

Якуткин Владимир Владимирович

**ПОДАВЛЕНИЕ ХАОТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ, ВЫЗВАННОЙ
ВНЕШНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ В
ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ЛАЗЕРЕ**

01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Самара – 2003

Работа выполнена в Самарском государственном университете.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Котова Светлана Павловна.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Молевич Нонна Евгеньевна;
доктор физико-математических наук, профессор Гуреев Дмитрий Михайлович

Ведущая организация: Саратовский государственный университет, г. Саратов.

Защита состоится «3» октября 2003 года в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.218.01 при Самарском государственном
университете по адресу: 443011, Самара, ул. Ак. Павлова, 1, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского
государственного университета.

Автореферат разослан «28» сентября 2003 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В.А.Жукова

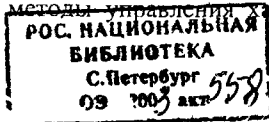
2003-А
13929

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Миниатюрные, малоинерционные, хорошо согласуемые с оптическим волокном инжекционные полупроводниковые лазеры широко применяются на практике для передачи и обработки информации, в CD/DVD устройствах и лазерных принтерах. Есть у полупроводниковых лазеров и другие, не столь известные, но не менее важные области применения: стандарты частоты, измерительная интерферометрия, голография, интегральная оптика, спектроскопия высокого разрешения, аналитическая химия. К лазерам, используемым в этих приложениях, предъявляются повышенные требования по стабильности генерации и когерентности излучения.

Отличительной особенностью инжекционных полупроводниковых лазеров является высокий коэффициент усиления. Это позволяет, с одной стороны, создавать устройства с высоким КПД и выходной мощностью до сотен милливатт при длине резонатора в сотни микрон, а с другой стороны, делает данный тип лазеров особенно чувствительным к внешнему возмущению. Изменение характеристик лазера под действием излучения, возвращающегося в активную область после отражения от внешнего элемента (зеркала, дифракционной решетки, деталей оптической схемы и т.д.), называют эффектом внешней оптической обратной связи (ВООС). Селективная оптическая обратная связь успешно используется для создания высококогерентных, перестраиваемых по длине волны излучения источников для спектроскопии и метрологии. В то же время, неселективная внешняя оптическая обратная связь может значительно ухудшить характеристики полупроводникового лазера. Возвращение в активную область лазера даже малой части излучения, отразившегося от внешних элементов оптической схемы, может привести к развитию хаотической генерации. Она проявляется в увеличении шумов оптической мощности и резком уширении спектра генерации, так называемом "коллапсе когерентности". Для устранения этого явления в оптические схемы включают изоляторы на основе фарадеевского вращения плоскости поляризации излучения. Они снижают уровень оптической мощности, возвращающейся в лазер. Однако, оптические изоляторы, обеспечивающие уровень развязки порядка 40дБ, относительно дороги, особенно для видимого диапазона спектра. В сине-зеленой области, где уже разработаны коммерчески доступные образцы лазеров, пока еще нет кристаллов, обладающих достаточно большим коэффициентом вращения плоскости поляризации в магнитном поле. Поэтому разработка метода подавления хаотической генерации, не зависящего от длины волны излучения, представляется актуальной.

Для подавления хаоса предложено использовать методы управления нелинейной динамикой с помощью малых возмущений параметров системы, развиваемые в последние десять лет. Отметим, что к началу работы над диссертацией рядом авторов были хорошо развиты алгоритмы по моделированию управления хаотической динамикой в различных системах, однако практические схемы были отработаны только на моделях и некоторых типах газовых и твердотельных лазеров со сравнительно низкочастотной динамикой. Практически отсутствовали устройства, реализующие методы управления хаосом для



быстродействующих систем, в том числе и для полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью.

Целью работы является разработка и реализация метода подавления хаотической генерации в полупроводниковом лазере, вызванной неселективной внешней оптической обратной связью, на основе исследования нелинейной динамики оптоэлектронных систем с запаздыванием.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие **основные задачи**:

- Исследование нелинейной динамики и методов управления хаосом на примере низкочастотной модельной системы - активного лазерного интерферометра.
- Определение условий подавления хаотических колебаний выходной мощности активного лазерного интерферометра.
- Выбор метода подавления хаоса, пригодного для быстродействующей системы – полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью.
- Определение методом численного моделирования условий подавления хаотической генерации в полупроводниковом лазере с внешней оптической обратной связью.
- Разработка устройства, реализующего метод подавления хаотических колебаний в полупроводниковом лазере с внешней оптической обратной связью и проверка эффективности его работы на практике.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

- Показана на примере активного лазерного интерферометра эффективность применения запаздывающей обратной связи не только для получения из хаоса стабильных периодических колебаний с периодом до десятков времен запаздывания, но и для подавления хаотических и периодических колебаний в широком диапазоне управляющих параметров.
- Экспериментально определены степень подавления и время подавления хаоса в активном лазерном интерферометре для трех видов управления.
- Рассчитаны оптимальные условия подавления хаоса в полупроводниковом лазере с внешней оптической обратной связью.
- Разработано устройство и экспериментально показана возможность подавления с его помощью хаотической генерации, вызванной внешней оптической обратной связью в полупроводниковом лазере.

Практическая ценность работы. Использование подавления хаотической генерации, вызванной внешней оптической обратной связью в полупроводниковом лазере, позволит создать лазерные системы, слабо чувствительные к паразитным внешним отражениям. Данный метод реализуется на основе оптоэлектронного блока достаточно простой конструкции и обеспечивает подавление хаотических колебаний оптической мощности в десятки раз и сужение спектра излучения до уровня свободной генерации. Блок подавления хаотических колебаний предназначен для лазеров, применяемых в таких областях, как стандарты частоты, измерительная интерферометрия, голография, спектроскопия высокого разрешения, аналитическая спектроскопия.

Результаты работы могут быть использованы для разработки аналогичного устройства на основе насыщающегося поглотителя или электрооптического модулятора, для подавления хаотической генерации в лазерах различных типов, а также для разработки устройства, интегрированного в лазерную структуру и повышающего устойчивость одночастотной генерации в присутствии случайных отражений. Аналогичное устройство может быть использовано для подавления хаотической генерации, вызванной инжекцией оптического сигнала в полупроводниковый лазер от внешнего источника.

