреат Премии ФИАН за лучшую научную работу 2011 г. E-mail: molevich@fian.smr.ru.

Пахомов Антон Владимирович, 1991 года рождения, в 2014 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Аспирант кафедры физики СГАУ. Область научных интересов: динамика лазеров, нелинейная оптика. E-mail: pahomov_91@mail.ru.

Поступила в редакцию 12 декабря 2015 г.
Окончательный вариант – 17 января 2016 г.

SUPPRESSION OF SPATIO-TEMPORAL INSTABILITIES IN BROAD-AREA CLASS-B LASERS

D.A. Anchikov¹, A.A. Krents^{1,2}, N.E. Molevich^{1,2}, A.V. Pakhomov^{1,2}

¹ Samara State Aerospace University, Samara, Russia

² Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Abstract

In this paper we investigated the spatio-temporal instabilities of stationary lasing in broad-area class-B lasers. Conditions for the onset of filamentary instability and its spatio-temporal characteristics were obtained analytically. The lasing stabilization capabilities through varying laser parameters were considered. We have also shown that effective suppression of unstable field components may be achieved by external optical injection into the cavity.

Keywords: broad-area laser, filamentation, optical injection, instabilities and chaos, laser stabilization.

Citation: Anchikov DA, Krents AA, Molevich NE, Pakhomov AV. Suppression of spatio-temporal instabilities in broad-area class-B lasers. Computer Optics 2016; 40(1): 31-35. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-31-35.

Acknowledgements: The work was partially supported by the Ministry of education and science of Russian Federation under Competitiveness Enhancement Program of SSAU for 2013-

2020 years and by State assignment to educational and research institutions under project 1451, GR 114091840046, RFBR under grant 16-32-60151 mol_a_dk.

References

- [1] Fischer I, Hess O, Elsässer W, Gobel E. Complex spatio-temporal dynamics in the near-field of a broad-area semiconductor laser. *Europhysics Letters* 1996; 35(8): 579-584.
- [2] Otsuka K, Chu S. Generation of vortex array beams from a thin-slice solid-state laser with shaped wide-aperture laser-diode pumping. *Optics Letters* 2009; 34(1): 10-12.
- [3] Babushkin IV, Loiko NA, Ackermann T. Eigenmodes and symmetry selection mechanisms in circular large-aperture vertical-cavity surface-emitting lasers. *Physical Review E* 2004; 69(6): 066205.
- [4] Gensty T, Becker K, Fischer I, Elsässer W, Degen C, Debernardi P, Bava GP. Wave chaos in real-world vertical-cavity surface-emitting lasers. *Physical Review Letters* 2005; 94: 233901.
- [5] Lugiato LA, Oppo G-L, Tredicce JR, Narducci LM, Pernigo MA. Instabilities and spatial complexity in a laser. *Journal of the Optical Society of America B* 1990; 7(6): 1019-1033.
- [6] Khanin YaI. *Fundamentals of laser dynamics*. Cambridge: International Science Publishing; 2006.
- [7] Jacobsen PK, Moloney JV, Newell AC, Indik R. Space-time dynamics of wide-gain-section lasers. *Physical Review A* 1992; 45(11): 8129-8137.
- [8] Zaikin AP, Kurguzkin AA, Molevich NE. Periodic self-wave structures in a wide-aperture laser with frequency detuning. II. Distributed model. *Quantum Electron* 1999; 29(6): 526-529.
- [9] Zaikin AP, Molevich NE. Effect of the cross-relaxation rate on the transverse radiation dynamics of a wide-aperture laser. *Quantum Electron* 2004; 34(8): 731-735.
- [10] Krents AA, Molevich NE. Spatio-temporal dynamics of the cross section profile of the optical field in the laser with frequency detuning. *Computer Optics* 2010; 34(4): 525-530.
- [11] Anchikov DA, Krents AA, Molevich NE, Pakhomov AV. Spatio-temporal instabilities in large aperture lasers. *Computer Optics* 2014; 38(4): 681-685.
- [12] Wieczorek S, Krauskopf B, Simpson TB, Lenstra D. The dynamical complexity of optically injected semiconductor lasers. *Physics Reports* 2005; 416: 1-128.
- [13] Rebrova N, Habruseva T, Huyet G, Hegarty S. Stabilization of a passively mode-locked laser by continuous wave optical injection. *Applied Physics Letters* 2010; 97: 101105.
- [14] Habruseva T, Huyet G, Hegarty S. Dynamics of quantum-dot mode-locked lasers with optical injection. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2011; 17(5): 1272-1279.
- [15] Drzewietzki L, Breuer S, Elsässer W. Timing jitter reduction of passively mode-locked semiconductor lasers by self- and external-injection: Numerical description and experiments. *Optics Express* 2013; 21: 16142-16161.

Authors' information

Dmitry Alexandrovich Anchikov (b. 1988) graduated from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) in 2011, specializing in Laser Engineering and Laser Technologies. He is currently a post-graduate student at Physics Department of S.P. Korolyov Samara State Aerospace University. His research interests currently focus on laser dynamics and numerical simulation. E-mail: swadimaz@mail.ru.

Anton Anatolyevich Krents (b. 1986) received his Master's degree in Applied Mathematics and Physics from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) in 2009. He received his Candidate degree in Physical and Mathematical Sciences in 2012. He works as an associate professor of Physics Department at S.P. Korolyov Samara State Aerospace University. His research interests currently focus on laser dynamics, chaos and transverse nonlinear optics. E-mail: krenz86@mail.ru.

Nonna Evgenyevna Molevich (b. 1959) graduated with honours from the Higher Physics School of MEPhI - LPI of the RAS. She is the head of the theoretical sector of Lebedev Physical Institute (Samara branch) and a professor of Physics Department in Samara State Aerospace University (SSAU). Her research interests currently focus on nonlinear optics, physics of lasers and nonlinear dynamics of nonequilibrium media. She is a co-author of 200 scientific papers. She is the recipient of the 2002 Regional Prize in Science and Technology for a series of works in "Acoustics of nonequilibrium media" and the laureate of the 2011 P. N. Lebedev Physical Institute award for the best research. E-mail: molevich@fian.smr.ru.

Anton Vladimirovich Pakhomov (b. 1991) received his Master's degree in Applied Mathematics and Physics from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) in 2014. He is currently a post-graduate student at Physics Department of S.P. Korolyov Samara State Aerospace University. His research interests are currently in laser dynamics and nonlinear optics. E-mail: pahomov_91@mail.ru.

Received December 12, 2015. The final version – January 17, 2016