

ДИНАМИКА ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В.В. Якуткин¹

Представлены экспериментальные результаты исследования хаотической динамики оптической мощности оптоэлектронной системы, состоящей из одномодового, перестраиваемого по длине волны полупроводникового лазера, интерферометра Фабри-Перо и петли электронной запаздывающей обратной связи. Показано, что при увеличении коэффициента усиления в петле обратной связи система демонстрирует переход от одного стабильного состояния мощности к хаотической динамике через каскад бифуркаций удвоения периода колебаний.

Начиная с работы [1], где была предсказана возможность хаотического поведения оптической мощности в кольцевом резонаторе, опубликован ряд статей по исследованиям динамики оптоэлектронных систем с запаздывающей обратной связью. Были теоретически исследованы и экспериментально продемонстрированы регулярные и хаотические колебательные режимы, а также бифуркационные переходы в различных системах [2-6]. Но интерес исследователей к этой области не ослабевает. Так, в работе [5] предложена оригинальная система, содержащая лазерный источник, интерферометр Фабри-Перо и электронную запаздывающую обратную связь. Хаотическая динамика системы обусловлена запаздыванием и наличием нелинейности в обратной связи. Данная оптоэлектронная система особенно интересна тем, что может быть выполнена в интегральном виде и использована в качестве хаотического генератора оптических импульсов. Однако применение этой схемы для задач метрологии [7] и кодирования информации в волоконно-оптических линиях связи [8] затруднено из-за значительной стоимости высокочастотного интерферометра (резкость 200).

В данной работе рассматривается аналогичная система, использующая низкодобротный интерферометр Фабри-Перо (резкость 10). Это делает ее более доступной и менее дорогостоящей. Как будет показано ниже, такая система также способна генерировать хаотические колебания оптической мощности, а изменение коэффициента усиления в петле обратной связи качественно меняет динамику системы и позволяет получать разнообразные режимы генерации.

Схема экспериментальной установки системы представлена на рис.1,а. Поведение системы в приближении линейного участка ватт-амперной характеристики (рис.1,б)

¹Якуткин Владимир Владимирович, кафедра оптики и спектроскопии, Самарский государственный университет

и в области плавной перестройки длины волны излучения можно описать следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} P(t) &= P_0 - \alpha K \Phi(P(t - \tau), \lambda(t - \tau)), \\ \lambda(t) &= \lambda_0 - \beta K \Phi(P(t - \tau), \lambda(t - \tau)), \end{aligned}$$

где P_0 , λ_0 - оптическая мощность и длина волны излучения, соответствующие постоянному току накачки лазера I_0 ; α , β - коэффициенты пропорциональности (для данной схемы $\alpha=1,27$ и $\beta=0,067$ нм/мВт); Φ - функция пропускания интерферометра Фабри-Перо; τ , K - время задержки в петле обратной связи и коэффициент усиления, нормированный на максимально допустимое значение, при котором динамика системы развивается в пределах спектрального интервала плавной, без модовых скачков перестройки длины волны излучения. Конкретный вид функции пропускания зависит от конфигурации оптической схемы. В наших исследованиях, в противоположность [5], ширина линии генерации лазера намного меньше ширины резонанса интерферометра и можно воспользоваться приближением

$$\Phi(P, \lambda) = \frac{P}{1 + F \cdot \sin^2(\frac{2\pi L}{\lambda})}.$$

Здесь F , L - резкость и толщина интерферометра.

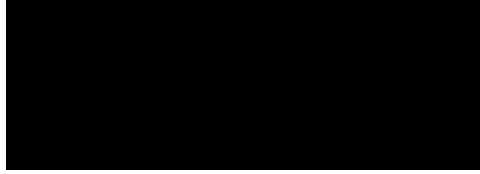


Рис.1. Схема экспериментальной установки (а): 1-встроенный фотодиод, 2-лазер, 3-микрообъектив, 4-интерферометр, 5-диафрагма, 6-фотодиод, 7-блок питания лазера, 8-усилитель, 9-задержка и характеристики системы (б): 1-ватт-амперная характеристика лазера, 2-пропускание интерферометра

