

07

Аномальный сценарий возникновения динамического хаоса в многомодовых лазерных диодах

© Г.Г. Акчурин, А.Г. Акчурин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: AkchurinGG@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 декабря 2005 г.

Обнаружен аномальный переход к режиму возникновения хаоса в многомодовом квантово-размерном гетеролазере ($\lambda = 635 \text{ nm}$) при изменении усиления, вызванного током инжекции. Вблизи порога генерации при слабой нелинейной связи реализуется устойчивый многомодовый (более 10 продольных мод) режим генерации. С ростом тока инжекции, вследствие конкуренции мод, происходит частичное подавление слабых лазерных мод. При определенном уровне превышения усиления над потерями реализуется режим жесткого возбуждения четырех мод, характеризующийся возникновением динамического хаоса, который проявляется в нерегулярных амплитудных пульсациях мод, уширении оптического спектра, потери когерентности, диагностируемой по уменьшению видности интерференционных полос и их хаотических фазовых сдвигов. Рост глобальной нелинейной связи и соответственно степени конкуренции мод приводит к понижению размерности автоколебательной системы и возникновению режима устойчивой одномодовой генерации.

Многомодовые режимы генерации являются типичными для полупроводниковых и твердотельных лазеров, имеющих ширину линии усиления от сотен GHz до десятков THz при межмодовом частотном расстоянии от сотен MHz до нескольких сотен GHz [1]. В лазерном диоде может возбуждаться несколько десятков мод, а в твердотельном от десятков мод в YAG:Nd микролазерах до нескольких десятков и даже сотен тысяч в титан-сапфировых [2]. Режим вынужденной синхронизации мод используется для генерации ультракоротких лазерных импульсов, причем число сфазированных мод будет определять длительность импульсов от сотен пикосекунд до десятков фемтосекунд [3,4]. Особенности возникновения хаотических режимов при разрушении режима вынужденной синхронизации в многомодовых твердотельных

лазерах при перестройке резонатора, вызывающих уширение импульсов и нерегулярность их последовательности, как в физическом, так и численном эксперименте обсуждались в работе [5].

Сценарии возникновения динамического хаоса в одночастотных лазерах и лазерах, работающих в неавтономном режиме, обсуждались в обзорной работе [6]. В полупроводниковых лазерах исследованы в основном режимы возникновения хаоса через каскад удвоения периода, который реализуется в системах с запаздывающей оптической обратной связью [7–9].

Современная нелинейная динамика установила основные механизмы возникновения неустойчивостей и сценарии перехода к хаосу в диссипативных нелинейных системах [10–12]. В центрах нелинейной динамики проводятся интенсивные исследования по особенностям возникновения хаоса в модельных цепочках и решетках автогенераторов Ван-дер-Поля с различными типами связей, а также делаются попытки по численному моделированию распределенных нелинейных систем [13,14]. Основным сценарий возникновения динамического хаоса в системе связанных осцилляторов, так называемый сценарий Рюэля–Такенса, происходит через разрушение квазипериодичности (разрушение трехмерного тора) и возникновение странного аттрактора [15].

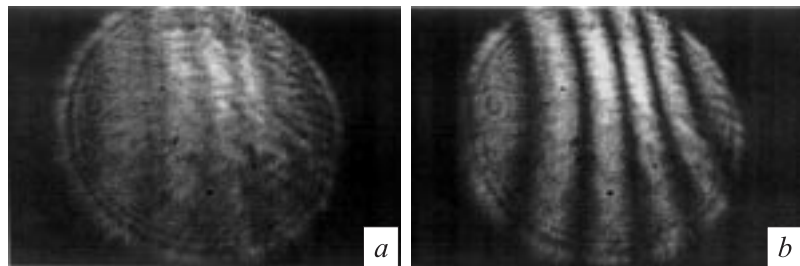
В лазерной физике такой механизм возникновения хаоса наблюдался в экспериментах с газоразрядными лазерами многими исследователями, когда еще не сложилась нелинейная идеология; такой режим назывался „шум несинхронизированного лазера“ [16].

Экспериментальную реализацию сценария перехода к хаосу по модели Рюэля–Такенса в автономных связанных осцилляторах мы осуществили в газоразрядном He–Ne-лазере ($\lambda = 633 \text{ nm}$) с межмодовым расстоянием порядка 250 MHz и шириной линии усиления 1.5 GHz. На пороге генерации реализуется одночастотный режим; с ростом усиления, осуществляемого увеличением тока разряда, последовательно возбуждаются две и три моды, достаточно сильно конкурирующие только в симметричном режиме. Однако при возбуждении четвертой моды скачком возникали сильные низкочастотные флуктуации мощности, проявляющиеся в уширении спектра биений продольных мод, а также в нестационарности и зашумлении оптического спектра, для наблюдения которого использовался сканирующий интерферометр Фабри–Перо [17].