Результаты исследований активного лазерного интерферометра могут использоваться для создания устройств кодирования информации, а также для демонстрации нелинейной динамики и методов управления хаосом при подготовке специалистов физических специальностей.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Результаты экспериментов, показывающие, что в активном лазерном интерферометре при увеличении усиления в петле обратной связи переход к хаосу осуществляется через каскад удвоения периода колебаний.
2. Хаос в активном лазерном интерферометре может быть подавлен с помощью пропорциональной запаздывающей обратной связи по начальным условиям, экспоненциальной запаздывающей обратной связи по коэффициенту усиления и обратной связи одновременно по двум параметрам. Степень подавления слабо зависит от вида управляющего сигнала. Время подавления минимально для одновременного управления по двум параметрам.
3. Для подавления хаоса в одномодовом полупроводниковом лазере с внешней оптической обратной связью предпочтительнее использовать пропорциональную запаздывающую обратную связь по току накачки лазера. Подавление хаоса достигается при следующих условиях настройки: глубина модуляции не превышает 2%; допуск на расстройку времени задержки в управляющей обратной связи менее 5%; запаздывание управляющего сигнала относительно оптического возмущения, вносимого внешним отражением, не более шести времен обхода внешнего резонатора; усиление в обоих плечах управляющей системы сбалансировано с допуском 10%; полоса пропускания управляющей системы в полтора раза больше обратной величины от времени прохода излучения до внешнего отражателя и обратно.
4. Экспериментальные результаты, демонстрирующие подавление хаотической генерации, вызванной неселективной внешней оптической обратной связью в AlGaAs/GaAs лазере квантоворазмерной структуры. При подавлении хаоса ширина спектра излучения уменьшается с 600 МГц до 80 МГц, шумы оптической мощности снижаются на 26 дБ.

Апробация работы: Основные результаты диссертационной работы докладывались на Второй Байкальской школе по фундаментальной физике (Иркутск, 1999), международной школе молодых учёных и студентов "Saratov Fall Meeting" (Саратов, 2000), международных конференциях "Laser Optics 2000", (Санкт-Петербург, 2000), "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" (Казань, 2000), LBOS6 (Мюнхен, 2001), ICONO 2001: Nonlinear Optical Phenomena and Nonlinear Dynamics of Optical Systems (Минск 2001), на научных

конференциях преподавателей и сотрудников Самарского государственного университета (1998, 1999, 2000 гг.), а также на научных семинарах Самарского филиала Физического института им. П.Н.Лебедева РАН.

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 7 научных работ.

Структура и объём работы:

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (123 наименования) и приложения, изложена на 119 страницах, содержит 51 рисунок и 1 таблицу.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертации, показаны научная новизна и практическая значимость работы, изложены защищаемые положения, описана структура диссертации.

Глава 1 – обзорно-аналитическая. В ней рассмотрены основные явления, наблюдаемые в полупроводниковом лазере с внешней оптической обратной связью. Наибольшее внимание уделено области хаотической генерации. Приведены основные понятия нелинейной динамики и дано описание двух методов стабилизации из хаоса периодических состояний системы с помощью малых возмущений управляющего параметра: пропорциональных изменениям показателя Ляпунова, вычисленного по временной серии, и пропорциональных изменению динамики системы за время запаздывания. На основании анализа литературы делаются следующие выводы. К полупроводниковому лазеру с внешней оптической обратной связью могут быть применены методы управления хаосом. Предпочтительнее исследовать метод непрерывной запаздывающей обратной связи, т.к. он применим к быстрым системам и не требует затрат времени на расчет управляющего сигнала. Исследование динамики можно проводить на модельной системе – активном лазерном интерферометре, в котором реализуется динамика аналогичная динамике лазера с внешней оптической обратной связью, но в низкочастотном диапазоне, более доступном для наблюдений.

Глава 2 посвящена исследованию динамики выходной мощности активного лазерного интерферометра, состоящего из одномодового полупроводникового лазера, низкодобротного резонатора Фабри-Перо и системы, реализующей оптоэлектронную обратную связь с запаздыванием (рис. 1а).

Поведение системы можно описать системой уравнений для выходной мощности и длины волны излучения:

$$\begin{cases} P(\tau) = P_0 - \alpha \cdot k \cdot \Phi(P(t-\tau), \lambda(t-\tau)) \\ \lambda(\tau) = \lambda_0 - \beta \cdot k \cdot \Phi(P(t-\tau), \lambda(t-\tau)), \end{cases} \quad (1) \quad \Phi(P, \lambda) = \frac{P}{1 + F \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}, \quad (2)$$

где P_0 , λ_0 – начальные условия: 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 резонатора Фабри-Перо (рис.1б); τ – время задержки в петле обратной связи, k – коэффициент усиления, нормированный на максимально допустимое значение, при котором динамика системы развивается в пределах

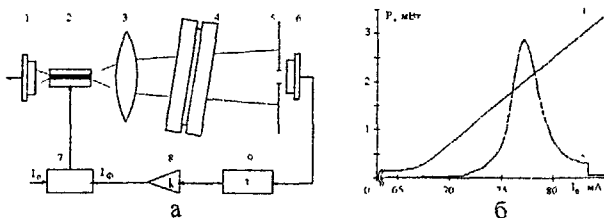


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а): 1-встроенный фотодиод, 2-лазер, 3-микрообъектив, 4-интерферометр, 5-диафрагма, 6-фотодиод, 7-блок питания лазера, 8-усилитель, 9-линия задержки; характеристики системы (б): 1-ватт-амперная характеристика лазера, 2-пропускание интерферометра.

спектрального интервала плавной, без модовых скачков перестройки длины волны излучения. В экспериментах ширина линии генерации лазера была намного меньше ширины резонанса пропускания, и можно было воспользоваться приближением (2), где F – резкость резонатора и d – толщина воздушного промежутка между зеркалами. Численное моделирование динамики системы показало, что в ней реализуются периодические колебания с периодом 2τ , 3τ , 4τ , 5τ , 6τ и колебания более высокой размерности. При изменении начальных условий система переходит к хаосу через каскад удвоения периода колебаний. На эксперименте регистрировались временные серии для различных начальных условий (рис. 2). Среди них были представлены все виды колебаний: периодические с периодом 2τ (рис. 2а), 4τ (рис. 2б), 3τ (рис. 2г), 6τ (рис. 2д) и более, а также хаотические (рис. 2в,е). Экспериментальные временные серии полностью совпадают с результатами численного моделирования. Как можно видеть из графиков в них отсутствуют переходные процессы, т.е. описание динамики системы разностными уравнениями справедливо. По экспериментальным временным сериям строились диаграммы бифуркаций (рис. 3) для различных значений усиления обратной связи.

