



О ПРИЧИНЕ РАЗМЫТИЯ ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА АВТОДИННОГО СИГНАЛА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ПРИ ДВИЖЕНИИ ВНЕШНЕГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, М.Ю. Калинин

На основе численного решения системы дифференциальных уравнений для полупроводникового лазера с вибрирующим внешним отражателем проведено моделирование экспериментально наблюдающегося размытия фазовых траекторий на отдельных участках. Установлена связь размытия траекторий с генерацией релаксационных колебаний на этих участках. Показано, что в режиме генерации релаксационных колебаний полупроводниковый лазер обладает высокой чувствительностью к флуктуациям параметров внешней оптической обратной связи и неустойчивости источника питания.

Введение

Как следует из результатов эксперимента, описанного в работе [1], на фазовом портрете автодинного сигнала при движении внешнего отражателя наблюдалось появление размытия фазовой траектории на отдельных ее участках. Причина этого явления объяснена не была.

Теоретический анализ

Излучательные характеристики полупроводникового лазера при наличии внешней оптической обратной связи, как известно [1,2], зависят от режима его работы, амплитуды и фазы возвращающегося в лазер собственного излучения, длины внешнего резонатора. Такая зависимость наглядно проявляется при построении фазовых портретов автодинного сигнала, полученного при движении внешнего отражателя. В основу теоретических исследований была положена модель Лэнга и Кобаяши [3], в которой лазерный диод описывается системой дифференциальных уравнений для амплитуды $E(t)$ и фазы $\Phi(t)$ поля $E(t)\cos(\omega_0 t + \Phi(t))$ и концентрации носителей заряда $N(t)$ [4]

$$dE(t)/dt = 1/2 G_N \Delta N E(t) + z E(t-\tau) \cos \Delta(t), \quad (1)$$

$$d\Phi(t)/dt = 1/2 \alpha G_N \Delta N - z E(t-\tau) \sin \Delta(t) / E(t), \quad (2)$$

$$dN(t)/dt = J - N(t)/\tau_s - G(N)(E(t))^2. \quad (3)$$

Здесь ω_0 – оптическая частота излучения уединенного лазера на пороге генерации; усиление $G(N)=G_N(N-N_0)$ задается дифференциальным усилением G_N и концентрацией N_0 при нулевом усилении; $\Delta N=N-N_{th}$, N_{th} – пороговая концентрация носителей для уединенного лазера; J – ток инжекции; τ_s – время жизни носителей заряда в активной области; α – коэффициент уширения линии генерации [12]; $\Delta(t)=\varphi_0+\Phi(t)-\Phi(t-\tau)$ – набег фазы волны для лазера с обратной связью за время обхода внешнего резонатора τ , $\varphi_0=\omega_0\tau$ – стационарный набег фазы для уединенного лазера; степень связи внешнего резонатора с внутренним $z=(1-R^2)r/(R\tau_{in})$ определяется амплитудными коэффициентами отражения лазерной грани R и внешнего отражателя r , соответственно, а также временем обхода излучением диодного резонатора τ_{in} .

Численное моделирование системы (1–3) проводилось методом Рунге – Кутты четвертого порядка. В качестве начальных значений амплитуды $E=E(t)$ и фазы $\Phi=\Phi(t)$ для времени $[-\tau,0]$ использовались стационарные решения системы дифференциальных уравнений (1)–(3) $E(t)=E^*$, $\Phi(t)=(\omega-\omega_0)t$, $N(t)=N^*$ (E^* , ω , N^* – не зависят от времени), которые в случае превышения током инжекции J своего порогового значения $J_{th}=N_{th}/\tau_s$ имеют вид

$$\varphi_0 = \varphi + C\sin(\varphi+\psi), \quad (4)$$

$$G_N\Delta N^* = -2z\cos\varphi, \quad (5)$$

$$E^{*2} = (J - N^*/\tau_s)/G(N^*), \quad (6)$$

где $\varphi=\omega\tau$ – стационарный набег фазы волны во внешнем резонаторе для лазера с обратной связью; $C=(1+\alpha^2)^{1/2}\tau z$ – параметр внешней оптической обратной связи; $\psi=\arctg\alpha$.

Для получения решения системы дифференциальных уравнений (1)–(3) с запаздывающими слагаемыми в момент времени t требуется знание функций $E=E(t)$ и $\Phi=\Phi(t)$ в промежутке $[t-\tau,t]$. Хранение информации о вычисленных значениях функций $E(t)$ и $\Phi(t)$ в течение времени задержки τ осуществлялось с помощью двух постоянно обновляемых массивов размерностями 2000 элементов. Значения заданных при расчете параметров приведены в таблице.

