

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР ВСЛЕДСТВИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ В ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ЛАЗЕРАХ

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

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,

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

Аннотация

В работе обсуждается формирование оптических структур в результате модуляции параметра накачки, а именно возникновение неустойчивости Фарадея в широкоапертурных лазерах. Был рассмотрен лазер динамического класса В в области устойчивости однородного стационарного решения, соответствующего режиму приосевой генерации. Получены условия возникновения пространственно-временных структур, в том числе полосковой и гексагональной формы.

Ключевые слова: оптические структуры, параметрическая неустойчивость, накачка, периодическая модуляция.

Цитирование: Анчиков, Д.А. Формирование пространственно-неоднородных оптических структур вследствие параметрической модуляции в широкоапертурных лазерах / Д.А. Анчиков, А.А. Кренц, Н.Е. Молевич // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 363-368. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-363-368.

Введение

Интерес к области исследования формирования оптических структур в широкоапертурных оптических системах обусловлен техническим прогрессом оптических информационных технологий. Активным элементом в них являются миниатюрные источники высококогерентного излучения, такие как полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором и твердотельные лазеры на микрочипах. Подобные лазеры обладают высокими коэффициентами усиления и могут обладать короткими продольными размерами активной среды. Усиление мощности в них осуществляется в том числе и за счёт увеличения ширины апертуры, т.е. числа Френеля. Таким образом, указанные источники излучения могут быть широкоапертурными. Однако именно в лазерах с большими числами Френеля теоретически предсказывается и наблюдается экспериментально сложное распределение оптического поля, пространственно-временная динамика которого до сих пор изучена недостаточно.

Поскольку в оптических информационных системах источники излучения могут использоваться в режиме прямой токовой модуляции (параметр накачки), важно обладать средствами прогнозирования и управления поперечной структурой оптического поля в зависимости от различных параметров эксплуатации источников. Известно, что периодическая модуляция параметров в однородной распределенной системе может приводить к параметрической неустойчивости Фарадея и возникновению так называемой ряби Фарадея (пространственно-неоднородных структур) [1–3]. С точки зрения практического применения интересно исследовать влияние периодической модуляции накачки на формирование пространственно-временных оптических структур в широкоапертурных лазерах, что и было осуществлено в настоящей работе.

Математическая модель

Система уравнений Максвелла–Блоха, моделирующая пространственно-временную эволюцию оптического излучения в плоско-параллельном резонаторе, заполненном усиливающей двухуровневой средой, имеет вид:

$$\begin{aligned} \partial E / \partial t &= \sigma(P - E) + ia\Delta_{\perp} E, \\ \partial P / \partial t &= -(1 + i\delta)P + DE, \\ \partial D / \partial t &= -\gamma \left[D - r + 0,5(E^*P + EP^*) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где E, P, D – безразмерные огибающие электрического поля, поляризации и инверсии населённости соответственно; $\sigma = k/\gamma_{\perp}$, $\gamma = \gamma_{\parallel}/\gamma_{\perp}$; $k, \gamma_{\parallel}, \gamma_{\perp}$ – скорость затухания поля в резонаторе, скорости релаксации инверсии и поляризации соответственно; $\delta = (w_a - w_c)/\gamma_{\perp}$ – отстройка между центром линии усиления и частотой резонатора, нормированная на полуширину линии усиления; Δ_{\perp} – двумерный лапласиан, x, y – безразмерные поперечные координаты; a – дифракционный параметр; r – накачка, нормированная на пороговое значение.