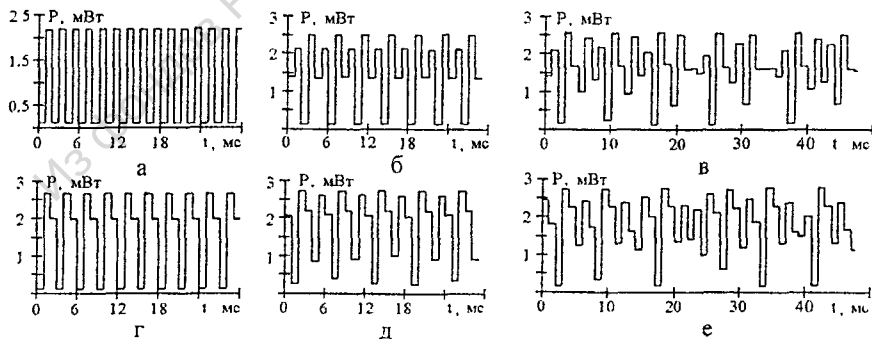


Рис. 2. Зависимости оптической мощности от времени для $k=1,0$: а - $I_0=78,0$ мА; б - $I_0=80,0$ мА; в - $I_0=80,4$ мА; г - $I_0=81,0$ мА; д - $I_0=81,4$ мА; е - $I_0=81,6$ мА.

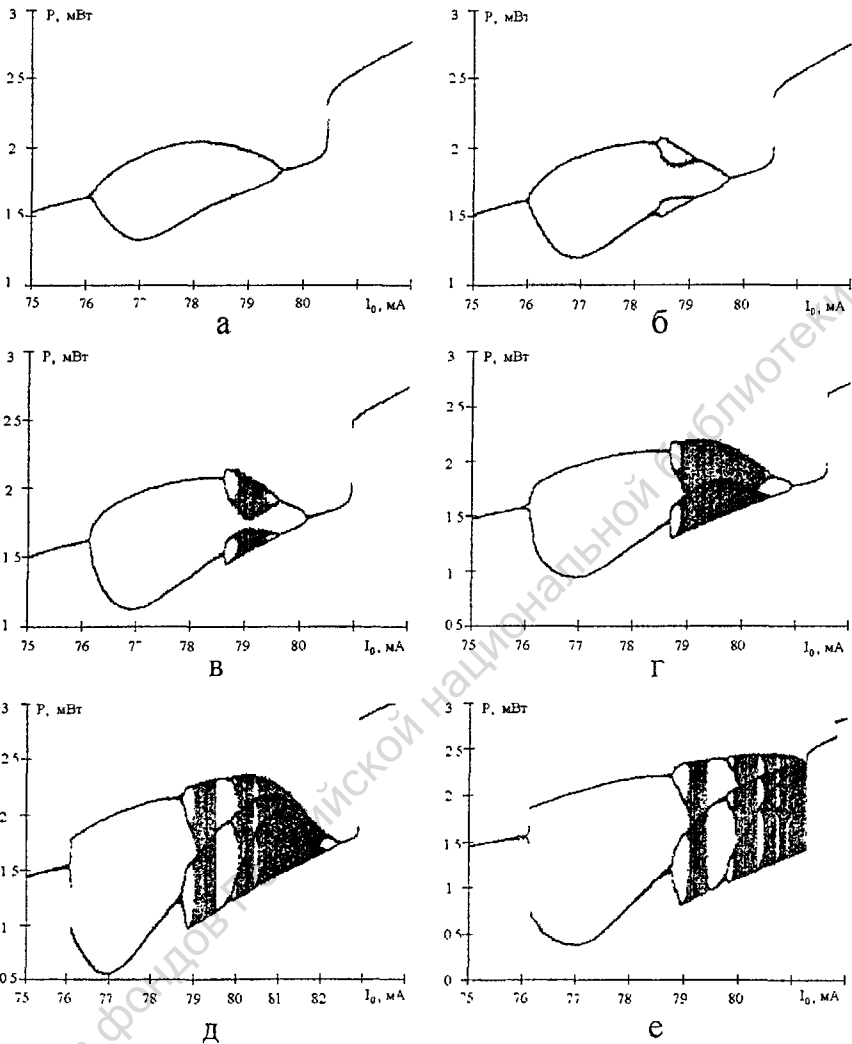


Рис. 3. Диаграммы для различных значений коэффициента усиления в петле обратной связи: а) $k=0,20$; б) $k=0,23$; в) $k=0,25$; г) $k=0,30$; д) $k=0,40$; е) $k=0,45$.

Видно, что динамика оптической мощности качественно изменяется при увеличении коэффициента усиления в петле обратной связи – система также проходит через каскад бифуркаций удвоения периода. Рассматриваемая оптоэлектронная система интересна тем, что является аналогом лазера с внешним резонатором. В ней нелинейность, обусловленная пропусканием интерферометра, может быть аппроксимирована квадратичной зависимостью аналогично зависимости, связывающей амплитуду лазерного поля и концен-

трацию носителей. Запаздывание в петле электронной обратной связи является аналогом времени кругового обхода внешнего резонатора, усиление в системе – аналогом уровня внешней оптической обратной связи. Аналогия динамики данной системы и поведения лазера с внешней оптической обратной связью, адекватное описание ее через разностные уравнения (1), наличие обширных областей хаоса и двух системных параметров позволяет обрабатывать на активном лазерном интерферометре методы управления хаосом.

Глава 3 посвящена исследованию условий управления хаосом с помощью запаздывающей обратной связи. Экспериментально зарегистрирована стабилизация из хаотических последовательностей колебаний с периодом до 32 времен запаздывания. Наибольшее внимание уделяется экспериментам по стабилизации состояния, соответствующего неподвижному фокусу на фазовой плоскости, т.е. подавлению хаотических колебаний. Рассматриваются три схемы подавления. В первой из них управляющий сигнал пропорциональный изменению выходной мощности за время запаздывания воздействует на начальные параметры системы. Во второй схеме сигнал, экспоненциально зависящий от изменения выходной мощности за время запаздывания, воздействует на коэффициент усиления. Третья схема использует управление одновременно по двум параметрам. Эквивалентная схема эксперимента представлена на рисунке 4, она реализована также как схема представленная на рисунке 1, но включает дополнительные цепи управляющих сигналов.

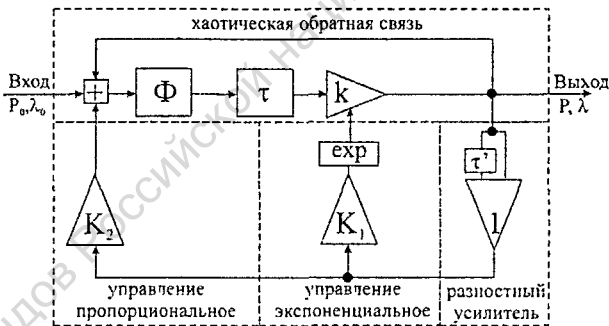


Рис. 4. Эквивалентная схема экспериментальной установки для исследования условий подавления хаоса в зависимости от вида управляющей ОС.

