

06; 07; 12

© 1990 г.

ВЛИЯНИЕ МУЛЬТИСТАБИЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НА НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ШУМЫ В ИНЖЕКЦИОННОМ ЛАЗЕРЕ С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

М. А. Кош, Э. М. Рабинович

Приводятся результаты экспериментального исследования низкочастотных шумов интенсивности излучения в мультстабильной системе с запаздывающей обратной связью, которые обусловлены переключениями системы из одного стационарного состояния в другое. Выявлены возможные причины указанных переключений. Дается теоретическое обоснование результатов эксперимента.

Введение

В последние годы заметно повысился интерес к изучению свойств излучения полупроводниковых лазеров с оптической обратной связью, осуществляемой с помощью внешнего зеркала [1-5]. Это связано с перспективой широкого применения таких лазеров и создания на их основе автодинных измерительных систем, а также с тем, что при использовании оптической обратной связи возможно эффективное управление характеристиками лазерного излучения (получение одночастотного режима, уменьшение ширины линии излучения и др.).

Наряду с этим известно, что в инжекционном лазере с оптической обратной связью могут иметь место бистабильные и мультстабильные режимы генерации [2, 3, 5]. В работе [6] было отмечено, что при значении параметра обратной связи $C=1$ было зарегистрировано резкое увеличение уровня низкочастотного шума интенсивности излучения, что связано с влиянием бистабильного режима генерации и переключением из одного стационарного состояния в другое. Несмотря на важность обнаруженного источника флуктуаций интенсивности, до настоящего времени не были проанализированы основные свойства шумового сигнала и причины, приводящие к переключению между стационарными состояниями. В связи с этим в данной работе была предпринята попытка экспериментального исследования влияния указанных режимов генерации на низкочастотные шумы в полупроводниковом лазере с запаздывающей оптической обратной связью.

1. Описание экспериментальной установки. Результаты экспериментальных исследований

Излучение полупроводникового лазера с заращенной мезаполосковой гетероструктурой и длиной резонатора ~ 200 мкм, изготовленного на основе InGaAsP/InP ($\lambda=1.3$ мкм), направлялось на металлическое зеркало, расположенное на расстоянии 6—8 мм от излучателя. Зеркало было установлено на пьезокерамическом двигателе, что позволяло плавно регулировать расстояние между лазером и отражателем в пределах длины волны излучения. Между лазером и зеркалом располагалась согласующая микролинза, изменение положения которой по отношению к зеркалу позволяло регулировать коэффициент обратной связи. Излучение, выходящее из второй торцевой грани лазера, поступало на германиевый PIN диод, сигнал с которого направлялся на два осциллографа типа С1-64

и С1-69 и анализатор спектра типа СК4-58. Для более полного анализа наблюдаемых флуктуаций наряду со спектром и временной реализацией сигнала с помощью осциллографа типа С1-64 регистрировалась также проекция фазового портрета. Для обеспечения возможности наблюдения проекции фазового портрета в канал X осциллографа была включена линия задержки.

Для контроля формы сигнала в токе инжекции полупроводникового лазера соответствующий сигнал подавался на второй луч двухлучевого осциллографа типа С1-69. Таким образом, на экране осциллографа можно было одновременно наблюдать форму сигнала, соответствующего флуктуациям интенсивности и тока инжекции лазера.