При $\delta \leq 0$ система (1) имеет стационарное решение системы в виде пространственно-однородного решения, соответствующего приосевой генерации поля (с поперечным волновым числом $k=0$):

$$\begin{aligned} D_{st}(k=0) &= 1 + (\delta/(\sigma+1))^2, \\ |E_{st}(k=0)|^2 &= r - 1 - (\delta/(\sigma+1))^2, \\ P_{st}(k=0) &= E_{st}(k=0) \cdot (1 - i\delta/(\sigma+1)), \\ \Omega(k=0) &= -\delta\sigma/(\sigma+1). \end{aligned} \quad (2)$$

Наиболее важно исследовать возникновение неустойчивости Фарадея в широкоапертурных лазерах динамического класса В ($\gamma \ll \sigma \ll 1$), поскольку именно к данному динамическому классу относятся полупроводниковые и твердотельные лазеры, используемые в оптических каналах связи. Известно, что для

узоапертурных лазеров (работающих на фундаментальной поперечной моде) временная модуляция параметра накачки приводит к временной модуляции выходной интенсивности. Известно, что амплитуда колебаний выходной интенсивности зависит от частоты модуляции накачки. Данная зависимость имеет вид резонансной кривой. Максимальная амплитуда временной модуляции интенсивности наблюдается при частоте модуляции накачки, равной частоте релаксационных колебаний:

$$\omega_{rel} = \sqrt{2\sigma\gamma |E_{st}|^2 / D_{st}}. \tag{3}$$

Параметр накачки модулировался во времени по гармоническому закону:

$$r(t) = r_0 (1 + m \cdot \sin(\Omega t)). \tag{4}$$

Здесь m, Ω – параметры модуляции: глубина и частота соответственно.

Результаты численного моделирования

Численное моделирование системы (1) проводилось с помощью псевдоспектрального Фурье-метода экспоненциального дифференцирования типа Рунге-Кутты (ETD3RK) третьего порядка точности по временному шагу с периодическими граничными условиями [4].

В настоящей работе исследовалось формирование структур в зависимости от параметров модуляции накачки, остальные параметры были фиксированы и соответствуют динамическому лазеру класса В: $\sigma=0,1, \gamma=0,001, a=0,0001$. Была построена диаграмма устойчивости однородного решения при данных параметрах в зависимости от двух параметров накачки r и отстройки δ (представлена на рис. 1).

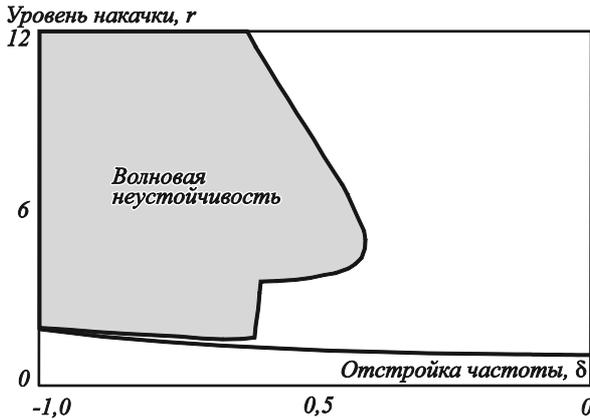


Рис. 1. Увеличенный фрагмент бифуркационной диаграммы при параметрах $\sigma=0,1; \gamma=0,001$

Значения параметров накачки r и отстройки δ подбирались такими, чтобы оптическая система не попала в область волновой неустойчивости [5–7]. Используя такие значения параметров, можно исключить спонтанное возникновение пространственно-временных оптических структур и изучать возникновение структур исключительно в результате развития параметрической неустойчивости. Пространственно-одно-

родное решение зависит от параметра накачки r . Поэтому колебания во времени параметра (4) приводят также к колебаниям пространственно-однородного профиля (2) во времени. Стандартный линейный анализ устойчивости в данном случае оказывается неприменим для анализа механизмов формирования пространственных структур. Поэтому для исследования устойчивости колеблющегося пространственного однородного профиля интенсивности был адаптирован обобщенный метод Флоке, позволяющий исследовать устойчивость колебаний пространственно-однородного профиля по отношению к малым пространственно-временным возмущениям [8].