Поведение системы в этом случае можно описать разностными уравнениями для выходной мощности и длины волны излучения:

$$\begin{cases} P(t) = P_0 - \alpha \cdot k \cdot \exp(K_1 \cdot (P(t) - P(t - \tau'))) \cdot \Phi(P(t - \tau), \lambda(t - \tau)) + \alpha \cdot K_2 \cdot (P(t) - P(t - \tau')) \\ \lambda(t) = \lambda_0 - \beta \cdot k \cdot \exp(K_1 \cdot (P(t) - P(t - \tau'))) \cdot \Phi(P(t - \tau), \lambda(t - \tau)) + \beta \cdot K_2 \cdot (P(t) - P(t - \tau')), \end{cases} \quad (3)$$

где K_1, K_2 - коэффициенты при членах, отвечающих за управление хаосом; τ' - время задержки в управляющей петле обратной связи. Вид управляющих сигналов должен быть выбран так, чтобы соблюдалось условие малого возмущения динамики системы при их воздействии. Это означает, что при достижении желаемого результата слагаемое, отвечающее за линейную управ -

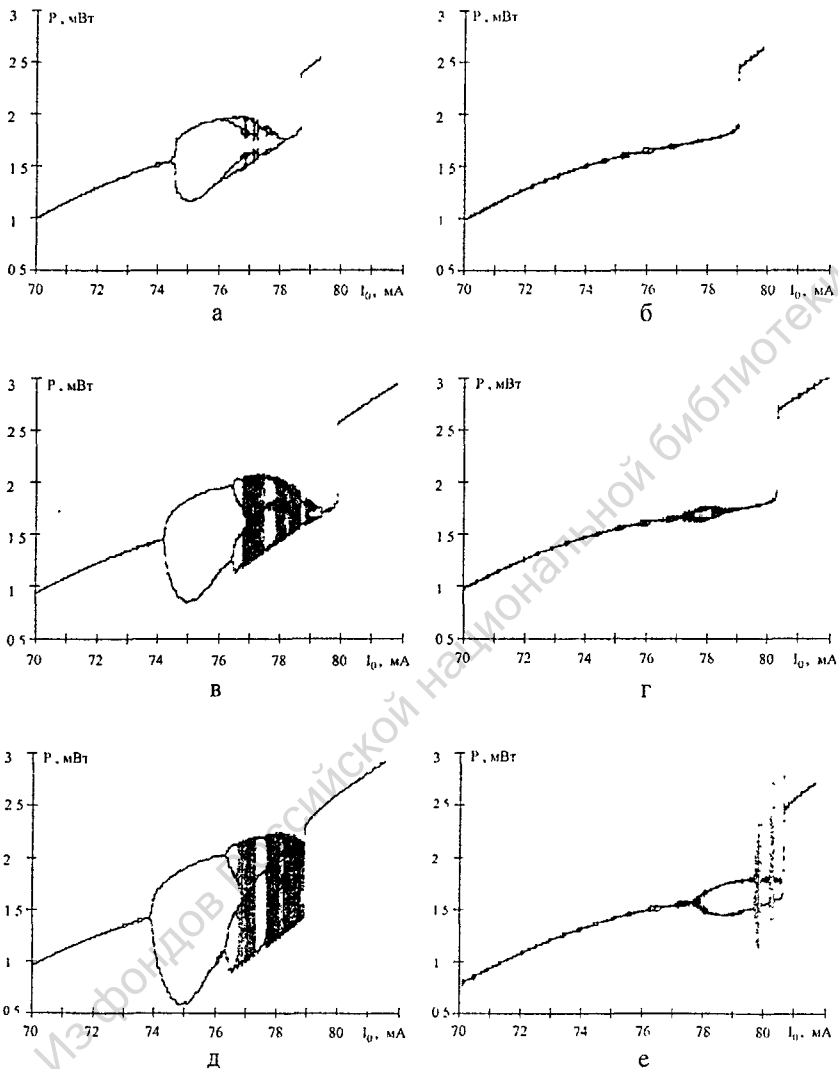


Рис. 5. Экспериментальные диаграммы бифуркаций для пропорционального подавления при различных уровнях усиления в петле хаотической обратной связи: а, б - $k=0,4$; в, г - $k=0,6$; д, е - $k=0,8$.

ляющую связь, стремится к нулю, а множитель, соответствующий экспоненциальной управляющей связи, стремится к единице. Численное моделирование показало, что хаотическая динамика оптической мощности активного лазерного интерферометра может быть подавлена с использованием малого управляющего сигнала, воздействующего на один из системных параметров.

Экспериментальные исследования подтвердили, что использование непрерывных возмущений позволяет стабилизировать состояние неподвижного фокуса не только из хаотических колебаний, но и из периодических колебаний. Вследствие этого при низких значениях усиления в хаотической обратной связи, когда динамика системы недостаточно развита (рис. 5а), достигается ее полное подавление (рис. 5б). С увеличением усиления в петле обратной связи и, следовательно, с ростом сложности динамики (рис. 5в,д), степень подавления уменьшается (рис. 5г,е). Выбор вида управляющей ОС слабо влияет на величину подавления хаоса. Время подавления определялось типом функциональной зависимости сигнала управления от оптической мощности. Оно значительно увеличивалось с ростом сложности динамики системы в случае пропорционального управления, слабо увеличивалось в экспоненциальном управлении, фактически не увеличивалось, и было минимально при смешанном управлении.

Наиболее важными параметрами, влияющими на условия подавления, являются коэффициенты, определяющие глубину модуляции K_1 , K_2 , и расстройка времени запаздывания в управляющих и хаотических цепях $(\tau - \tau')/\tau$. В условиях подавления быстрой динамики будут играть роль также аппаратная задержка и дисбаланс амплитуд сигналов в плечах дифференциального усилителя, вырабатывающего сигнал ошибки. Для подавления хаотической динамики лазера с внешней оптической обратной связью можно использовать пропорциональное управление в ток накачки и экспоненциальное управление по уровню обратной связи. Последний метод реализуется с помощью введения насыщающегося плотителя, что сложно выполнить в наших условиях. Пропорциональное управление по току накачки лазера предпочтительно, так как можно получить подавление хаотических и периодических колебаний со степенью подавления пусть немного ниже (на 20-25%), чем в случае управления по двум параметрам, но все же на достаточном уровне. Этот метод значительно легче реализуется на практике.