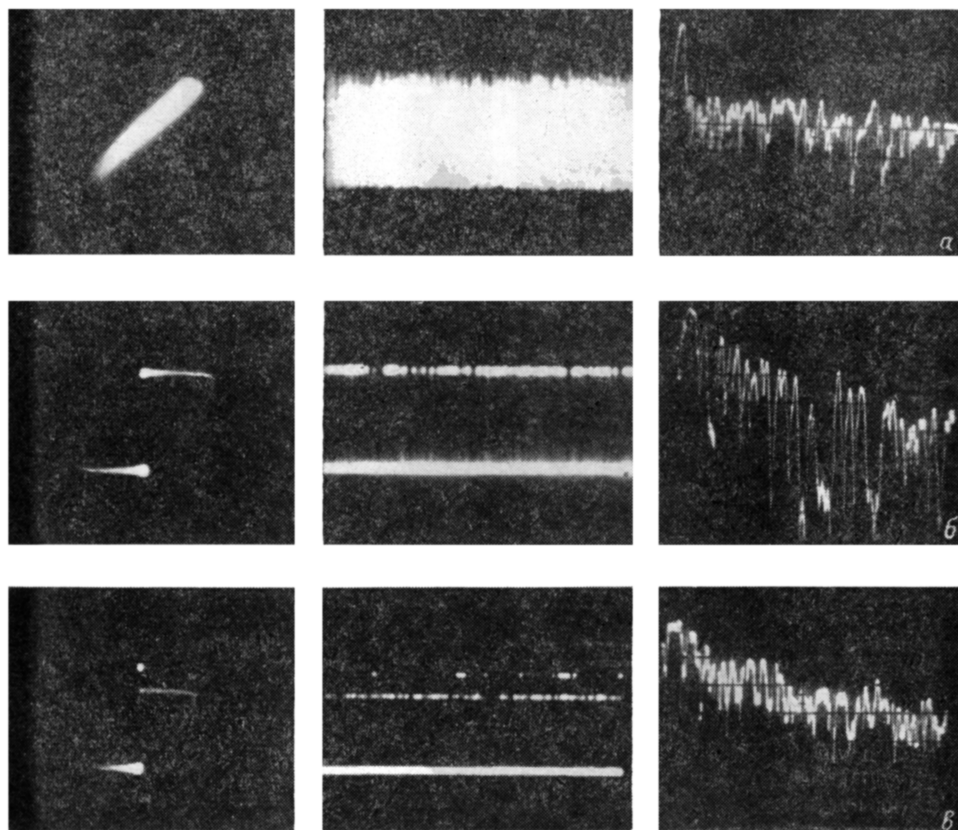


Рис. 1. Проекция фазового портрета, временная реализация и спектр флуктуаций интенсивности излучения.

Развертка осциллографа 0,5 мс/дел., развертка анализатора спектра 20 кГц/дел., шкала логарифмическая.

В установке предусматривалась также возможность модуляции тока инжекции и модуляция расстояния между лазером и зеркалом с помощью гармонического напряжения, подаваемого на пьезокерамический двигатель.

На рис. 1, а—в слева направо представлены проекция фазового портрета, временная реализация и спектр интенсивности излучения (движение от а к в соответствует увеличению коэффициента обратной связи), соответствующие типичным флуктуациям, наблюдаемым в системе.

Из рис. 1, а видно, что возможны флуктуации, соответствующие высокочастотным переключениям в системе с равномерным спектром в диапазоне частот 0—600 кГц и фазовым портретом в виде размытого «облака». Видно, что в данном случае система «не задерживается» в каком-либо стационарном состоянии.

Из рис. 1, б, соответствующего большему значению коэффициента обратной связи, видно, что переключения из одного стационарного состояния в другое

происходят реже, чем на рис. 1, а, амплитуда спектральных составляющих существенно уменьшается с ростом частоты уже в диапазоне 0—200 кГц. Для этих флуктуаций имеет место фазовый портрет, содержащий две яркие неподвижные точки, соответствующие двум стационарным состояниям системы.

Дальнейшее увеличение коэффициента обратной связи может привести к возникновению мультистабильных режимов генерации (рис. 1, в), для которых характерно наличие нескольких неподвижных точек на проекции фазового портрета и нескольких систем фазовых траекторий. Амплитуда спектральных

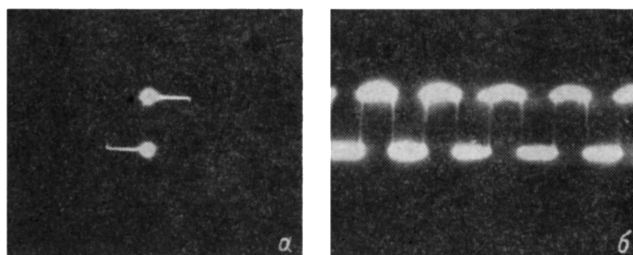


Рис. 2. Вынужденное переключение из одного стационарного состояния в другое, возникающее при гармонической модуляции расстояния между лазером и зеркалом.

а — проекция фазового портрета на заданную плоскость, б — зависимость интенсивности от времени.

составляющих (как и на рис. 1, б) существенно уменьшается с ростом частоты уже в диапазоне 0—200 кГц. Во временной реализации сигнала четко прослеживаются два режима переключения между различными стационарными состояниями.