В экспериментах использован одномодовый, квантово-размерный полупроводниковый лазер (НПО "ПОЛЮС"), излучающий в области 763 нм при максимальной мощности 5 мВт. На рис.1,б представлена его ватт-амперная характеристика. Спектральная ширина линии генерации лазера была оценена в 200 МГц при токе накачки 78 мА (пороговый ток равен 66 мА), длина волны излучения перестраивалась плавно с увеличением тока накачки от порога генерации вплоть до 83,7 мА, когда происходило переключение на следующую спектральную моду лазера. Резкость интерферометра Фабри-Перо составляла 10, толщина воздушного промежутка между зеркалами равнялась 1 мм. Для уменьшения мощности, возвращающейся обратно в лазер после отражения от интерферометра, излучение лазера с помощью микрообъектива ($f=20$ мм, $NA=0,4$) формировалось в слаборасходящийся пучок. С этой же целью интерферометр устанавливался под небольшим углом к оптической оси. Излучение, прошедшее через интерферометр, давало в плоскости диафрагмы (диаметр 0,5 мм) интерференционную картину в виде кольца. Сигнал, регистрируемый фотодиодом, усиливался малошумящим усилителем. Задержка в петле обратной связи

выполнялась программно с помощью пары 12-разрядных АЦП - ЦАП и была выбрана равной 1 мс. После задержки ток обратной связи вычитался из постоянного тока накачки лазера. Встроенный фотодиод служил для регистрации оптической мощности лазера.

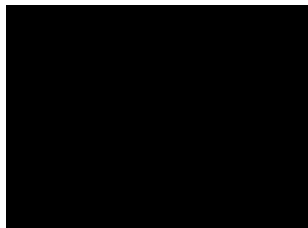


Рис.2. Диаграмма бифуркаций оптической мощности для $K=0,9$

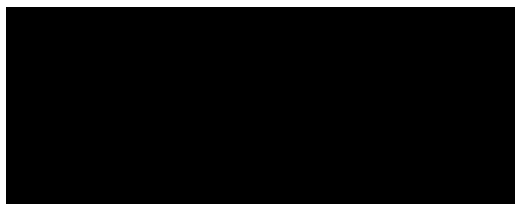


Рис.3. Зависимости оптической мощности от времени для $K=0,9$: а - $I_0=78,0$ мА; б - $I_0=80,0$ мА; в - $I_0=80,4$ мА; г - $I_0=81,0$ мА; д - $I_0=81,4$ мА; е - $I_0=81,6$ мА

В экспериментах регистрировалась зависимость оптической мощности от времени для различных значений постоянного тока накачки (отстройки длины волны излучения относительно максимума пропускания интерферометра). Экспериментальные зависимости оптической мощности от времени имеют почти идеальный вид, не искаженный присутствием релаксационных колебаний, благодаря тому, что время задержки намного превышает время реакции системы. Для каждого значения тока накачки записывалась последовательность длительностью $100 - 1000\tau$, затем по этим данным строились диаграммы бифуркаций, на которых точками отмечались экстремумы из зависимостей оптической мощности от времени. На рис.2 представлена диаграмма бифуркаций оптической мощности, отображающая развитие динамики системы при увеличении постоянного тока накачки для $K=0,9$. Начальный участок диаграммы повторяет ватт-амперную характеристику лазера. При токе накачки $I_0=75,6$ мА система проходит через первую точку бифуркации - развиваются ста-

бильные колебания оптической мощности с периодом 2τ (рис.3,а). При токе накачки $I_0=79,7$ мА система проходит вторую точку бифуркации - развиваются колебания с периодом 4τ (рис.3,б). При токе накачки $I_0=80,3$ мА еще можно зарегистрировать состояние с периодом 8τ , но следующие бифуркации уже не представляется возможным зарегистрировать, т. к. при $I_0=80,4$ мА система переходит в хаотический режим (рис.3,в). Далее из хаотического состояния синхронизуются стабильные колебания с периодом 3τ (рис.3,г), которые также впоследствии удваиваются (рис.3,д). При токе накачки $I_0=81,5$ мА начинается вторая хаотическая область (рис.3,е).



Рис.4. Диаграммы для различных значений коэффициента усиления в петле обратной связи: а - $K=0,20$; б - $K=0,23$; в - $K=0,25$; г - $K=0,30$; д - $K=0,40$; е - $K=0,45$

При дальнейшем увеличении постоянного тока накачки чередуются хаотические области и области с колебаниями низкой размерности 4τ , 5τ и т.д. При токе накачки $I_0=83,5$ мА длина волны излучения удаляется от максимума пропускания интерферометра настолько, что происходит срыв хаотических колебаний, зависимость оптической мощности от времени вновь становится однозначной.