Глава 4 посвящена подавлению хаоса в лазере с внешней оптической обратной связью. В первом разделе приведены результаты численного моделирования подавления хаотических колебаний. Во втором разделе уточняется вид функциональной зависимости управляющего сигнала, определяются условия оптимального подавления. В заключительном разделе приведены результаты экспериментов, подтверждающие возможность подавления хаотической генерации в полупроводниковом лазере с внешней оптической обратной связью. На рисунке 6 схематически показан лазерный диод с внешней оптической обратной связью от плоского зеркала, имеющего коэффициент отражения r_1 . Амплитудные коэффициенты отражения собственных граней лазера принимаются одинаковыми, и равными r_0 . Внешнее зеркало, расположенное на расстоянии $L=c/2\tau$ от передней грани лазера, отражает излучение обратно, здесь τ – время кругового обхода. Внешнее зеркало и передняя грань лазера образуют составной резонатор, эффективное отражение которого зависит от фазы возвращающегося обратно излучения.

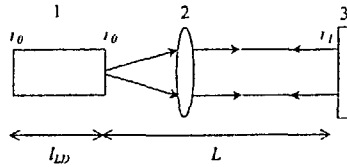


Рис. 6. Лазер с неселективной внешней оптической обратной связью: 1-лазер, 2-объектив, 3-внешний отражатель.

Моделирование динамики лазера с ВООС выполняется через систему скоростных уравнений для плотности носителей $N(t)$, амплитуды $E(t)$ и фазы $\Phi(t)$ электрического поля:

$$\begin{cases} \frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2} \left(G_N [N(t) - N_{th}] - \frac{1}{\tau_p} \right) \cdot E(t) + \frac{k}{\tau_m} E(t - \tau) \cdot \cos \Delta(t) + \frac{R_{sp}}{2VE(t)} + F_E(t) \\ \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} G_N [N(t) - N_{th}] + \frac{kE(t - \tau)}{\tau_m} \cdot \sin \Delta(t) + F_\Phi(t) \\ \frac{dN(t)}{dt} = J - \frac{N(t)}{\tau_s} - G_N [N(t) - N_{th}] \cdot |E(t)|^2 + F_N(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $\Delta(t) = \omega_0 t + \Phi(t) - \Phi(t - \tau)$. Величина R_{sp} описывает вклад спонтанной эмиссии, а случайные Ланжевеновские члены F_E , F_Φ , F_N вклад шумов в лазерную моду. Коэффициент обратной связи определяется выражением:

$$k = \chi \cdot (1 - r_0^2) \cdot r_l / r_0,$$

где величина χ отвечает за потери на распространение излучения вне лазера и эффективность согласования лазерной моды с модой, возвращающейся от внешнего отражателя. Для моделирования управляющего сигнала было модифицировано слагаемое, отвечающее за уровень накачки лазера, аналогично случаю пропорционального управления в активном лазерном интерферометре:

$$J = J_0 [1 - K(|E(t)|^2 - |E(t - \tau)|^2)],$$

где K – глубина модуляции и τ' – время запаздывания в оптоэлектронной петле обратной связи.

Задача численного моделирования состояла в оценке возможности использования непрерывной запаздывающей обратной связи для подавления хаотической генерации. Поэтому выбиралось $\tau' = \tau$ и рассчитывались зависимости от времени для плотности носителей $N(t)$, амплитуды $E(t)$ и фазы $\Phi(t)$ электрического поля на выходе лазера. Затем по этим данным строились диаграммы бифуркаций и вычислялись: $RIN(f)$ – относительная интенсивность шумов оптической мощности в радиочастотной области; \overline{RIN} – средняя интенсивность шума в полосе частот 1МГц ÷ 5ГГц; спектры генерации лазера. Подавление шумов интенсивности, наведенных внешней оптической обратной связью, обеспечивается во всей полосе частот по уровню ≈ 75 дБ (рис. 7), фазовые шумы и шумы концентрации носителей подавляются соответственно.

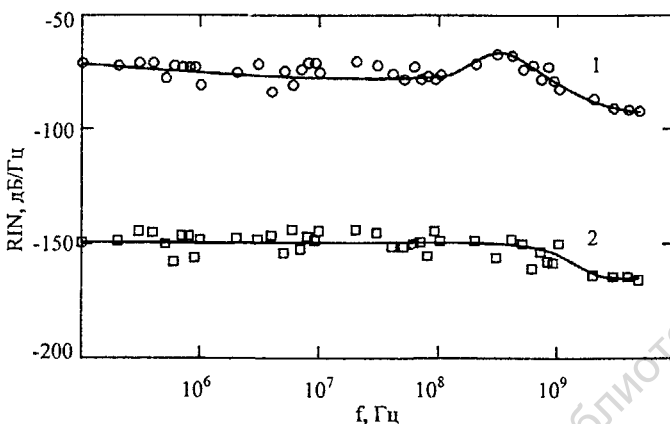


Рис. 7. Спектр шумов оптической мощности лазера, соответствующий режиму коллапса когерентности при $L=1\text{ м}$, $r_1=1$, $k=2 \cdot 10^{-2}$: 1) без ОС и 2) с управляющей ОС при $K=5 \cdot 10^{-3}$.

При уровнях оптической обратной связи ниже критического шумов лазера совпадали в обоих случаях, как без ОС, так и с управляющей ОС. Уровень их средней интенсивности шумов равен -180 дБ/Гц и соответствует свободной генерации лазера (рис. 8). Развитие хаотической генерации приводит к возрастанию шумов до уровня -75 дБ/Гц. Включение подавляющей обратной связи обеспечивает снижение шумов до -150 дБ/Гц. Глубина модуляции управляющей ОС, равная $5 \cdot 10^{-3}$, надежно обеспечивает подавление хаоса во всем диапазоне уровней ВОС вплоть до $k=0.1$. Большие значения уровня оптической обратной связи не рассматриваются, т.к. эффекты, связанные с ними, не могут быть описаны в рамках используемого приближения.

Средняя интенсивность шумов служила параметром, по которому определяется эффективность работы управляющей ОС. Было показано, что исследуемая система менее чувствительна к изменению глубины модуляции, чем ее аналог – активный интерферометр. Даже для небольших значений ($5 \cdot 10^{-4}$) управляющего сигнала наблюдалось существенное подавление шумов оптической мощности. Максимальное подавление достигалось при значениях глубины модуляции порядка 10^{-2} , т.е. условие малости воздействия управляющей ОС выполнялось. Дальнейшее увеличение воздействия приводит к срыву подавления. Отметим, что полное подавление шумов оптической мощности и частоты генерации до уровня, соответствующего лазерной генерации в свободном режиме, не достигается даже при максимальной глубине модуляции. Это связано с возмущениями, которые вносит управляющая ОС в ток накачки лазера и передачей их в оптическую мощность и частоту излучения. Оптимальным является значение глубины модуляции $5 \cdot 10^{-3}$. Выбранная величина приходится примерно на середину диапазона стабильности и менее всего нуждается в корректировке при изменении других параметров системы.