Таблица

Параметр	Обозначение	Численное значение
Дифференциальное усиление	G_N	$1.1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
Концентрация при нулевом усилении	N_0	$1.1 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$
Время жизни носителей заряда	τ_s	2 нс
Пороговая концентрация	N_{th}	$1.55 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$
Время обхода диодного резонатора	τ_{in}	8 пс
Коэффициент уширения	α	5

Результаты численного моделирования

Компьютерное моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе определялось поведение системы (1)–(3) вблизи стационарного решения (4)–(6) на наличие сходимости. На фазовой плоскости $(P(t)-P^*, \dot{P}(t))$, где $P(t)=(E(t))^2$ – мгновенное значение световой мощности при автоколебаниях, $P^*=(E^*)^2$ – стационарное значение мощности, приведено решение с предельным значением в виде точки (рис. 1, а) для значений $\varphi_0=0.5$, $C=0.4$. В случае, если решение системы уравнений (4)–(6) являлось неустойчивым, проводился второй этап решения, в ходе которого вычислялось предельное решение в виде цикла. Его вид приведен на рис. 1, б для $\varphi_0=1$, $C=0.4$ и характеризует появление автоколебаний в системе, описываемой уравнениями (1)–(3). Здесь же показана динамика поиска решений с предельной траекторией в виде замкнутого цикла при выборе начальной точки внутри (кривая 2) или снаружи (кривая 3) цикла. Пунктирные линии показывают, что кривые 2 и 3 после прохождения бесконечного числа оборотов сходятся к предельному циклу 1 изнутри и снаружи, соответственно.

На рис. 2 приведена зависимость интервала значений фазового набега, на котором происходит генерация релаксационных колебаний $\Delta\varphi_0$, от параметра обратной связи C . Как видно из этого рисунка, существует пороговое значение уровня обратной связи, при котором возникает область значений $\Delta\varphi_0$, характеризующаяся появлением релаксационных автоколебаний в такой системе.

Для моделирования сигнала фотодетектора при механических гармонических колебаниях внешнего отражателя функция стационарного набега фазы $\varphi_0(t)$ задавалась в виде

$$\varphi_0(t) = \varphi_{0F} + \varphi_{0A} \cos(\Omega t), \quad (7)$$

где φ_{0F} – значение стационарного набега фазы при фиксированном расстоянии до отражателя; φ_{0A} – амплитуда изменения фазового набега; Ω – частота механических колебаний отражателя. При этом для каждого момента времени t производилось численное моделирование по методике, описанной выше.

Поскольку при измерениях низкочастотной составляющей автодинного сигнала происходит его интегрирование за счет инерционных свойств фотоприемника, усилителя и аналого–цифрового преобразователя, производилось усреднение мгновенного значения мощности за период предельного цикла T_R

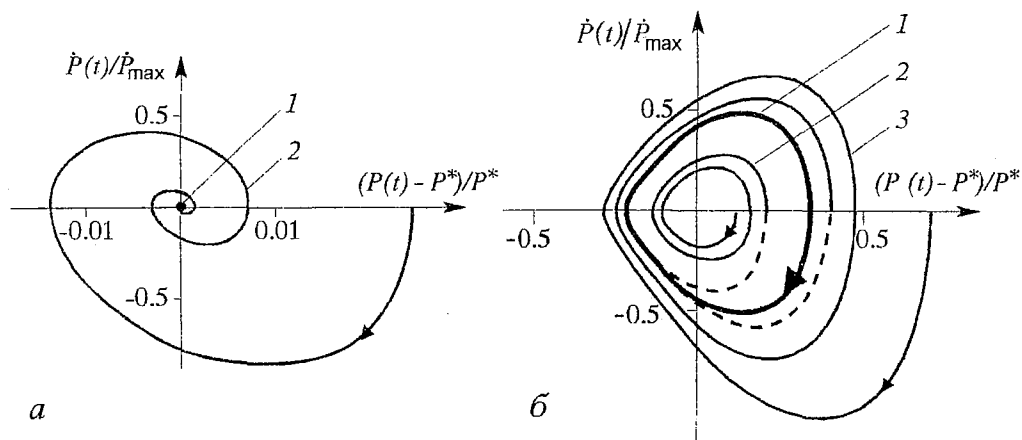


Рис. 1. Фазовые портреты затухающих (а) и незатухающих (б) релаксационных автоколебаний.

