

УДК 535.374:621.375.8

ПОДАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ЛАЗЕРАХ С МОДУЛЯЦИЕЙ НАКАЧКИ ПРИ ПОМОЩИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНЖЕКЦИИ

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

В работе теоретически исследована динамика широкоапертурного лазера с временной периодической модуляцией параметра накачки и инжекцией внешнего оптического излучения. Показано, что инжекция эффективно подавляет поперечные неустойчивости, возникающие в результате модуляции накачки. Найдены параметры инжектируемого сигнала, при которых происходит эффективное подавление поперечных неустойчивостей.

Ключевые слова: широкоапертурные лазеры, оптическая инжекция, поперечные неустойчивости, стабилизация излучения.

Введение. В современных оптических системах связи полупроводниковые вертикально излучающие лазеры, а также микрочиповые твердотельные лазеры являются наиболее часто используемыми источниками излучения. Они обладают компактными размерами, а особенности геометрии обеспечивают генерацию на единственной продольной моде. Несмотря на эти достоинства, они обладают также важным недостатком, ограничивающим их применение во многих приложениях: генерация пространственно некогерентного излучения в режимах большой мощности. Дело в том, что увеличение мощности таких лазеров достигается за счет увеличения поперечных размеров активной среды. Как следствие, лазер начинает генерировать большое количество поперечных мод, нелинейное взаимодействие между которыми как раз и приводит к генерации лазером пространственно-временного хаоса.

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, 443086 Россия, Самара, Московское шоссе, 34; e-mail: elisabetayarunova@yandex.ru.

² Самарский филиал Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, 443011 Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, 221.

На сегодняшний день существует несколько подходов для стабилизации излучения широкоапертурных полупроводниковых и твердотельных лазеров: структурированная обратная связь [1], фазово-сопряженная обратная связь [2], фурье-селекция поперечных мод [3] и другие. Во всех этих методах использование внешних элементов снижает надежность устройства, в то время как оно становится менее компактным. Было обнаружено, что происхождение сложной пространственно-временной динамики лазеров в значительной степени обусловлено волновой неустойчивостью режима пространственно-однородной генерации [4, 5], которая приводит к хаотической пространственно-временной динамике лазера в поперечной плоскости. В последние несколько лет развитие получили методы стабилизации динамики широкоапертурных лазеров, связанные с пространственной и временной модуляцией параметров лазера. В работе [6] рассмотрена двумерная пространственная модуляция коэффициента усиления, которая может быть достигнута с помощью периодической сетки электродов для полупроводников с накачкой электрическим током. Исследование предсказывает пространственную (угловую) фильтрацию излучения, которая приводит к существенному улучшению пространственного качества пучка при усилении. Недавно была предложена периодическая пространственно-временная модуляция накачки для улучшения качества излучения полупроводниковых лазеров [7]. Подобные методы позволяют добиться лишь частичной стабилизации излучения. Это означает, что вместо генерации пространственно-временного хаоса лазер начинает излучать более упорядоченный поперечный профиль, однако избавиться от его пространственной и временной модуляции полностью не удастся. В предшествующих работах [8, 9] показано, что внешняя оптическая инжекция подавляет волновую неустойчивость, присущую широкоапертурным лазерам, и позволяет добиться пространственно-однородной генерации лазера даже в случае отстройки частоты генерируемого излучения от частоты инжектируемого излучения.

Прямая временная модуляция накачки является распространенным методом передачи полезного сигнала в высокоскоростных оптических каналах связи. В работах [8, 10] показано, что модуляция параметра накачки в широкоапертурных лазерах приводит к неустойчивости Фарадея (параметрической неустойчивости) и возникновению нерегулярных поперечных структур поля. Даже если подобрать параметры работающего лазера такими, чтобы в исходной системе не было волновой неустойчивости, то модуляция параметра накачки все равно приводит к неустойчивости Фарадея и генерации пространственно-временного хаоса.

В данной работе исследуется возможность подавления неустойчивости Фарадея, возникающей вследствие модуляции параметра накачки, с помощью инжекции внешнего оптического излучения.

