

Стабилизация широкоапертурных полупроводниковых лазеров с помощью внешней оптической инжекции

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

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук, Ново-Садовая 221, Самара, Россия, 443011

Аннотация. Работа посвящена аналитическому и численному исследованию пространственно-временной динамики широкоапертурного полупроводникового лазера с инжекцией внешнего оптического излучения. Моделирование динамики лазера проводилось с помощью систему уравнений Максвелла-Блоха. Показано, что инжекция внешнего оптического излучения позволяет подавить неустойчивые поперечные моды и стабилизировать излучение лазера. В работе изучено влияние расстройки между частотой генерируемого и инжектируемого излучения. Определена область параметров расстройки и амплитуды инжектируемого излучения, при которых происходит эффективная стабилизация полупроводниковых широкоапертурных лазеров.

1. Введение

Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором активно используются в оптических системах связи в качестве источников излучения. Стабилизация параметров широкоапертурных полупроводниковых лазеров – одна из важнейших задач современной оптики. Важная особенность полупроводниковых вертикально излучающих лазеров – 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 [1-5]. Для применения лазера в высокоскоростных оптических каналах связи нерегулярная пространственно-временная динамика лазера является нежелательной. Поэтому необходимо решить задачу по стабилизации излучения широкоапертурного полупроводникового лазера. В работе [6] было показано, что внешняя оптическая инжекция подавляет коротковолновую 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 проведен учет расстройки частоты инжектируемого

излучения от частоты генерируемого излучения. Определены значения расстройки и амплитуды генерируемого излучения при которых происходит эффективное подавление неустойчивых поперечных мод.

2. Математическая модель

Математическое моделирование пространственно-временной динамики широкоапертурного лазера с инжекцией внешнего оптического излучения проводилось с помощью системы уравнений Максвелла-Блоха [7]:

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

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; $a = c^2/(2\omega\gamma_{\perp}d^2)$ - дифракционный параметр, где d - характерный пространственный размер задачи; r - величина накачки, нормированная на её пороговое значение. Внешняя инжекция характеризуется двумя параметрами: E_{inj} - амплитуда инжектируемого сигнала и θ - частотная расстройка между инжектируемым сигналом и генерируемым излучением.

3. Стабилизирующее влияние инжекции

В широкоапертурном полупроводниковом лазере в отсутствие инжекции режим пространственно-водородной приосевой генерации оказывается неустойчив по отношению к малым поперечным пространственно-временным возмущениям [8]. В полупроводниковых широкоапертурных лазерах реализуется волновая неустойчивость, приводящая к пространственно-временной модуляции в поперечном сечении генерируемого пучка. Характерные пространственные размеры модуляции и частота временной модуляции определяются выражениями [8]:

$$q_{unst} = \sqrt[4]{\frac{2\gamma\sigma I_{st}}{(1 + \delta^2)a^2}}, \quad (2)$$

$$\Omega_{unst} = \sqrt{\frac{4\gamma\sigma I_{st}}{1 + \delta^2}}, \quad (3)$$

где $I_{st} = |E_{st}|^2 = r - 1 - \delta^2$ - стационарное значение интенсивности. Хорошо видно, что характерные пространственный (2) и временной масштабы (3) связаны с частотой релаксационных колебаний $\omega_{rel} = \sqrt{\frac{2\gamma\sigma I_{st}}{1 + \delta^2}}$.

Инжекция внешнего оптического излучения изменяет выражение для стационарного значения интенсивности:

$$E_{inj} = \frac{rE_{st}(1 - i(\theta + \delta))}{|E_{st}|^2 + 1 + (\theta + \delta)^2} - E_{st} \left(1 - i \left(\delta - \frac{\theta}{\sigma} \right) \right) \quad (4)$$

Стационарное значение интенсивности оказывается задано неявной функцией. На рисунке 1 показаны типичные кривые зависимости положения равновесия от величины инжектируемого излучения. Пунктиром показаны неустойчивые ветки.