1 – предельные решения, 2, 3 – динамические решения; $C=0.4$; $\varphi_0=0.5$ (а); $\varphi_0=1$ (б). Здесь \dot{P}_{\max} – максимальное расчетное значение производной мощности P , P^* – стационарное значение мощности

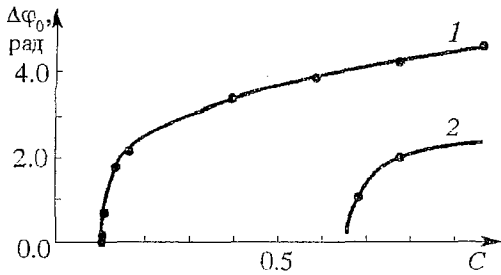


Рис. 2. Зависимость интервала значений фазового набега $\Delta\varphi_0$, соответствующего генерации релаксационных колебаний, от параметра обратной связи C при двух положениях внешнего отражателя L : 1 – 1.5 см; 2 – 0.3 см

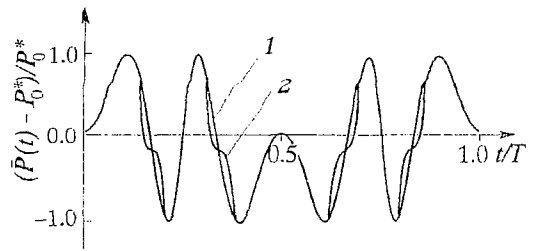


Рис. 3. Зависимости усредненной мощности $(\bar{P}(t) - P^*_0)/P^*_0$ от времени t , нормированного на период колебаний внешнего отражателя T , с параметрами $\varphi_{0F} = \pi/2$, $\varphi_{0A} = 2\pi$, $L = 1.5$ см, $J/J_{th} = 1.3$ для двух значений уровня обратной связи C : 1 – 0.09; 2 – 0.2

$$\bar{P}(t) = 1/T_R \int_{t-T_R}^t P(t_0) dt_0 \quad (8)$$

для различных значений уровня обратной связи.

На рис. 3 приведены зависимости нормированной усредненной мощности $(\bar{P}(t) - P^*_0)/P^*_0$ от времени t , нормированного на период колебаний внешнего отражателя T , где $P^*_0 = (P^*_{min} + P^*_{max})/2$ – среднее арифметическое минимального и максимального значений стационарной мощности при изменении фазового набега φ_0 на длине интервала 2π . Приведенные зависимости характеризуют движение внешнего отражателя с частотой механических колебаний $\Omega = 1$ Гц и амплитудой $\xi = 0.5$ мкм для лазера с длиной волны $\lambda = 1$ мкм, где указанные параметры связаны с амплитудой изменения фазового набега соотношением

$$\varphi_{0A} = 4\pi\xi/\lambda. \quad (9)$$

Как видно из рис. 3, с ростом уровня обратной связи C отклонение от первоначальной формы автодинного сигнала оказывается различным на различных участках зависимости $\bar{P}(t)$. При этом можно выделить участки с резкими изменениями угла наклона автодинного сигнала, которые, как показали расчеты, соответствуют возникновению режима незатухающих релаксационных колебаний.

На рис. 4 приведена зависимость усредненной мощности от времени, рассчитанная при возможной на практике флуктуации тока питания. Как следует из результатов, приведенных на рисунке, флуктуации тока питания приводят к значительному искажению траектории зависимости мощности автодинного сигнала от времени на тех же участках, где происходит генерация релаксационных колебаний. Такое поведение автодинного сигнала можно трактовать как существование участков высокой чувствительности автодинной системы к флуктуациям ее параметров при генерации релаксационных колебаний в полупроводниковом лазере. Экспериментально это выражается в появлении участков размытия на фазовом портрете. Аналогичные участки со значительными искажениями траектории зависимости мощности автодинного сигнала от времени были теоретически обнаружены и при задании реальных на практике флуктуаций параметров внешней оптической обратной связи.

Изложенное выше подтверждается полученными расчетным путем фазовыми портретами для усредненного за период предельного цикла значения квадрата амплитуды поля при колебаниях внешнего отражателя для двух значений тока инжекции ($J_1/J_{th} = 1.01$; $J_2/J_{th} = 1.02$; $\varphi_{0A} = 1.5$; $\varphi_{0F} = 0.75$; $C = 0.9$), приведенными на рис. 5. Как видно из этого рисунка, при флуктуациях тока инжекции в пределах от

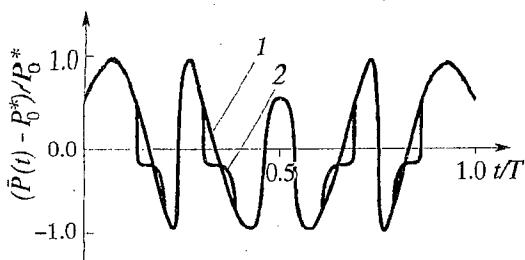


Рис. 4. Зависимости усредненной мощности $(\bar{P}(t) - P_0^*)/P_0^*$ от времени t , нормированного на период колебаний внешнего отражателя T , с параметрами $\varphi_{0F} = \pi/2$, $\varphi_{0A} = 2\pi$, $L = 1.5$ см, $C = 0.9$ для двух нормированных значений тока инжекции J/J_{th} : 1 - 1.01; 2 - 1.03