С целью выяснения причин, приводящих к переключению из одного стационарного состояния в другое, в рассматриваемой системе осуществлялась модуляция времени задержки оптического сигнала, возникающая при гармонической модуляции расстояния между лазером и зеркалом. Для этого на пьезокерамический двигатель подавалось гармоническое напряжение звуковой или ультразвуковой частоты 20 Гц—200 кГц, обеспечивающее амплитуду модуляции порядка $\lambda/2$. При этом было установлено, что модуляция времени задержки

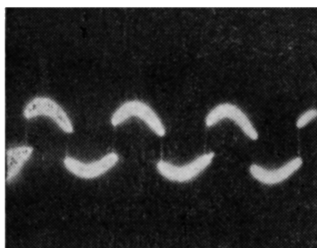


Рис. 3. Вынужденное переключение из одного стационарного состояния в другое, возникающее при гармонической модуляции тока инжекции лазера (временная зависимость интенсивности).

оптического сигнала может приводить к переключению из состояния в состояние. Такое вынужденное переключение иллюстрируется на рис. 2, а, б. Видно, что под действием модуляции времени задержки система может последовательно переключаться между двумя стационарными состояниями. Наблюдаемая картина во многом аналогична ситуации, представленной на рис. 1, б, соответствующей спонтанным переключениям системы. Следует отметить, что при модуляции расстояния между лазером и зеркалом, сами стационарные состояния оказываются слабо промодулированными, о чем свидетельствуют небольшие изменения интенсивности излучения, соответствующие отдельным стационарным состояниям (рис. 2, б).

Аналогичным образом можно индуцировать переключения между стационарными состояниями системы при модуляции тока инжекции (рис. 3). Однако в отличие от вынужденных переключений, представленных на рис. 2, в данном случае происходит существенная модуляция уровней излучения, соответствующих стационарным режимам генерации. В пределах самих состояний интенсивность излучения промодулирована гармоническим сигналом. При этом частота следования импульсов интенсивности излучения соответствовала частоте модуляции тока инжекции лазера и составляла $f=1.3$ кГц.

Отметим, что переменный сигнал в токе инжекции лазера, соответствующий переключениям между отдельными стационарными состояниями, по своей форме (при всех рассмотренных режимах) был идентичен сигналу, наблюдаемому в интенсивности излучения. Это обстоятельство позволяет, так же как в работе [7], использовать сам лазер в качестве детектора шумового сигнала, наблюдаемого в интенсивности.

2. Обсуждение результатов экспериментальных исследований

Для качественного объяснения представленных в разделе 1 результатов можно воспользоваться теоретической моделью Lang и Kobayashi [8], основанной на использовании системы скоростных уравнений для комплексной амплитуды электрического поля и плотности носителей, дополненных слагаемым, учитывающим запаздывающую оптическую обратную связь. В работе [6] получено аналитическое решение для указанных линеаризованных уравнений, позволяющее описать зависимость интенсивности излучения P , плотности носителей и частоты генерации от τ — времени задержки оптического сигнала

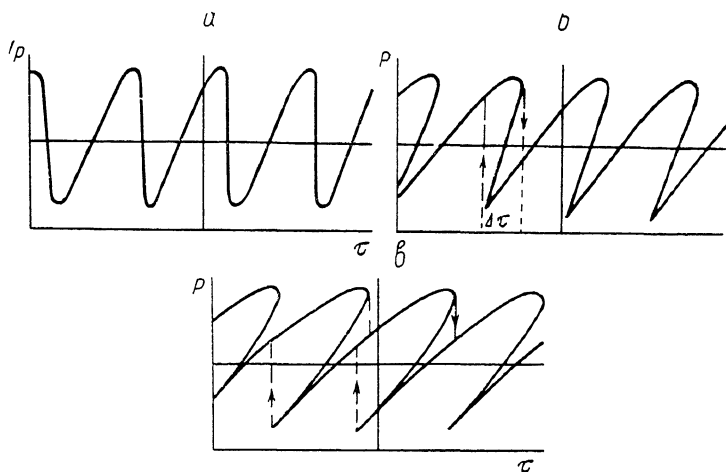


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения от времени задержки сигнала в цепи обратной связи.

С: а — 1, б — 3, е — 5

в цепи обратной связи. Анализ полученных решений выполнен для значений параметра обратной связи $0.5 \leq C \leq 3$.

