

УДК 535.374:621.375.8

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ЛАЗЕРОВ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОЙ ИНЖЕКЦИИ

Е. А. Ярунова<sup>1,2</sup>, А. А. Кренц<sup>1,2</sup>, Д. А. Анчиков<sup>1</sup>, Н. Е. Молевич<sup>1,2</sup>

*Показано, что оптическая инжекция может подавлять неустойчивые поперечные моды и таким образом стабилизировать излучение широкоапертурного лазера. В работе численно исследован общий случай несовпадения частоты инжектируемого и генерируемого лазером излучения. Показано, что несовпадение частот не разрушает стабилизирующий эффект.*

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

В последние десятилетия пространственно-временная динамика широкоапертурных лазеров привлекает большое внимание исследователей [1–6]. Интерес к данной тематике связан с использованием полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором и твердотельных микрочиповых лазеров в качестве источников излучения в оптических каналах связи. Малые продольные размеры резонатора обеспечивают генерацию на единственной продольной моде. Однако малая длина резонатора приводит к достаточно малой выходной мощности, что ограничивает применения лазера только для короткодействующих линий связи. Наиболее естественным способом обойти это ограничение и увеличить выходную мощность без отказа от всех преимуществ конфигурации с коротким резонатором является использование лазеров с широким поперечным сечением. Однако увеличение поперечных размеров приводит к возбуждению большого числа поперечных мод, нелинейное взаимодействие между которыми приводит к развитию пространственно-временного хаоса. Для большинства приложений нерегулярная пространственно-временная динамика лазера является крайне нежелательной. В работе [7] было показано, что внешняя оптическая инжекция подавляет коротковолновую

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, 443086 Россия, Самара, Московское шоссе, 34; e-mail: liza.yarunova@mail.ru.

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

поперечную пространственно-временную неустойчивость в широкоапертурных лазерах динамического класса В, и позволяет добиться пространственно-однородной генерации. Однако на сегодняшний день исследован только частный случай точного совпадения частоты генерируемого и инжектируемого излучений, но в реальных экспериментах всегда существует частотная расстройка, которую необходимо учесть. В данной работе проведено численное моделирование пространственно-временной динамики широкоапертурного лазера с инжекцией внешнего оптического излучения и учетом частотной расстройки между частотой генерируемого и инжектируемого излучения.

Математическое моделирование пространственно-временной динамики широкоапертурного лазера с инжекцией внешнего оптического излучения проводилось с помощью системы уравнений Максвелла–Блоха [8]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = ia\Delta_{\perp}E + \sigma(P - (1 - i\delta)E + E_{\text{inj}}e^{i\theta t}), \quad \frac{\partial P}{\partial t} = -(1 + i\delta)P + DE, \quad (1)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\gamma \left[ D - r + \frac{1}{2}(E^*P + P^*E) \right],$$

где  $E, P, D$  – безразмерные огибающие электрического поля, поляризации и инверсии населённости соответственно;  $\gamma = \gamma_{\parallel}/\gamma_{\perp}$  и  $\sigma = k/\gamma_{\perp}$ , где  $\gamma_{\perp}, \gamma_{\parallel}$  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;  $a = c^2/(2\omega\gamma_{\perp}d^2)$  – дифракционный параметр, где  $d$  – характерный пространственный (поперечный) размер задачи;  $r$  – величина накачки, нормированная на её пороговое значение. Внешняя инжекция характеризуется двумя параметрами:  $E_{\text{inj}}$  – амплитуда инжектируемого сигнала и  $\theta = (\omega_{\text{inj}} - \omega)/(\gamma_{\perp} + k)$  – частотная расстройка между инжектируемым сигналом и генерируемым излучением.

Моделирование динамики проводилось при параметрах, соответствующих широкоапертурным полупроводниковым лазерам. Для полупроводниковых лазеров характерны следующие параметры [9]:  $\gamma_{\perp} \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ,  $k \approx 2.5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ ,  $\gamma_{\parallel} \approx 5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ , тогда безразмерные параметры модели (1) равны  $\sigma = 0.025$  и  $\gamma = 5 \cdot 10^{-5}$ . При выборе характерного пространственного размера  $d = 10$  мкм дифракционный параметр равен  $a = 10^{-4}$ .