В настоящем сообщении представлены экспериментальные результаты принципиально отличного от классического сценария Рюэля—Такенса возникновения динамического хаоса, который наблюдался в полупроводниковом квантово-размерном многомодовом лазере при изменении такого управляющего параметра, как усиление. Обнаруженный сценарий возникновения хаоса исследован впервые для распределенных автоколебательных систем и поэтому представляет интерес не только для лазерной, но и в целом для нелинейной физики.

Методика и результаты эксперимента. Режим динамического хаоса наблюдался в полупроводниковом квантово-размерном инжекционном гетеролазере ($\lambda = 635 \text{ nm}$) с типичной шириной линии излучения порядка 1.5 THz и межмодовым частотным расстоянием 130 GHz. Традиционный метод наблюдения хаотических режимов в лазерах, основанный на анализе межмодовых биений в радиочастотном диапазоне, невозможен из-за сверхвысокой частоты биений, но, с другой стороны, позволяет непосредственно исследовать оптический спектр с помощью оптических дифракционных спектрометров. Для диагностики использовался дифракционный спектрометр с максимальным разрешением типа ДФС-3. Мониторинг оптического спектра лазерных мод, детектируемого с помощью ПЗС цифровой видеокамеры типа Video-Scan, позволял регистрировать последовательность спектров с частотой 30 кадров в секунду. Такой способ диагностики позволял достигнуть спектрального разрешения по ширине мод порядка 16 GHz, а минимальные частотные сдвиги регистрировать с разрешением 2 GHz. Для измерения временной корреляционной функции использовался сканирующий уголкоый интерферометр Майкельсона. Кроме того, мониторинг видности интерференционных полос, позволяющий оценить степень разрушения когерентности, осуществлялся с помощью интерферометра Жамена и ПЗС видеокамеры.

При возбуждении вблизи порога генерации (превышение усиления над потерями $\beta = I/I_{th} < 1.1$) в лазере возбуждаются более 10 стабильных мод с асимметричной лоренцевской огибающей. Функция временной когерентности представляет собой типичную квазипериодическую функцию с периодом $1.48 \text{ mm/s} = 4.95 \text{ ps}$, на которой наблюдается $(N - 1)$ минимум (N — число генерируемых мод). При этом до порога генерации длина когерентности не превышала 50 микрон.



Изменение контрастности интерференционных полос, полученных с помощью интерферометра Жамена при увеличении превышения усиления над порогом $\beta = I/I_{th}$ в квантово-размерном лазерном диоде с $\lambda = 635$ нм, вызванном изменением тока инжекции: *a* — $\beta \sim 1.6$, режим динамического хаоса с жестким возбуждением 4 продольных мод с частотным межмодовым расстоянием $\Delta\nu = 130$ GHz, $I = 16$ mA; *b* — $\beta = 2$, режим стабильной одночастотной генерации, $I = 20$ mA.

С ростом тока инжекции линейно возрастает суммарная мощность, но увеличение нелинейного взаимодействия мод вызывает эффекты частичного подавления амплитуды мод, особенно слабых на краю линии. Рост нелинейности вызывает увеличение конкуренции, спектр мод прореживается, но остается стабильным, хотя и зависит при фиксированном токе от частотной настройки мод относительно центра линии излучения. При определенном превышении порога $\beta \sim 1.6$ скачком возбуждаются 4 продольные моды с соизмеримой интенсивностью, при этом мониторинг спектра мод показал возникновение сильных пульсаций интенсивности мод, их спектральное уширение, нестационарность функции когерентности и резкую потерю контрастности интерференционных полос, их хаотическую девиацию. Детальные исследования контрастности и хаотической динамики интерференционных полос показали их связь с возникновением сильных фазовых флуктуаций. Проявление таких хаотических фазовых флуктуаций в лазерном диоде наблюдалось нами недавно в интерференционном сигнале волноводных мод при зондировании световодов, что вызывало нерегулярную динамику спектров [18]. Типичные интерференционные паттерны, соответствующие режиму динамического хаоса и стабильной одночастотной генерации, возникающей с ростом нелинейности,

представлены на рисунке. Режим генерации 3–4 мод также является нестационарным, сильно зависящим от настройки мод резонатора относительно центра линии излучения. При дальнейшем увеличении тока инжекции и соответственно степени нелинейности реализуется режим стабильной двухмодовой генерации, скачкообразно переходящий в одномодовый при частотном дрейфе резонатора. При двойном пороге для данного типа лазеров реализуется режим стабильной одночастотной генерации с длиной когерентности по крайней мере больше нескольких метров.