К сожалению, указанный диапазон изменения параметра C не позволяет описать мультистабильные режимы генерации. В связи с этим нами были проведены расчеты зависимости P от τ для значений параметра $1 \leq C \leq 5$. Результаты расчетов представлены на рис. 4. Начиная со значения параметра $C \geq 1$ в системе возможны бистабильные режимы генерации (рис. 4, а, б). Изменение времени задержки сигнала может приводить к переключениям системы из одного стационарного состояния в другое согласно траектории, представленной на рис. 4, б пунктиром. При этом переключения будут происходить между двумя стационарными состояниями. Более сложные режимы возможны в системе при значении параметра $C=5$ (рис. 4, е). В этом случае переключения будут происходить согласно траектории, показанной на рис. 4, е пунктиром. Переключения возможны уже между несколькими стационарными состояниями, т. е. может иметь место мультистабильный режим генерации.

Результаты, представленные на рис. 4, и результаты экспериментальных исследований дают основания объяснить наличие низкочастотных шумов в бистабильных и мультистабильных системах следующим образом: 1) наличие флуктуаций длины оптической линии задержки (ЛЗ) может приводить к хаотическим переключениям системы из одного стационарного состояния в другое; 2) амплитуда флуктуаций длины ЛЗ распределена согласно законам статистики;

3) в случае $C=1$ (рис. 4, а и 1, а) при некоторых τ имеет место бесконечная крутизна перестроечной кривой и переключения системы из одного стационарного состояния в другое происходят при любом, сколь угодно малом возмущении длины ЛЗ, в результате этого мы имеем высокочастотные переключения с равномерным спектром (заметим, что величину C можно оценить, используя данные работы [6], а также результаты измерений доли энергии излучения лазера, попадающей в резонатор, регистрируемой *pin*-диодом); 4) при $C > 1$, например $C=3$ (рис. 4, б и 1, б), переключения могут происходить только при флуктуациях определенной амплитуды $\geq \Delta\tau$; вероятность наличия таких флуктуаций меньше единицы и переключения в системе происходят реже, чем при $C=1$; 5) наличие больших уровней обратной связи $C=5$ может приводить к тому, что флуктуации длины ЛЗ будут приводить к последовательному переключению между несколькими стационарными состояниями.

При модуляции тока инжекции происходит модуляция оптической длины всей системы, что также приводит к переключениям между стационарными состояниями при наличии модуляции интенсивности излучения внутри стационарных состояний.

Заключение

Результаты приведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что низкочастотные шумы в бистабильных и мультистабильных системах с запаздывающей обратной связью обусловлены хаотическими переключениями системы из одного стационарного состояния в другое.

Выявлены два основных источника флуктуаций времени задержки. Это флуктуации длины ЛЗ и флуктуации тока инжекции полупроводникового лазера.

Характер флуктуаций, наблюдаемых в реализованной нами системе, и отсутствие модуляции интенсивности внутри стационарных состояний позволяют утверждать, что в данном случае основным источником флуктуаций являлись хаотические изменения длины обратной связи.

Список литературы

- [1] Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg D. // IEEE J. Quant. Electron. 1986. Vol. 22. N 6. P. 762—773.
- [2] Mork J., Tromborg B., Christiansen P. Z. // IEEE J. Quant. Electron. 1988. Vol. 24. N 2. P. 123—133.
- [3] Clas P., Muller R. // Optic and Quant. Electron. 1987. Vol. 19. P. S61—S74.
- [4] Temkin H., Olsson N. A., Abeles J. H. et al. // IEEE J. Quant. Electron. 1986. Vol. 22. N 2. P. 286—293.
- [5] Henry C., Kazarinov R. F. // IEEE J. Quant. Electron. 1986. Vol. 22. N 2. P. 294—301.
- [6] Acket G. A., Lenstra D., Boef A. J. D., Verbeek B. H. // IEEE J. Quant. Electron. 1984. Vol. 20. N 10. P. 1163—1169.
- [7] Елисеев П. Г., Ву Ван Лыж, Манько М. А., Цоцория М. В. Препринт ФИАН СССР. № 172. М., 1987. 24 с.
- [8] Lang R., Kobayashi K. // IEEE J. Quant. Electron. 1980. Vol. 16. N 3. P. 347—355

Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского
Научно-исследовательский институт
механики и физики

Поступило в Редакцию
21 июля 1989 г.
В окончательной редакции
19 декабря 1989 г.