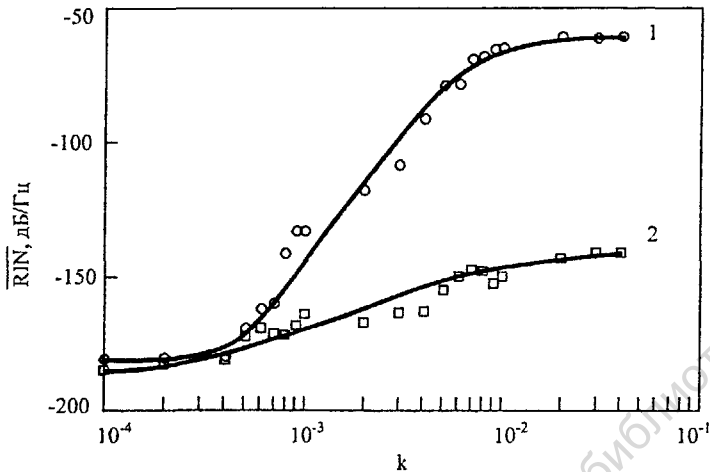


Рис. 8. Зависимость средней интенсивности шумов от уровня обратной связи k при $L=1\text{м}$, $r_1=1$: 1) без и 2) с управляющей ОС при $K=5 \cdot 10^{-3}$.

Учет особенностей реальной системы накладывает дополнительные условия на вид управляющего сигнала. В первую очередь, так же, как и для модельной системы, необходимо оценить точность задания времени задержки в петле управляющей ОС. Из расчетов зависимости среднего уровня шумов от расстройки $(\tau - \tau')/\tau$ было получено, что для $L=1\text{м}$ допуск составляет 5%. При неправильной настройке запаздывания подавление шумов не достигается. Следующим приближением к реальной системе управления был учет аппаратного запаздывания в электронной схеме управления, а также малого коэффициента отражения внешнего зеркала ($r_1 < 1$). Это влечет за собой необходимость выравнивать амплитуды сигналов на входе усилителя ошибки. Таким образом, наиболее приближенный к реальности управляющий член должен иметь вид:

$$J = J_0 [1 - K(|E(t - \delta)|^2 - |E(t - \tau' - \delta')|^2 / r_2^2)], \quad (5)$$

где $1/r_2^2$ – коэффициент усиления в плече, регистрирующем изменение оптической мощности, возвращающейся от внешнего отражателя; δ и δ' – время запаздывания в электронной схеме управления. Расчет зависимости \overline{RIN} от дисбаланса амплитуд r_2/r_1 и от аппаратной задержки показали, что подавление хаоса достигается при следующих условиях. Коэффициент усиления необходимо настроить с допуском 10% и установить времена запаздывания в электронной схеме управления примерно одинаковыми и кратными удвоенному запаздыванию в составном резонаторе. Так же, как и в случае с запаздыванием, неправильная настройка коэффициентов усиления может привести не к подавлению, а к росту шумов (расстройка амплитуд r_2/r_1 более, чем в 10 раз приводит к возрастанию шумов еще на 10 дБ/Гц над уровнем соответствующим ВООС).

На рисунке 9 показаны зависимости оптической мощности от времени и спектры излучения лазера, рассчитанные для условий максимально прибли-

женных к экспериментальным: $L=1\text{м}$, $(\tau-\tau')/\tau=-2\%$, $r_1=2\cdot 10^{-1}$, $r_2=5\cdot 10^{-2}$, $\delta/\tau=2,020$, $\delta'/\tau=2,025$, $\Delta f=1\text{МГц} \div 500\text{МГц}$, $k=2\cdot 10^{-2}$, $K=5\cdot 10^{-3}$.

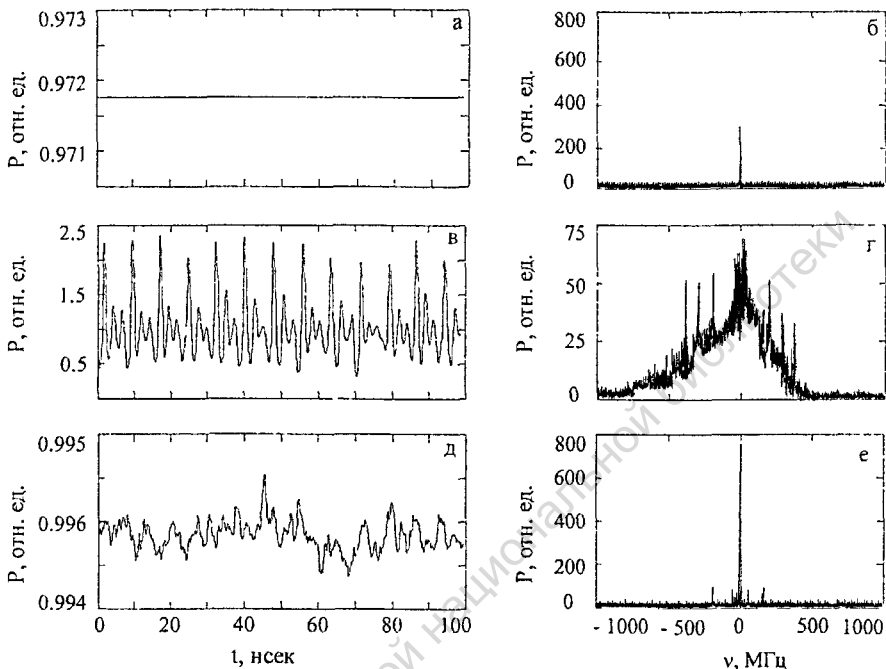


Рис. 9. Расчетные зависимости оптической мощности от времени и спектры излучения лазера в режимах: а, б - свободной генерации; в, г - хаотической генерации при оптической обратной связи; д, е - подавления хаоса.

При свободной генерации шумы амплитуды и фазы электрического поля определяются релаксационными колебаниями и вкладом спонтанной эмиссии в лазерную моду, среднее значение шумов оптической мощности $\approx -180\text{дБ/Гц}$, ширина спектра излучения порядка 5МГц (рис.9а,б). Введение оптической обратной связи приводит к развитию хаотической генерации, среднее значение шумов оптической мощности увеличивается до $\approx -75\text{дБ/Гц}$, ширина спектра излучения катастрофически уширяется до 1Гц (рис.9в,г). Использование непрерывной запаздывающей оптоэлектронной обратной связи по току накачки лазера дает возможность снизить среднее значение шумов оптической мощности до $\approx -150\text{дБ/Гц}$ и сузить линию генерации до 30МГц (рис.9д.е).