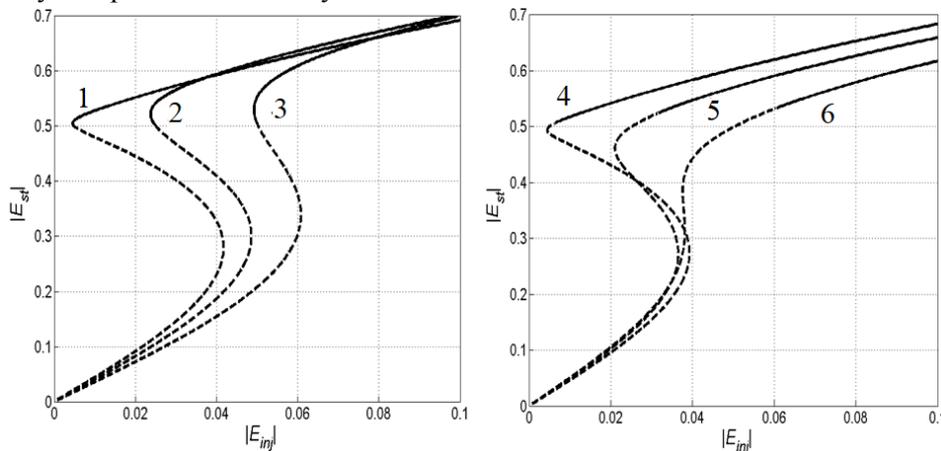


Рисунок 1. Зависимость стационарного значения интенсивности от величины инжектируемого излучения при $r=1.2$, $\delta=-0.15$ и 1) $\theta=-0.0001$ 2) $\theta=-0.0005$ 3) $\theta=-0.001$ 4) $\theta=0.0001$ 5) $\theta=0.0005$ 6) $\theta=0.001$.

Моделирование динамики проводилось при параметрах, соответствующих широкоапертурным полупроводниковым лазерам: $\sigma=0.025$, $\gamma=5 \cdot 10^{-5}$, $a=10^{-4}$, $r=1.2$. На рисунке 2 показаны две дисперсионные кривые, показывающие инкремент нарастания малого возмущения от волнового числа этого малого пространственно-временного возмущения. Хорошо видно, что при $E_{inj}=0$ существует область волновых чисел с положительным инкрементом. Такая дисперсионная кривая соответствует волновой неустойчивости. Однако уже при небольших значениях инжектируемого излучения $E_{inj}=0.02$ возмущения с любым волновым числом затухают (инкременты отрицательные), т.е. режим приосевой пространственно-одномерной генерации оказывается устойчив.

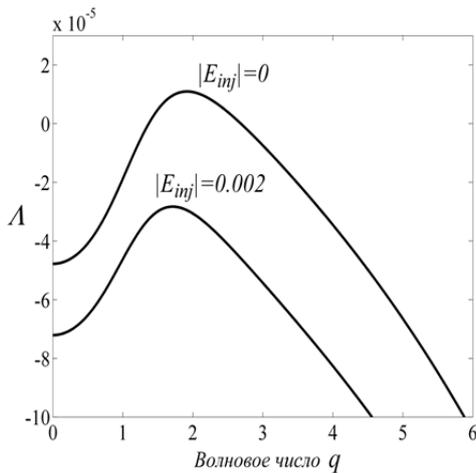


Рисунок 2. Дисперсионные кривые.

Численное моделирование системы уравнений Максвелла-Блоха с учетом инжектируемого излучения E_{inj} и отстройки между частотой генерируемого и инжектируемого излучения θ проводилась с помощью псевдоспектрального метода расщепления по физическим факторам (Split-Step Fourier Method). Было исследовано влияние отстройки θ на эффективность

подавления неустойчивых поперечных мод. На рисунке 3 показана соответствующая бифуркационная диаграмма. Серым цветом показана область параметров инжектируемого сигнала, при которой происходит эффективное подавление неустойчивых поперечных мод.