На рис. 2 приведены диаграммы устойчивости пространственно-однородных колебаний в плоскости параметров (m, Ω) для параметров $\sigma=0,1, \gamma=0,001, a=0,0001, r_0=5$ при различных отстройках. Серым цветом выделена область параметрической неустойчивости, в которой по крайней мере один показатель Флоке положительный. Это означает, что в данной области прогнозируется формирование пространственных структур вследствие временной модуляции накачки.

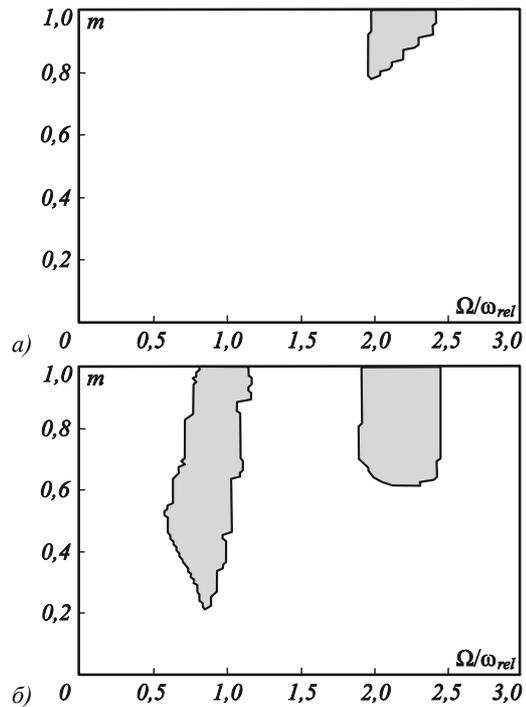


Рис. 2. Диаграмма устойчивости пространственно-однородных колебаний при параметрах $\sigma=0,1, \gamma=0,001, a=0,0001, r_0=5$: $\delta=-0,1$ (а), $\delta=-0,25$ (б)

На рис. 2а хорошо видно, что существует небольшая область параметров, локализованная вблизи частоты $\Omega=2\omega_{rel}$, при которых режим колебаний пространственно-однородного профиля оказывается неустойчивым. На рис. 2б присутствуют две области неустойчивости пространственно-однородных колебаний вблизи $\Omega_1=2\omega_{rel}$ и $\Omega_2=2\omega_{rel}$. Области имеют вид характерных для параметрической неустойчивости языков синхронизации.

В области параметрической неустойчивости возможно формирование сложных регулярных оптических структур. При $\sigma=0,1$, $\gamma=0,001$, $a=0,0001$, $r_0=5$, $\delta=-0,25$, $m=0,6$, $\Omega=2\omega_{rel}$ диаграмма экспонент Флоке в зависимости от волнового числа возмущения имеет вид, представленный на рис. 3.

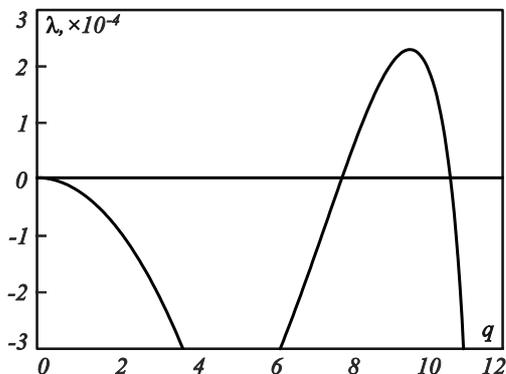


Рис. 3. Диаграмма экспонент Флоке в зависимости от волнового числа при $\sigma=0,1$; $\gamma=0,001$; $a=0,0001$; $r_0=5$; $\delta=-0,25$; $m=0,6$; $\Omega=2\omega_{rel}$

Из рисунка хорошо видно, что режим пространственно-однородных колебаний неустойчив по отношению к малым возмущениям, поскольку существует область волновых чисел с положительными показателями Флоке. Исходя из рис. 3, следует ожидать возбуждения на колеблющемся профиле пространственной структуры, аналогичной ряби Фарадея, с характерным волновым числом $q_{max} \approx 9,7$.