Для проверки результатов моделирования была собрана экспериментальная установка (рис. 10) с блоком подавления хаоса, разработанным на основе проведенных исследований и реализующим запаздывающую обратную связь по току накачки пропорциональную изменению оптической мощности за время прохода излучения до внешнего отражателя и обратно (5). Эксперимент проводился на AlGaAs/GaAs лазере (765нм , 5мВт) квантоворазмерной структуры,

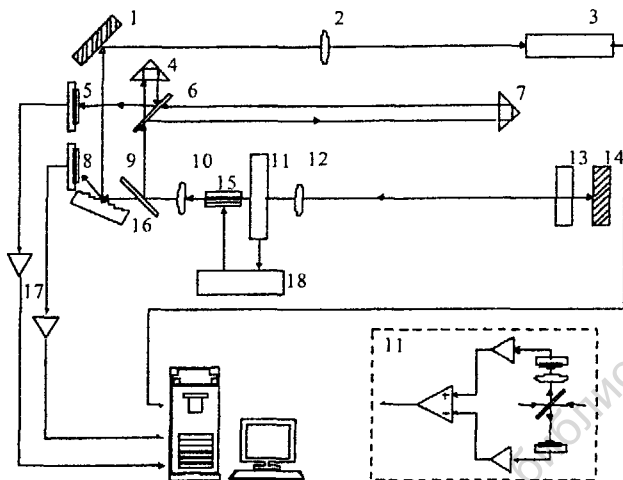


Рис. 10. Схема экспериментальной установки: 1, 14 - плоские зеркала; 2, 10, 12 - объективы; 3 - ПЗС линейка; 4, 7 - призмы; 5, 8 - фотодиоды; 6, 9 - делительные пластинки; 11 - опто-электронный блок подавления хаоса; 13 - перестраиваемый ослабитель; 15 - полупроводниковый лазер; 16 - дифракционная решетка; 17 - преобразователи фототока в напряжение; 18 - блок управления током и температурой лазера.

изготовленном по MOCVD технологии. В качестве внешнего отражателя использовалось плоское алюминиевое зеркало, установленное на расстоянии 1 м от лазера. Для получения хаотической генерации уровень ВООС регулировался нейтральным светофильтром. Излучение с задней грани лазера направлялось на дифракционную решетку 600 штр/мм и в интерферометр. Второй порядок дифракции фокусировался на ПЗС линейку для регистрации спектра продольных мод лазера. Непосредственно измерить ширину этого спектра не представлялось возможным, для ее оценки использовался интерферометр Майкельсона.

Между передней гранью лазера и объективом устанавливался оптоэлектронный блок подавления, состоящий из делительной пластинки, микролинзы, двух лавинных фотоприемников и дифференциального усилителя, работающего в полосе 20-300 МГц. Сигнал с первого лавинного фотодиода был пропорционален оптической мощности $P(t-\delta)$, со второго $\sim P(t-\tau'-\delta)/r_2^2$, сигнал на выходе дифференциального усилителя соответствовал изменению оптической мощности за время прохода излучения до внешнего зеркала и обратно. Этот сигнал суммировался в блоке питания с постоянным током накачки лазера. Амплитуда управляющей ОС составляла $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-4}$ от постоянного уровня накачки (≈ 100 мА), время задержки и усиление в каждом из плеч подбирались из условий минимального возмущения лазера в отсутствии внешнего отражения и оптимального подавления шумов оптической мощности при его наличии.

Для Лоренцевой формы спектра излучения видность интерференционной

картины определяется выражением $V = V_0 \exp(-X/X_0)$. Из измерений, с помощью интерферометра Майкельсона, функции видности (рис. 11а) определялась длина когерентности X_0 . Для режима свободной генерации она составляла 1.91м, при внешней оптической обратной связи уменьшалась до 0.16м и при подавлении хаотической генерации достигала 1.19м. В свою очередь, длина когерентности связана с полной шириной спектра излучения по половине интенсивности следующим выражением $\Delta\nu = c/\pi X_0$. Это позволяет нам оценить ширину спектра генерации для результатов эксперимента. В режиме свободной генерации, когда внешняя оптическая обратная связь отсутствует, а электронная подавляющая обратная связь отключена, максимальная амплитуда шумов оптической мощности составляет несколько микроватт, а в спектре продольных мод преобладает одна мода, превышающая соседние на 30 дБ и имеющая ширину не более 50МГц. При наличии неселективной внешней оптической обратной связи шумы оптической мощности возрастают до десятков микроватт (рис. 11б), в спектре продольных мод также преобладает одна мода, но ее спектральная ширина превышает 600МГц, то есть лазер работает в режиме “коллапса когерентности”. Оптимальным образом подобранная электронная обратная связь приводит к сокращению шумов оптической мощности на 26 дБ (рис. 11в), ширина спектра излучения сужается практически до исходного значения 80МГц и превышение основной моды над соседними составляет 40 дБ.

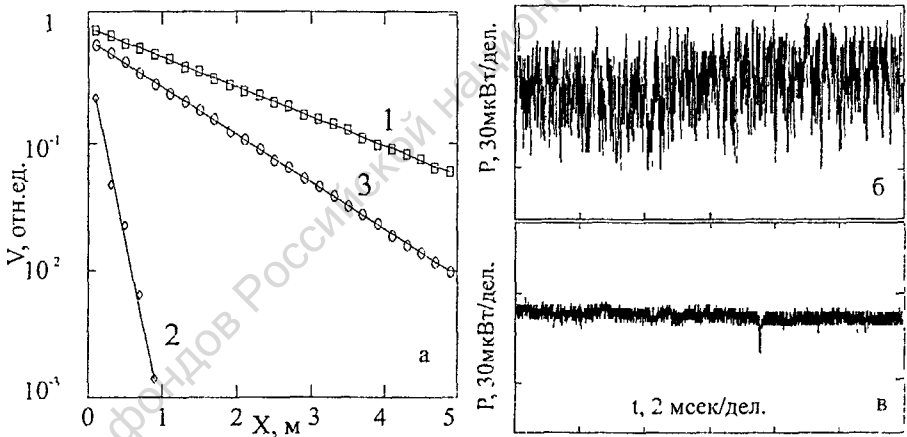


Рис. 11. Экспериментальные зависимости: а) видности от величины фазовой задержки для свободной генерации (1), хаотической генерации при оптической обратной связи (2), подавления хаоса (3); б), в) оптической мощности от времени в режиме хаотической генерации и подавления хаоса.