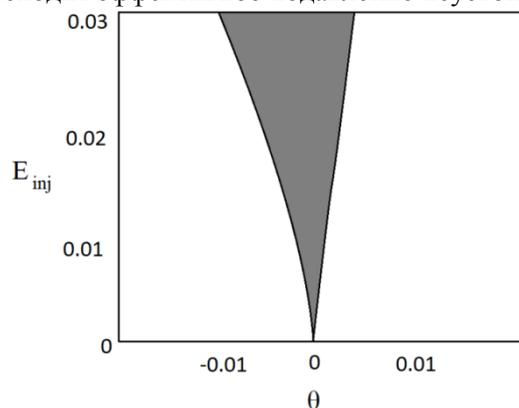


Рисунок 3. Бифуркационная диаграмма.

4. Заключение

Проведено аналитическое и численное исследование пространственно-временной динамики широкоапертурного полупроводникового лазера с инжекцией внешнего оптического излучения. Показано, что инжекция даже слабого (по сравнению с генерируемым) излучения приводит к подавлению неустойчивых поперечных мод. Показано, что частотная расстройка между частотой генерируемого и инжектируемого излучения не разрушает обнаруженный эффект, существует область синхронизации (серый цвет на рисунке 3) в которой некогерентная инжекция эффективно подавляет неустойчивые поперечные моды и стабилизирует излучение широкоапертурного лазера.

5. Литература

- [1] 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(8). – P. 226-229. DOI: 10.3103/S1068335614080041.
- [2] Krents, A.A. Resonant excitation of transverse patterns in broad-area lasers by periodic temporal pump modulation / A.A. Krents, N.E. Molevich, D.A. Anchikov // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2017. – Vol. 34(8). – P. 1733-1739. DOI: 10.1364/JOSAB.34.001733
- [3] Tlidi, M. Localized structures in dissipative media: from optics to plant ecology / M. Tlidi, K. Staliunas, K. Panajotov, A. Vladimirov, M. Clerc // *Philos. Trans. R. Soc. London A*. – 2014. – Vol. 372(2027). – P. 20140101. DOI: 10.1098/rsta.2014.0101.
- [4] Ahmed, W.W. Stabilization of broad-area semiconductor laser sources by simultaneous index and pump modulations / W.W. Ahmed, S. Kumar, J. Medina, M. Botey, R. Herrero, K. Staliunas // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43(11). – P. 2511-2514. DOI: 10.1364/OL.43.002511.
- [5] Anchikov, D.A. Spatially inhomogeneous pattern formation due to parametric modulation in large broad-area lasers / D.A. Anchikov, A.A. Krents, N.E. Molevich // *Computer Optics*. – 2017. – Vol. 41(3). – P. 363-368. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-363-368.
- [6] Anchikov, D.A. Suppression of spatio-temporal instabilities in broad-area class-B lasers / D.A. Anchikov, A.A. Krents, N.E. Molevich, A.V. Pakhomov // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(1). – P. 31-35. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-31-35.
- [7] Jacobsen, P.K. Space-time dynamics of wide-gain-section lasers / P.K. Jacobsen, J.V. Moloney, A.C. Newell, R. Indik // *Phys. Rev. A*. – 1992. – Vol. 45(11). – P. 8129-8137. DOI: 10.1103/PhysRevA.45.8129.

- [8] 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.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-00704 мол_а.

Stabilization of broad-area semiconductor lasers by external optical injection

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

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Lebedev Physical Institute, Novo-Sadovaya str. 221, Samara, Russia, 443011

Abstract. The paper is devoted to the analytical and numerical investigation of the spatio-temporal dynamics of a broad-area semiconductor laser with external optical injection. The laser dynamics was simulated by using the Maxwell-Bloch equations. It is shown that the external optical injection makes it possible to suppress unstable transverse modes and stabilize the laser output. The paper studies the effect of detuning between the frequency of the generated and injected radiation. The range of the parameters of the detuning and the amplitude of the injected signal, in which the effective stabilization of semiconductor broad-area lasers occurs, is determined.