Интенсивность, соответствующая режиму пространственно-однородной приосевой генерации, с учетом инжектируемого излучения определяется неявным выражением:

$$E_{\text{inj}} = \frac{rE_{\text{st}}(1 - i(\theta + \delta))}{|E_{\text{st}}|^2 + 1 + (\theta + \delta)^2} - E_{\text{st}} \left( 1 - i \left( \delta - \frac{\theta}{\sigma} \right) \right). \quad (2)$$

Для исследования стабилизирующего влияния инъекции был проведен анализ устойчивости режима пространственно-однородной стационарной генерации (2) по отношению к малым пространственно-временным возмущениям. Было исследовано влияние расстройки  $\theta$  на эффективность подавления неустойчивых поперечных мод. Исследование влияния отстройки между частотой генерируемого и инжектируемого излучения  $\theta$  проводилось численно с помощью псевдоспектрального метода расщепления по физическим факторам (Split-Step Fourier Method). На рис. 1 построен пример бифуркационной диаграммы, при указанных в подписи к рисунку параметрах. Серым цветом показана область параметров инжектируемого сигнала, при которых происходит эффективное подавление неустойчивых поперечных мод, и режим пространственно-однородной приосевой генерации оказывается устойчив.

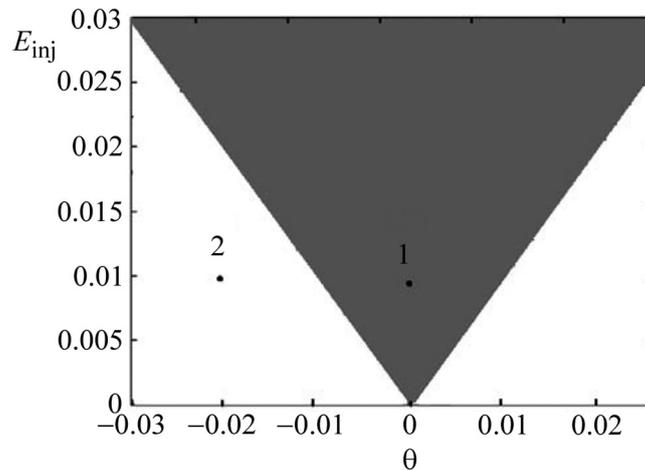


Рис. 1: Бифуркационная диаграмма для случая с параметрами  $\sigma = 0.025$ ,  $\gamma = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $a = 10^{-4}$ ,  $r = 2$ ,  $\delta = -0.15$ . Серым показана область эффективного подавления неустойчивых поперечных мод и однородной приосевой генерации. Точки 1, 2 — см. пояснения в тексте и подписи к рис. 2.

На рис. 2((а), (б)) показан вид мгновенного распределения интенсивности при параметрах, соответствующих точкам 1 и 2 бифуркационной диаграммы, соответственно.

Таким образом, в представленной работе проведено исследование пространственно-временной динамики широкоапертурного лазера с инъекцией внешнего оптического излучения и учетом частотной расстройки между частотой генерируемого и инжектируемого излучения. Показано, что инъекция даже слабого (по сравнению с генерируемым) излучения приводит к подавлению неустойчивых поперечных мод (при параметрах, указанных в подписи к рис. 2(а), интенсивность инжектируемого излучения