Таким образом, в заключительной главе с помощью численного моделирования определены условия оптимального подавления и экспериментально показана возможность подавления хаотической генерации полупроводникового лазера с неселективной оптической обратной связью с помощью непрерывной запаздывающей оптоэлектронной обратной связи по току накачки. Для реали-

зации метода разработан блок подавления хаоса и найден алгоритм его настройки. Использование методов управления хаосом для подавления хаотической генерации, вызванной внешней оптической обратной связью в полупроводниковом лазере, позволит создавать лазерные системы слабо чувствительные к паразитным внешним отражениям. Достоинством предлагаемого метода является независимость от длины волны излучения. Метод реализуется на основе оптоэлектронного блока достаточно простой конструкции и обеспечивает подавление хаотических колебаний оптической мощности в десятки раз и сужение спектра излучения до уровня свободной генерации.

Следует отметить некоторые особенности предлагаемой системы. Блок подавления помещается очень близко к лазеру. Такое требование накладывает на время запаздывания в петле управляющей обратной связи должно быть равно времени прохода излучения до внешнего отражателя и обратно с точностью 5%. В противном случае вместо подавления хаоса можем получить его усиление, как было показано при моделировании системы. Первичная балансировка системы подавления относительно проста, а ее работа эффективна на расстояниях более 0,15 м. Меньшие расстояния до внешнего отражателя также могут быть реализованы, но это влечет за собой усложнение и удорожание высокочастотной электроники. Система способна автоматически настраиваться на подавление максимального возмущения при множественных внешних отражениях. Влияние системы подавления на характеристики лазера пренебрежимо мало - при подавлении хаоса амплитуда управляющего сигнала стремится к нулю. Оптический способ задания времени запаздывания обеспечивает дополнительную гибкость системы подавления, при изменении расстояния до внешнего отражателя в пределах 5% автоматически изменяется время задержки.

Заключение.

Основные результаты и выводы работы состоят в следующем:

1. С помощью численного моделирования и экспериментально показано, что в активном лазерном интерферометре, состоящем из резонатора Фабри-Перо, полупроводникового лазера и системы, обеспечивающей обратную связь с запаздыванием, наблюдается хаотическая динамика для широкого диапазона параметров. Переход к хаосу осуществляется через каскад удвоения периода колебаний как по начальным условиям, так и коэффициенту усиления в петле обратной связи.
2. Для управления хаотическими колебаниями в активном лазерном интерферометре применен метод непрерывной запаздывающей обратной связи. Исследованы три схемы подавления хаоса: по начальным условиям, по коэффициенту усиления в петле обратной связи и комбинированный метод управления одновременно по двум системным параметрам. Экспериментально получено подавление хаоса и стабилизация из хаоса колебаний с периодом до 32 времен задержки включительно. Вид управляющей обратной связи слабо влияет на степень подавления хаоса. Минимальное время подавления получено для метода одновременного управления по двум параметрам. Однако, пропорциональная запаздывающая обратная связь является предпочтительной, так как легче

реализуется на практике и обеспечивает подавление в большом диапазоне системных параметров.

3. Показано, что при настройке на оптимальное подавление нужно учитывать следующие условия: глубина модуляции управляющей обратной связи должна быть много меньше единицы; расстройка времени запаздывания в управляющих и хаотических цепях не должна превышать нескольких процентов; аппаратная задержка и усиление в цепях усилителя ошибки должны быть настроены так, чтобы управляющий сигнал стремился к нулю при стабилизации выбранного состояния.

4. На основе результатов, полученных на модельной системе, предложено использовать метод пропорциональной запаздывающей обратной связи по току накачки для подавления хаоса в полупроводниковом лазере с внешней оптической обратной связью. С помощью численного моделирования найдены оптимальные условия, при которых реализуется подавление хаоса: глубина модуляции тока накачки управляющим сигналом должна равняться $5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$; допуск на расстройку времени задержки в управляющей обратной связи не должен превышать 5%; запаздывание управляющего сигнала относительно оптического возмущения, вносимого внешним отражением, не должно превышать шести времен обхода внешнего резонатора; усиление в обоих плечах управляющей системы должно быть сбалансировано с допуском 10%; полоса пропускания управляющей системы должна превышать обратную величину от времени обхода внешнего резонатора в полтора раза.

5. Предложено и реализовано устройство для подавления хаотической генерации в полупроводниковом лазере. Устройство основано на непрерывной запаздывающей обратной связи пропорциональной изменению оптической мощности на выходе лазера за время прохода излучения до внешнего отражателя и обратно. Получены результаты экспериментов, демонстрирующие эффективность подавления хаоса с помощью предложенного устройства. При включении подавления ширина спектра излучения уменьшается с 600 МГц до 80 МГц, при этом шумы оптической мощности снижаются на 26 дБ.

Основное содержание диссертации отражено в публикациях:

1. S.P. Kotova, V.V. Yakutkin. "Suppression of chaotic generation caused by the external optical feedback in a laser diode" Journal of Russian Laser Research, 24, №2, 2003, p.95-107.
2. С.П. Котова, В.В. Якуткин "Подавление хаотической генерации, вызванной оптической обратной связью в полупроводниковом лазере" Препринт ФИАН, № 11, 2003.
3. S.P. Kotova, V.V. Yakutkin. "Suppression of chaos in a laser diode with an external optical feedback" ICONO 2001: Nonlinear Optical Phenomena and Nonlinear Dynamics of Optical Systems: Proc. SPIE Vol. 4751, pp.499-502, 2002.
4. V.V. Yakutkin, S.P. Kotova, H.D. Lamaghapov, "Delayed feedback control of the chaotic dynamics of the optoelectronic system with a laser diode", Proceedings of SPIE "Control of Laser Beam Characteristics and Nonlinear Methods for Wavefront Control", "Laser Optics 2000", Proc. SPIE Vol. 4353, pp. 344-351, 2001.

2002-А
13929 № 13929

5. В.В. Якуткин, С.П. Котова "Подавление хаоса в полупроводниковом лазере с неселективной внешней оптической обратной связью", сборник статей «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия», Казань, 2000, стр.97-101.
6. В. В. Якуткин, С. П. Котова. "Управление хаотическими колебаниями оптической мощности полупроводникового лазера с нелинейной запаздывающей обратной связью" Материалы второй Байкальской научной школы по фундаментальной физике "Взаимодействие полей и излучений с веществом", Иркутск, 1999, стр.224-228.
7. В.В. Якуткин "Динамика оптической мощности полупроводникового лазера с нелинейной запаздывающей обратной связью" Самара, Вестник СамГУ, №2(12), 1999, стр.103-108.

Из фондов Российской национальной библиотеки

Подписано в печать «30» июня 2003г.

Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Печать оперативная.

Объем 1, 0 печ.л. Тираж 100 экз. Заказ №69.

443011, г.Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

Отпечатано ООО «Универс-Групп»