Результаты численного моделирования исходной модели (1) при выбранных параметрах были рассмотрены более подробно. Зависимость интенсивности оптического поля от времени в фиксированной точке пространства изображена на рис. 4.

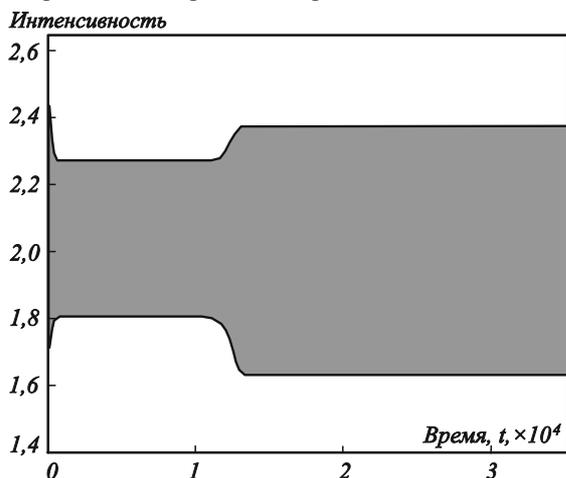


Рис. 4. Временная зависимость оптического поля в локальной точке при параметрах $\sigma=0,1$; $\gamma=0,001$; $a=0,0001$; $r_0=5$; $\delta=-0,25$; $m=0,6$; $\Omega=2\omega_{rel}$

Можно выделить два этапа в формировании параметрически возбуждаемых оптических структур. На начальном этапе устанавливаются временные колебания квазиоднородного профиля. На рис. 5а показан увеличенный фрагмент временной зависимости.

С течением времени неустойчивость колебаний однородного профиля приводит к возникновению пространственной моды, аналогичной ряби Фарадея. Нарастание данной неустойчивой моды приводит к формированию нелинейной оптической структуры. Зависимость интенсивности от времени в случае развитой неустойчивости в увеличенном масштабе представлена на рис. 5б.

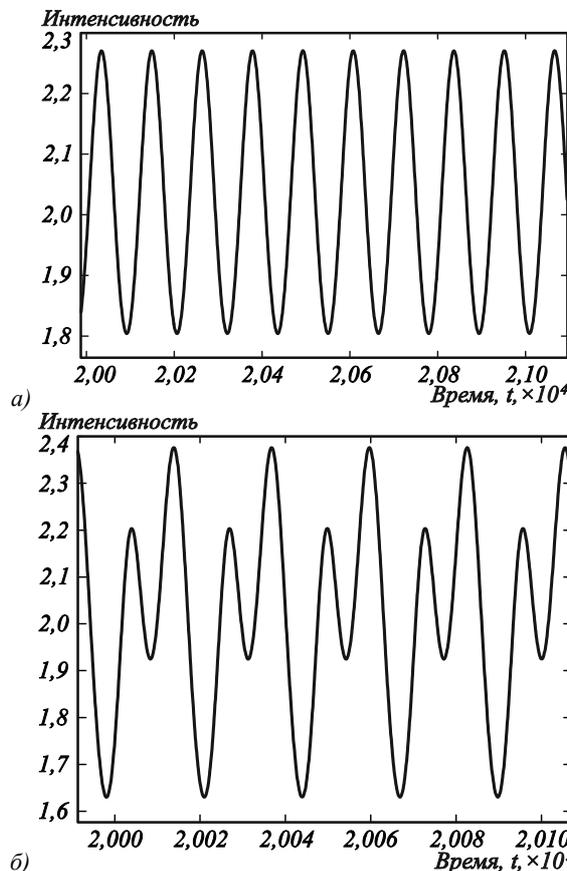


Рис. 5. Колебания квазиоднородного профиля (а), колебания ряби Фарадея при параметрах $\sigma=0,1$; $\gamma=0,001$; $a=0,0001$; $r_0=5$; $m=0,6$; $\Omega=2\omega_{rel}$ (б)

На рис. 5 хорошо видно, что частота колебаний установившейся структуры вдвое меньше частоты колебаний однородного профиля, что находится в точном соответствии с другими результатами по ряби Фарадея, полученными для других физических моделей.