Такое принципиальное отличие обнаруженной эволюции бифуркационных режимов и нетрадиционного сценария возникновения динамического хаоса с ростом степени нелинейности от классического, по-видимому, связано с типом межмодовой связи. В случае полупроводникового лазера с однородной лоренцевской линией излучения продольные моды связаны глобально. В газовых лазерах с доплеровской линией излучения, в которых реализуется сценарий Рюэля–Такенса, моды селективно взаимодействуют с определенными группами атомов, причем наиболее сильно связаны соседние моды. Следует отметить, что параметр связи мод является частотно-зависимым и может изменяться при перестройке длины резонатора в пределах $\lambda/2$, что сказывается на порогах возникновения хаотических режимов. В компактных твердотельных YAG:Nd микролазерах с диодной накачкой и внутрирезонаторным генератором второй гармоники ($\lambda = 532 \text{ nm}$) были также обнаружены хаотические режимы при возбуждении 3–4 мод, возникающие при тепловом дрейфе длины резонатора, однако особенности сложной динамики в таких лазерах, возникающей при определенных настройках резонатора, требуют дополнительных исследований.

Таким образом, экспериментально обнаружен аномальный сценарий перехода к хаосу в нелинейной системе с глобальной связью при возрастании такого управляющего параметра, как превышение усиления над потерями. Сильное нелинейное взаимодействие в связанной многомодовой автоколебательной системе может вследствие эффекта конкуренции понижать размерность системы и приводить к реализации одночастотного режима.

Полученные результаты, на наш взгляд, важны не только для нелинейной динамики, но имеют прикладное значение, так как полупроводниковые лазеры в настоящее время используются в информационных

технологиях, а знание сложных нелинейно-динамических режимов в распределенной автоколебательной системе позволит разработать технологии для получения малошумящей генерации.

Автор выражает признательность сотрудникам кафедры электроники и волновых процессов и лазерной физики СГУ Д.И. Трубецкову и Л.А. Мельникову за обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента России № 25.2003.2 „Ведущие научные школы“ и U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (N REC–006).

Список литературы

- [1] *Полупроводниковые* инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры / Под ред. У. Тсанга. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 320 с.
- [2] *Holzwarth R., Udem Th., Hänsch T.W.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. N 11. P. 2264–2267.
- [3] *Херман Й., Вильгельми Б.* Лазеры сверхкоротких световых импульсов. М.: Мир, 1986. 262 с.
- [4] *Крюков П.Г.* // *Квантовая электроника.* 2001. Т. 31. № 2. С. 95–110.
- [5] *Akchurin A.G., Akchurin G.G., Melnikov L.A.* Proc Inter. conf. Synchronization of chaotic and stochastic oscillations, SYNCHRO 2002. Saratov. P. 14.
- [6] *Ораевский А.Н.* // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 1996. Т. 4. № 1. С. 3–13.
- [7] *Lang R., Kobayashi K.* // *IEEE J. Quantum Electronics.* 1980. QE-16. P. 347–351.
- [8] *Mork J.* et al. // *IEEE J. Quantum Electronics.* 1992. QE-28. P. 93–97.
- [9] *Goedgebuer J.P.* et al. // *IEEE J. Quantum Electronics.* 1998. QE-34. P. 594–598.
- [10] *Рабинович М.И., Трубецков Д.И.* Введение в теорию колебаний и волн. М., 1984. 430 с.
- [11] *Берже П., Помо И., Видаль К.* Порядок в хаосе. М.: Мир, 1991. 364 с.
- [12] *Кузнецов С.П.* Динамический хаос М.: Физматлит, 2001. 296 с.
- [13] *Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Астахов В.В.* Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем. Саратов, 1999. 368 с.
- [14] *Акопов А.А., Вадивасова Т.Е., Астахов В.В.* и др. // *Изв. вузов. ПНД.* 2003. Т. 11. № 4–5. С. 66–73.
- [15] *Рюэль Д., Такенс Ф.* Странные аттракторы / Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 117 с.

- [16] *Акчурин Г.Г., Кристаллов А.Р., Мельников Л.А.* и др. *Обзоры по электронной технике. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника.* 1981. В. 4. С. 850.
- [17] *Акчурин Г.Г.* // Тез. докл. 10 Междунар. конф. по когерентной и нелинейной оптике. М., 1985. С. 32.
- [18] *Акчурин Г.Г., Акчурин А.Г.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 24. С. 56–62.