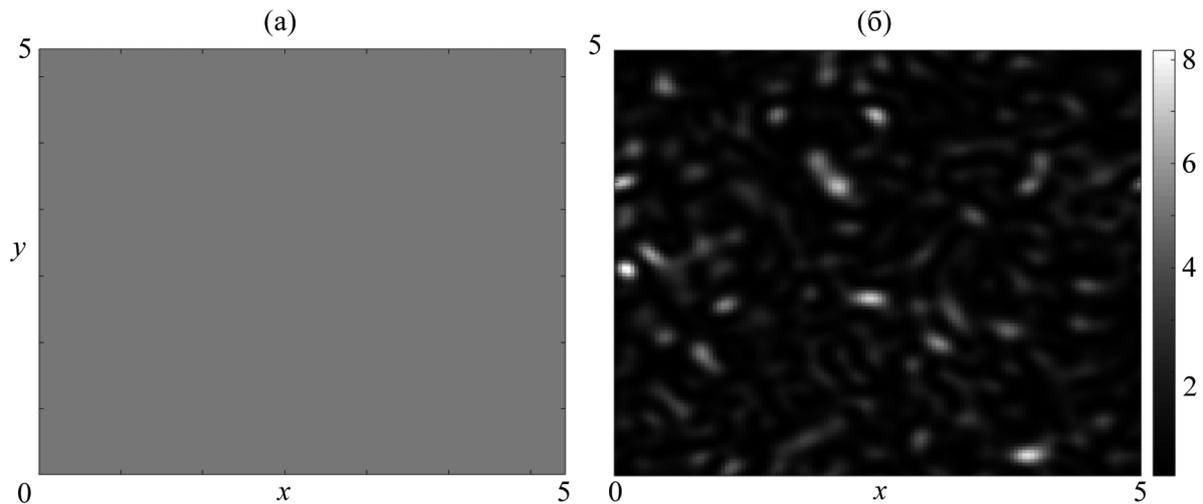


Рис. 2: Мгновенное распределение интенсивности при  $E_{inj} = 0.01$  и отстройке (а)  $\theta = 0$  (точка 1 на рис. 1) и (б)  $\theta = -0.02$  (точка 2 на рис. 1).

$|E_{inj}|^2 = 0.0001$  гораздо меньше генерируемого лазером излучения  $|E_{st}|^2 \approx 0.988$ ). Показано, что частотная расстройка между частотой генерируемого и инжектируемого излучения не разрушает обнаруженный эффект, существует область синхронизации (серый цвет на рис. 1), в которой инжекция эффективно подавляет неустойчивые поперечные моды и стабилизирует излучение широкоапертурного лазера. Хорошо видно, что область захвата частоты увеличивается с ростом амплитуды инжектируемого сигнала. Таким образом, инжекция внешнего излучения может быть использована для подавления поперечных пространственно-временных неустойчивостей в широкоапертурных лазерах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-32-00704 мол-а.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. V. Pakhomov, N. E. Molevich, A. A. Krents, and D. A. Anchikov, *Opt. Commun.* **372**, 14 (2016).
- [2] Д. А. Анчиков, А. А. Кренц, Н. Е. Молевич, А. В. Пахомов, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **41**(8), 21 (2014).
- [3] A. A. Krents, N. E. Molevich, and D. A. Anchikov, *J. Opt. Soc. Am. B* **34**, 1733 (2017).
- [4] M. Tlidi, K. Staliunas, K. Panajotov, et al., *Philos. Trans. R. Soc. London A* **372**, 20140101 (2014).

- [5] W. W. Ahmed, S. Kumar, J. Medina, et al., *Opt. Lett.* **43**(11), 2511 (2018).
- [6] S. Kumar, R. Herrero, M. Botey, and K. Staliunas, *Opt. Lett.* **39**(19), 5598 (2014)
- [7] Д. А. Анчиков, А. А. Кренц, Н. Е. Молевич, А. В. Пахомов, *Компьютерная оптика* **40**(1), 31 (2016).
- [8] P. Jacobsen, J. Moloney, A. Newell, and R. Indik, *Phys. Rev. A* **45**, 8129 (1992).
- [9] J. Ohtsubo, *Semiconductor Lasers. Stability, Instability and Chaos. Third Edition* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2013).

Поступила в редакцию 18 января 2019 г.

После доработки 2 апреля 2019 г.

Принята к публикации 2 апреля 2019 г.

*Публикуется по результатам XVI Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции по оптике и лазерной физике (Самара).*