Моделирование в двумерном случае показало, что при выбранных параметрах реализуется структура в виде полос («страйпов») с дефектами (рис. 6а). В пространственном спектре доминируют гармоники с волновым числом $q \approx 10$ (рис. 6б), что находится в хорошем согласии с волновым числом, предсказанным при помощи метода Флоке.

Численное моделирование показало, что возможно формирование также двумерных структур гексагональной формы. Пример такой структуры был получен численно при параметрах $\sigma=0,1$; $\gamma=0,001$; $a=0,0001$; $r_0=5$; $m=0,6$; $\Omega=2\omega_{rel}$ (рис. 7а-з).

Распределение интенсивности в дальней зоне, представленное на рис. 8а, показывает, что ха-

ракторное волновое число сформированной гексагональной структуры $q \approx 12,5$, что хорошо со-

гласуется с результатами анализа Флоке (рис. 8б).

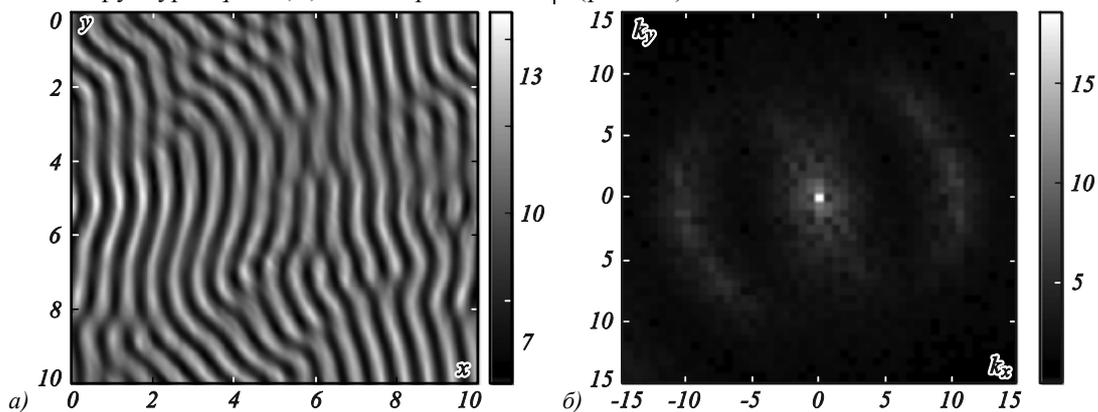


Рис. 6. Распределение интенсивности в ближней зоне (а) и пространственный спектр (б) при параметрах $\sigma=0,1$; $\gamma=0,001$; $a=0,0001$; $r_0=5$; $m=0,6$; $\Omega=2\omega_{rel}$