Теоретический анализ. Математическое моделирование пространственно-временной динамики широкоапертурного лазера с инжекцией внешнего оптического излучения проводилось с помощью системы уравнений Максвелла–Блоха [11]:

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

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; Δ_{\perp} – двумерный поперечный лапласиан, $a = c^2/(2\omega\gamma_{\perp}d^2)$ – дифракционный параметр, где d – характерный пространственный размер задачи; r – величина накачки, нормированная на её пороговое значение. Внешняя инжекция характеризуется двумя параметрами: E_{inj} – амплитуда электрического поля инжектируемого оптического излучения и θ – частотная расстройка между инжектируемым сигналом и генерируемым излучением. Зависимость величины накачки от времени имеет вид: $r(t) = r_0(1 + m \cdot \cos(\Omega_{\text{mod}}t))$, где m – глубина модуляции, Ω_{mod} – частота модуляции. Предполагается, что лазер работает на единственной продольной моде, а активная среда имеет однородно уширенную линию. Данное приближение применимо при моделировании твердотельных и газовых лазеров, а также для полупроводниковых лазеров на квантовых точках (КТ), поскольку КТ обладают симметричной формой спектра, что приводит к очень слабой амплитудно-фазовой связи.

Простейшее решение системы уравнений (1) при $r = \text{const}$ имеет вид бегущей волны:

$$E(t, \vec{r}) = E_{st} \cdot \exp(i(\vec{q} \cdot \vec{r} + \Omega t)), \quad P(t, \vec{r}) = P_{st} \cdot \exp(i(\vec{q} \cdot \vec{r} + \Omega t)), \quad D(t, \vec{r}) = D_{st}, \quad (2)$$

где \vec{r} – двумерный (поперечный) радиус-вектор, \vec{q} – поперечное волновое число. Решение (2) справедливо для бесконечно широкого резонатора, в случае же наложения реальных граничных условий с учетом формы зеркал, простейшими решениями системы (1) являются поперечные моды резонатора, где \vec{q} соответствует волновому числу поперечной

моды. В таком случае фундаментальной моде будет соответствовать $\vec{q} = 0$, а поперечным модам высших порядков соответствует $\vec{q} \neq 0$. Прямой подстановкой решения (2) в исходную систему (1) несложно получить стационарные значения [12]:

$$D_{st}(q) = 1 + \left(\frac{\delta - aq^2}{\sigma + 1} \right)^2, \quad |E_{st}(q)|^2 = r - D_{st}(q),$$

$$P_{st}(q) = E_{st}(q) \cdot \left(1 + i \frac{aq^2 - \delta}{\sigma + 1} \right), \quad \Omega(q) = -\frac{\delta\sigma + aq^2}{\sigma + 1}.$$

Хорошо видно, что частота $\Omega = \Omega(q)$ является функцией волнового числа q , и таким образом, поперечные моды оказываются разделены в частотной области. Несмотря на то, что система (1) описывает лазер, работающий на единственной продольной моде, весь спектр поперечных мод оказывается учтен автоматически за счет включения в модель двумерного лапласиана. Динамика лазера критически зависит от знака и величины параметра отстройки δ . Как показано в [12], при $\delta < 0$ широкоапертурная лазерная система выбирает пространственно-однородное решение с $q = 0$. В работе [4] было проведено исследование устойчивости этого решения по отношению к бесконечно малым пространственно-временным возмущениям и показано, что в широкоапертурных лазерах динамического класса В (к ним относятся полупроводниковые, твердотельные и газовые лазеры) режим пространственно-однородной генерации с $q = 0$ оказывается неустойчив уже при малых значениях модуля δ , при этом реализуется волновой тип неустойчивости. Развитие неустойчивости приводит к филаментации излучения и генерации пространственно-временного хаоса. Как уже было сказано выше, наряду с волновой неустойчивостью, в широкоапертурном лазере с модуляцией накачки возникает также параметрическая неустойчивость [10]. Целью данной работы является исследовать возможность подавления обоих типов неустойчивостей с помощью инжекции внешнего излучения.

Хорошо известно, что отклик лазера на модуляцию параметра накачки имеет резонансный характер. Отклик лазера наиболее выражен при частоте модуляции, равной частоте релаксационных колебаний $\Omega_{\text{mod}} = \sqrt{2\sigma\gamma|E_{st}|^2/D_{st}}$, поэтому в данной работе будет рассмотрен именно этот случай.