Аналогичные диаграммы, характеризующие динамику системы, были записаны для различных коэффициентов усиления в петле обратной связи. На рис.4 представлены результаты экспериментов, позволяющие проследить, как меняется динамика системы с увеличением коэффициента усиления. Для $K = 0$ диаграмма совпадает с ватт-амперной характеристикой лазера. При дальнейшем увеличении усиления в области, близкой к интерференционному максимуму, проявляется прогиб, но зависимость все еще остается однозначной. Затем в этой области развивается бистабильное состояние, как показано на рис.4,а. Следует отметить, что максимальная амплитуда колебаний оптической мощности, наблюдаемая для бистабильных состояний при всех значениях K , соответствует настройке длины волны излучения на максимум пропускания интерферометра. На рис.4,б представлена диаграмма, в которой уже присутствует область колебаний с периодом 4τ . Далее в каждой из ветвей диаграммы развиваются хаотические области (рис.4,в). Они пересекаются и образуют единую хаотическую область, заключенную между прямым и обратным каскадами бифуркаций (рис.4,г). При $K = 0,30$ в хаотической области происходит слияние противоположных хаотических ветвей, и из хаоса синхронизируются колебания с периодом 3τ . При последующем увеличении коэффициента усиления в хаотической области диаграммы синхронизируются колебания с периодом 4τ (рис.4,д) и по-прежнему присутствует обратный каскад бифуркаций. Лишь при $K = 0,45$ обратный каскад разрушается (рис.4,е). Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приводит к небольшим изменениям в диаграмме бифуркаций оптической мощности - увеличиваются области колебаний с периодом 2τ , 3τ , 4τ , 5τ , 6τ ..., области колебаний с удвоенными периодами 4τ , 6τ , 8τ , 10τ , 12τ ..., а области хаотических колебаний уменьшаются (рис.2).

Таким образом, продемонстрирована возможность генерации хаотических колебаний в оптоэлектронной системе, состоящей из полупроводникового лазера, низкодобротного интерферометра Фабри-Перо и петли запаздывающей обратной связи. Впервые экспериментально показано, что характер динамики оптической мощности сильно зависит от коэффициента усиления в петле обратной связи - при увеличении коэффициента усиления система проходит через каскад бифуркаций удвоения периода. Это объясняется тем, что увеличение усиления повышает чувствительность системы к изменению начальных условий и, следовательно, усложняет динамику системы. Такое свойство, примененное к задачам метрологии, позволяет создавать датчики с чувствительностью, изменяемой в очень широких пределах. Исследуемая система также может найти применение в задачах кодирования информации при исполнении ее в виде малогабаритного интегрального модуля и уменьшении времени задержки до 0,4 нс, что позволит передавать данные со скоростью порядка 0,3 ГБит/с при высокой степени защищенности информации. Управление динамикой данной системы в этом случае может выполняться с помощью оптического сигнала, воздействующего на один из системных параметров. Кроме этого, система может быть использована в учебных целях для демонстрации бифуркации удвоения периода колебаний и для отработки методов управления хаосом.

Автор выражает благодарность С.П. Котовой, Х.Д. Ламажапову и А.К. Чернышову за ценные замечания, высказанные в ходе обсуждения работы.

Литература

- [1] Ikeda K. //Optics Comms. 1979. V.30. P.257.
- [2] Ohtsubo J., Liu Y. //Optics Letts. 1990. V.15. P.731.
- [3] Ohtsubo J., Liu Y. //Optics Comms. 1991. V.85. P.457.
- [4] Лайко Н.А., Самсон А.М. //Квантовая электроника. 1994. Т.21. С.713.
- [5] Takizawa T., Liu Y., Ohtsubo //IEEE J. Quantum Electron. 1994. V.30. P.334.
- [6] Goedgebuer J.-P. et. al. //IEEE J. Quantum Electron. 1998. V.34. P.594.
- [7] Воронов С.С. и др. //Измерительная техника. 1996. Т.12. С.16.
- [8] Parlitz U., Kocarev L. et. al. //Phys. Rev. E. 1996. V.53. P.4351.

OUTPUT POWER DYNAMICS OF LASER DIODE WITH NONLINEAR DELAYED FEEDBACK

V. Jakutkin²

An experimental results of investigating a chaotic system which consists of a single mode tunable laser diode, low fines Fabry-Perot interferometer and delayed electrical feedback loop are presented. It is shown that the increasing of gain coefficient in feedback loop lead to strong changes in system behavior – a chaotic state of output power through period – doubling bifurcation evolve from a single stationary state.

²Vladimir Jakutkin, departament of optics and spectroscopy, Samara state university