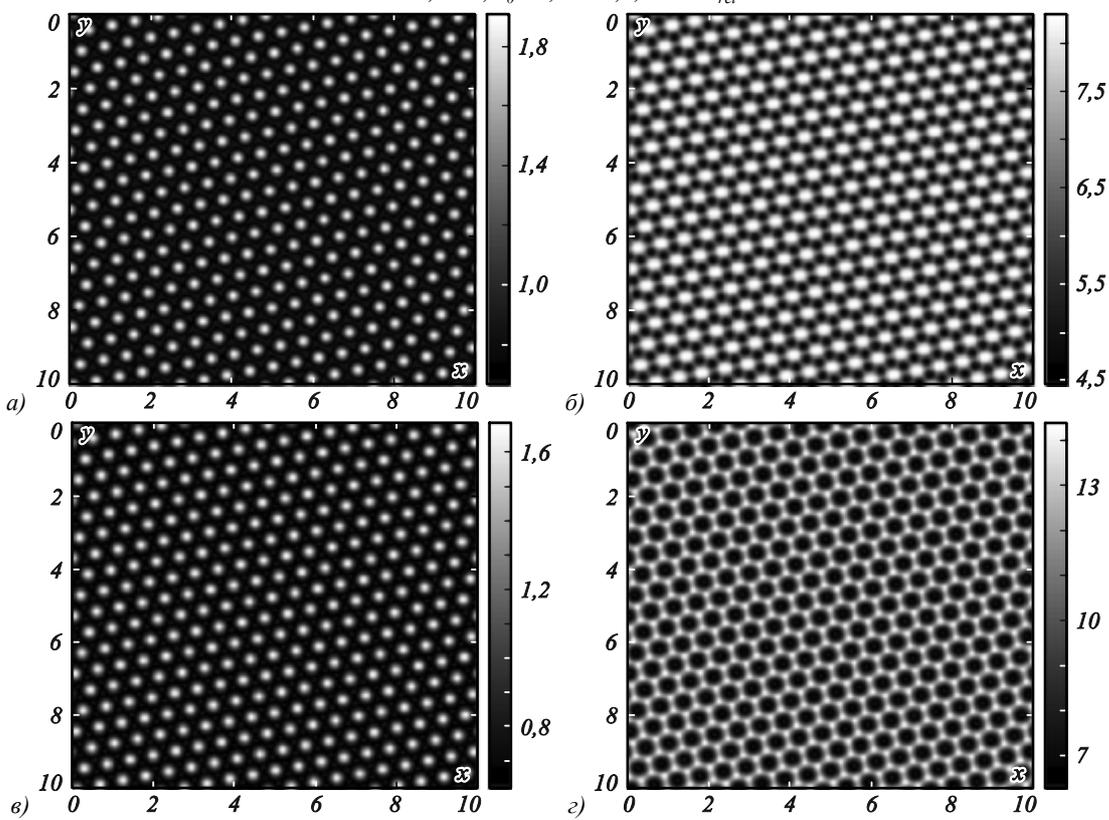


Рис. 7. Распределения интенсивности в ближней зоне в разные моменты времени

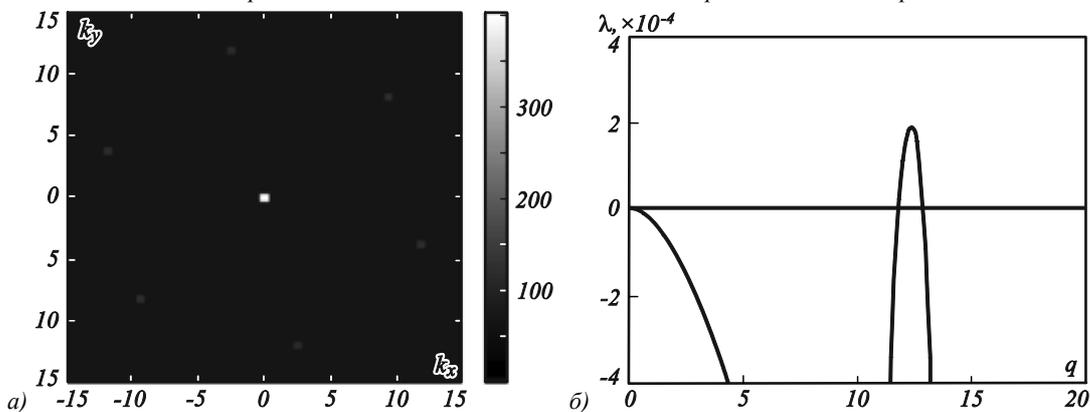


Рис. 8. Дальняя зона для гексагональной структуры (а) и диаграмма показателей Флоке (б)

При выборе параметров из области устойчивости диаграмм, изображённых на рис. 2а-б, с помощью численного моделирования было подтверждено, что режим колебаний однородного профиля оказывается устойчивым, формирования пространственных структур не происходит. Любые малые возмущения режима колебаний пространственно-однородного профиля затухают с течением времени.