Результаты и их обсуждение. Численное моделирование системы уравнений Максвелла–Блоха с учетом инжектируемого излучения E_{inj} , модуляции параметра накачки и отстройки между частотой генерируемого и инжектируемого излучения θ проводилось с помощью псевдоспектрального метода расщепления по физическим факторам (Split-StepFourierMethod). Для полупроводниковых лазеров характерны следующие

щие параметры [13]: $\gamma_{\perp} \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$, $k \approx 2.5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, $\gamma_{\parallel} \approx 5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, тогда безразмерные параметры модели (1) равны $\sigma = 0.025$, $\gamma = 5 \cdot 10^{-5}$, также для определенности зафиксируем параметр $\delta = -0.15$ и параметр накачки $r = 2$. При выборе характерного пространственного размера $d = 10 \text{ мкм}$ дифракционный параметр равен $a = 6 \cdot 10^{-4}$.

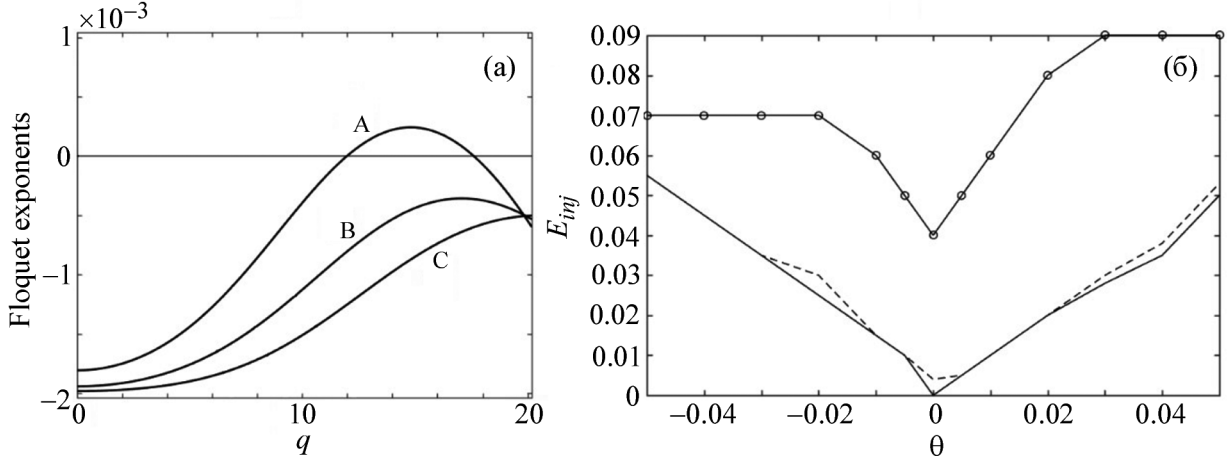


Рис. 1: (а) Показатели Флоке. А: $E_{inj} = 0$, $t = 0.5$, В: $E_{inj} = 0.03$, $t = 0.5$, С: $E_{inj} = 0.05$, $t = 0.5$. (б) Бифуркационная диаграмма границ стабилизации излучения (пояснения в тексте).

На рис. 1(а) изображены дисперсионные кривые, показывающие зависимость инкремента нарастания малого возмущения от волнового числа этого малого пространственно-временного возмущения. График был получен численно с помощью теории устойчивости Флоке, обобщенной для пространственно-временных (распределенных) динамических систем [14], для $t = 0.5$ и при частоте модуляции, равной частоте релаксационных колебаний. Инкременты нарастания в этой теории совпадают с показателями Флоке. Хорошо видно, что при $E_{inj} = 0$ существует область волновых чисел с положительным инкрементом, что соответствует неустойчивости. Однако уже при небольших значениях инжектируемого излучения возмущения с любым волновым числом затухают (инкременты отрицательные), т. е. режим приосевой пространственно-однородной генерации оказывается устойчив.