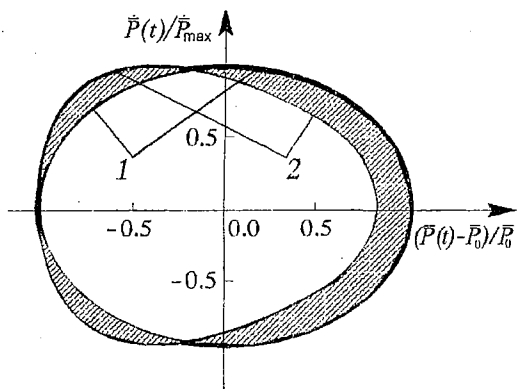


Рис. 5. Фазовые портреты мощности излучения, усредненные за период предельного цикла, при колебаниях внешнего отражателя с параметрами $\varphi_{0F} = 1.5$, $\varphi_{0A} = 0.75$, $L = 1.5$ см, $C = 0.9$ для двух нормированных значений тока инжекции J/J_{th} : 1 - 1.01; 2 - 1.02

$J/J_{th} = 1.01$ до $J/J_{th} = 1.02$ фазовые траектории автодинного сигнала будут находиться в заштрихованной области. На практике это означает, что небольшие флуктуации, например, тока питания, характерные для стандартных источников питания, должны приводить к размытию отдельных участков фазовых траекторий, которые наблюдались нами экспериментально [1].

Выводы

На основе численного решения системы дифференциальных уравнений для полупроводникового лазера с внешним отражателем показано, что в режиме релаксационных колебаний автодинная система характеризуется повышенной чувствительностью к флуктуациям ее параметров. Появление размытия фазовой траектории на отдельных ее участках объясняется высокой чувствительностью автодинной системы на этих участках к неустойчивости источника питания и флуктуациям параметров внешней оптической обратной связи.

Библиографический список

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Калинин М.Ю. Формирование автодинного сигнала в полупроводниковом лазере при движении внешнего отражателя // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т. 6, № 1. С. 3.
2. Скрипаль А.В., Усанов Д.А., Вагарин В.А., Калинин М.Ю. Автодинное детектирование в полупроводниковом лазере при движении внешнего отражателя // ЖТФ. 1999. Т. 69, вып.1. С. 72.
3. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE J. Quant. Electron. 1980. Vol. QE-16. P. 347.
4. Tromborg B., Osmundsen J.H., Olesen H. Stability analysis for a semiconductor lasers in an external cavity // IEEE J. Quantum Electron. 1984. Vol. QE-20. P. 1023.
5. Osinski M., Buus J. Linewidth broadening factor in semiconductor lasers (an overview) // IEEE J. Quant. Electron. 1987. Vol. QE-23, № 1. P. 9.

Саратовский государственный
университет

Поступила в редакцию 18.10.99
после доработки 1.12.99

THE REASON OF BLURRING REGIONS OF PHASE PATTERN FOR AUTODINE SIGNAL OF SEMICONDUCTOR LASER DURING MOVEMENT OF THE EXTERNAL REFLECTOR

D.A.Usanov, A.V.Skripal, M.Yu.Kalinkin

The computer simulation of the experimentally observed blurring of phase trajectories on the certain parts has been made with the help of numerical calculations of the system of differential equations for semiconductor laser with vibrating external reflector. The relation of the blurring of trajectories with generation of relaxation oscillations on these parts has been found. It has been shown that semiconductor laser in the generation regime of relaxation oscillations has the high sensitivity to the fluctuations of parameters of external optical feedback and to the non-stability of power supply.



Usanov Дмитрий Александрович родился в 1943 году в Менделеевске (Татария). Окончил Саратовский госуниверситет (1965). Кандидат физико-математических наук (1972), доктор физико-математических наук (с 1989), с 1990 – профессор кафедры физики твердого тела, с 1985 по настоящее время – заведующий кафедрой физики твердого тела, с 1989 – проректор по НИР СГУ. Автор большого числа статей и изобретений по твердотельной электронике и радиофизике, заслуженный деятель науки РФ. Член IEEE, академик МАН ВШ.



Скрипаль Анатолий Владимирович – родился в Саратове (1960). Окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1982), защитил диссертацию на звание кандидата физико-математических наук по специальности «Оптика» (1991). С 1982 года научный сотрудник кафедры физики твердого тела Саратовского госуниверситета. Автор более 70 научных трудов в области когерентной оптики, вибродиагностики и квантовой электроники.



Калинкин Михаил Юрьевич – родился в Саратове (1973). Окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1995). В настоящее время аспирант кафедры физики твердого тела. Область научных интересов – физика полупроводников, твердотельная электроника и радиофизика.