Заключение

Проведено исследование формирования оптических структур при параметрах из области устойчивости однородного решения для лазеров класса В в результате модуляции параметра накачки. Показано, что существуют небольшие области параметров (при частоте модуляции накачки, близкой к частоте релаксационных колебаний или к её удвоенному значению), в которых периодическая модуляция параметра накачки приводит к формированию поперечных пространственно-временных структур. Проведённое численное моделирование показало, что в широкоапертурных лазерах динамического класса В параметрическая неустойчивость приводит к формированию страйпов (полос) и гексагонов. Характерные размеры возбуждаемых структур хорошо согласуются с результатами проведённого анализа Флоке.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, Государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности (проект 3.5139.2017/БЧ), а также гранта РФФИ 16-32-60151 мол_а_дк.

Литература

1. **Edwards, W.S.** Patterns and quasi-patterns in the Faraday experiment / W.S. Edwards, S. Fauve // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1994. – Vol. 278. – P. 123-148. – DOI: 10.1017/S0022112094003642.
2. **Staliunas, K.** Faraday patterns in Bose-Einstein condensates / K. Staliunas, S. Longhi, G.J. de Valcárcel // *Physical Review Letters*. – 2002. – Vol. 89, Issue 21. – 210406. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.210406.
3. **Tarasov, N.** Mode-locking via dissipative Faraday instability / N. Tarasov, A.M. Perego, D.V. Churkin, K. Staliunas, S.K. Turitsyn // *Nature Communications*. – 2016. – Vol. 7. – 12441. – DOI: 10.1038/ncomms12441.
4. **Cox, S.M.** Exponential time differencing for stiff systems / S.M. Cox, P.C. Matthews // *Journal of Computational Physics*. – 2002. – Vol. 176, Issue 2. – P. 430-455. – DOI: 10.1006/jcph.2002.6995.
5. **Pakhomov, A.V.** Intrinsic performance-limiting instabilities in two-level class-B broad-area lasers / A.V. Pakhomov, N.E. Molevich, A.A. Krents, D.A. Anchikov // *Optics Communications*. – 2016. – Vol. 372. – P. 14-21. – DOI: 10.1016/j.optcom.2016.03.089.
6. **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.
7. **Anchikov, D.A.** Multi-frequency tori in wide-aperture lasers / D.A. Anchikov, A.P. Shakirov, A.A. Krents, N.E. Molevich, A.V. Pakhomov // *Physics of Wave Phenomena*. – 2016. – Vol. 24, Issue 2. – P. 108-113. – DOI: 10.3103/S1541308X16020047.
8. **Anchikov, D.A.** Dynamic modes of wide-aperture laser systems above the second lasing threshold / D.A. Anchikov, A.A. Krents, N.E. Molevich, A.V. Pakhomov // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2014. – Vol. 41, Issue 8. – P. 226-229. – DOI: 10.3103/S1068335614080041.

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 «Лазерные системы в ракетной технике и космонавтике». Аспирант кафедры физики в Самарском университете. 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 «Прикладная математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Работает доцентом кафедры физики в Самарском университете. Область научных интересов: динамика лазеров, хаос, поперечная нелинейная оптика. E-mail: krenz86@mail.ru.

Молевич Нонна Евгеньевна – родилась в 1959 году, окончила с отличием Высшую школу физиков МИФИ – ФИАН в 1982 году. Является заведующим теоретическим сектором СФ ФИАН и профессором кафедры физики Самарского 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.

ГРНТИ: 29.33.17

Поступила в редакцию 13 января 2017 г. Окончательный вариант – 23 мая 2017 г.

SPATIALLY INHOMOGENEOUS PATTERN FORMATION DUE TO PARAMETRIC MODULATION IN BROAD-AREA LASERS

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

¹ Samara National Research University, Samara, Russia,

² Lebedev Physical Institute, Samara Branch, Samara, Russia

Abstract

The article discusses the formation of the optical patterns by modulation of the pump parameter, which may give rise to the Faraday instability in the wide-aperture lasers. The dynamics of class-B lasers is considered in the area of stability of the steady on-axis laser generation. Conditions for the appearance of spatio-temporal structures including stripes and oscillating hexagons are obtained.