Построенные бифуркационные диаграммы (рис. 1(б)) определяют пороговые границы инжектируемого сигнала, начиная с которых, при данном t и θ , будет наблюдаться стабилизация излучения широкоапертурного лазера (для определенности выбрано три значения $t = 0$, $t = 0.25$ и $t = 0.5$). Рост t приводит к росту порогового значения. Эффективное подавление неустойчивых поперечных мод при $t = 0.5$ происходит при

параметрах, находящихся в области рисунка выше кривой с точками, при $m = 0.25$ – в области выше пунктирной кривой, при $m = 0$ – в области выше сплошной кривой.

Заключение. В представленной работе проведено исследование пространственно-временной динамики широкоапертурного лазера с модуляцией параметра накачки и инжекцией внешнего оптического излучения с учетом частотной расстройки между частотой генерируемого и инжектируемого излучения. Показано, что инжекция подавляет как волновую неустойчивость, присущую полупроводниковым и твердотельным лазерам, так и фарадеевскую неустойчивость, возникающую в результате модуляции параметра накачки. Определены области параметров инжектируемого излучения, при которых происходит стабилизация излучения при различных значениях глубины модуляции. Интерес к данной тематике обусловлен техническим прогрессом оптических информационных технологий.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-32-00704 мол_а, Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание по теме 0023-2019-0003, FSSS-2020-0014).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. Wolff, H. Fouckhardt, *Opt. Express*. **7**(6), 222 (2000). DOI: 10.1364/oe.7.000222.
- [2] D. H. DeTienne, G. R. Gray, G. P. Agrawal, and D. Lenstra, *IEEE J. Quantum Electron.* **33**(5), 838 (1997). DOI: 10.1109/3.572159.
- [3] S. Wolff, D. Messerschmidt, and H. Fouckhardt, *Opt. Express*. **5**(3), 32 (1999). DOI: 10.1364/oe.5.000032.
- [4] A. V. Pakhomov, N. E. Molevich, A. A. Krents, and D. A. Anchikov, *Opt. Commun.* **372**, 14 (2016). DOI: 10.1016/j.optcom.2016.03.089.
- [5] Д. А. Анчиков, А. А. Кренц, Н. Е. Молевич, А. В. Пахомов, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **41**(8), 21 (2014). DOI: 10.3103/S1068335614080041.
- [6] R. Herrero, M. Botey, M. Radziunas, and K. Staliunas, *Opt. Lett.* **37**(24), 5253 (2012). DOI: 0146-9592/12/245253-03\$15.00/0.
- [7] W. W. Ahmed, S. Kumar, R. Herrero, et al., *Phys. Rev. A* **92**, 043829-1 (2015). DOI: 10.1103/physreva.92.043829.
- [8] A. V. Pakhomov, R. M. Arkhipov, and N. E. Molevich, *J. Opt. Soc. Am. B* **34**(4), 756 (2017). DOI: 10.1364/JOSAB.34.000756.

- [9] Е. А. Ярунова, А. А. Кренц, Д. А. Анчиков, Н. Е. Молевич, Краткие сообщения по физике ФИАН **46**(4), 33 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619040067.
- [10] N. E. Molevich, A. A. Krents, and D. A. Anchikov, J. Opt. Soc. Am. B **34**(8), 1733 (2017). DOI: 10.1364/JOSAB.34.001733.
- [11] A. V. Pakhomov, N. E. Molevich, A. A. Krents, and D. A. Anchikov, Computer optics **40**(1), 31 (2016). DOI: 0.18287/2412-6179-2016-40-1-31-35.
- [12] P. Jacobsen, J. Moloney, A. Newell, and R. Indik, Physical Review A **45**(11), 8129 (1992). DOI: 10.1103/physreva.45.8129.
- [13] J. Ohtsubo, *Semiconductor Lasers. Stability, Instability and Chaos. Third Edition* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013), 570 p. DOI: 10.1007/978-3-642-30147-6.
- [14] B. Pena, M. Bestehorn, The European Physical Journal Special Topics **146**(1), 301 (2007). DOI: 10.1140/EPJST/E2007-00188-5.

Поступила в редакцию 23 января 2020 г.

После доработки 22 декабря 2020 г.

Принята к публикации 23 декабря 2020 г.

Публикуется по результатам XVII Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции по оптике и лазерной физике (Самара, 2020).