Keywords: optical pattern, parametric instability, pump, periodic modulation.

Citation: Anchikov DA, Krents AA, Molevich NE. Spatially inhomogeneous pattern formation due to parametric modulation in large broad-area lasers. *Computer Optics* 2017; 41(3): 363-368. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-363-368.

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science, State Assignment to Educational and Research Institutions (3.5139.2017); Russian Foundation for Basic Research (16-32-60151 mol_a_dk)

References

- | | |
|--|--|
| <p>[1] Edwards WS, Fauve S. Patterns and quasi-patterns in the Faraday experiment. <i>Journal of Fluid Mechanics</i> 1994; 278: 123-148. DOI: 10.1017/S0022112094003642.</p> <p>[2] Staliunas K, Longhi S, de Valcárcel GJ. Faraday patterns in Bose-Einstein condensates. <i>Phys Rev Lett</i> 2002; 89(21): 210406. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.210406.</p> <p>[3] Tarasov N, Perego AM, Churkin DV, Staliunas K, Turitsyn SK. Mode-locking via dissipative Faraday instability. <i>Nat Commun</i> 2016; 7: 12441. DOI: 10.1038/ncomms12441.</p> <p>[4] Cox SM, Matthews PC. Exponential time differencing for stiff systems. <i>J Comput Phys</i> 2002; 176(2): 430-455. DOI: 10.1006/jcph.2002.6995.</p> <p>[5] Pakhomov AV, Molevich NE, Krents AA, Anchikov DA. Intrinsic performance-limiting instabilities in two-</p> | <p>level class-B broad-area lasers // <i>Opt Commun</i> 2016; 372: 14-21. DOI: 10.1016/j.optcom.2016.03.089.</p> <p>[6] Anchikov DA, Krents AA, Molevich NE, Pakhomov AV. Spatio-temporal instabilities in large aperture lasers. <i>Computer Optics</i> 2014; 38(4): 681-685.</p> <p>[7] Anchikov DA, Shakirov AP, Krents AA, Molevich NE, Pakhomov AV. Multi-frequency tori in wide-aperture lasers <i>Physics of Wave Phenomena</i> 2016; 24(2): 108-113. DOI: 10.3103/S1541308X16020047.</p> <p>[8] Anchikov DA, Krents AA, Molevich NE, Pakhomov AV. Dynamic modes of wide-aperture laser systems above the second lasing threshold. <i>Bulletin of the Lebedev Physics Institute</i> 2014, 41(8), 226-229. DOI: 10.3103/S1068335614080041.</p> |
|--|--|

Authors' information

Dmitry Alexandrovich Anchikov (b. 1988) graduated from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) in 2011 on specialty «Laser Technique and Laser Technologies». He is PhD student of Physics department at the S.P. Korolyov Samara National Research University. His research interests are currently focused on laser dynamics and numerical simulation. E-mail: swadimaz@mail.ru.

Anton Anatolyevich Krents (b. 1986) received master's degree in Applied Mathematics and Physics in S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) in 2009. He received his PhD in 2012. He works as Associate Professor of Physics department at the S.P. Korolyov Samara National Research University. His research interests are currently focused 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 MIPhI - LPI of RAS. She is the head of the theoretical sector of P. N. Lebedev Physical Institute (Samara branch) and professor of Physics department in Samara National Research University (SSAU). Her research interests are currently focused on the nonlinear optics, physics of lasers and nonlinear dynamics of nonequilibrium media. She is co-author of 200 scientific papers. She is the winner of the Provincial award of 2002 in the field of science and techniques for a cycle of works «Acoustics of nonequilibrium media» and the winner of P.N. Lebedev Physical Institute award of 2011. E-mail: molevich@fian.smr.ru.

Received January 13, 2017. Final version – May 23, 2017.