

Стабилизация излучения полупроводникового вертикально излучающего лазера с асимметричной треугольной токовой модуляцией

А.А. Кренц, Н.Е. Молевич

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

Теоретически исследована динамика полупроводникового лазера с асимметричной токовой модуляцией и инжекцией внешнего оптического излучения. Лазер с асимметричной модуляцией генерирует оптические импульсы нерегулярные как по амплитуде, так и по поляризации. В данной работе показано, что инжекция внешнего оптического излучения позволяет добиться генерации регулярных субнаносекундных оптических импульсов. Исследована зависимость статистических характеристик генерируемых импульсов от параметров инжектируемого излучения.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер, модуляция накачки, оптическая инжекция.

Введение

Полупроводниковые вертикально излучающие лазеры (ВИЛ) с прямой токовой модуляцией – очень привлекательные источники когерентного оптического излучения для применения в высокоскоростных оптических каналах связи. У таких лазеров низкий пороговый ток накачки, они работают на единственной продольной моде, их излучение легко заводится в волновод. Модуляция тока накачки может приводить к нелинейным эффектам, таким как удвоение периода колебаний, динамический хаос и мультистабильность [1; 2]. В данной работе мы теоретически исследуем динамику ВИЛ с асимметричной треугольной модуляцией тока накачки и инжекцией внешнего излучения. В предыдущих исследованиях было показано, что ВИЛ с асимметричной треугольной токовой модуляцией генерирует оптические импульсы нерегулярные как по амплитуде, так и по поляризации [3]. С практической точки зрения важно, что при асимметричной треугольной токовой модуляции лазер может генерировать оптические импульсы при среднем токе накачки ниже порогового значения, что позволит значительно уменьшить разогрев активной среды лазера. Однако нерегулярность генерируемых импульсов не позволяет использовать ВИЛ с асимметричной треугольной токовой модуляцией в высокоскоростных оптических каналах связи. В данной статье мы предлагаем

стабилизировать излучение лазера с помощью инжекции внешнего оптического излучения.

1. Математическая модель

Динамика ВИЛ описывается хорошо известной spin-flip моделью, расширенной для учета инжекции [4]:

$$\begin{aligned}
 \dot{E}_x &= k(1 + i\alpha) \left[(N - 1) E_x + inE_y \right] - \\
 &- i(\gamma_p + \Delta\omega) E_x - \gamma_a E_x + \\
 &+ kE_{inj} \cos(\psi) + \sqrt{\beta_{sp}} \xi_x, \\
 \dot{E}_y &= k(1 + i\alpha) \left[(N - 1) E_y - inE_x \right] + \\
 &+ i(\gamma_p - \Delta\omega) E_y + \gamma_a E_y + \\
 &+ kE_{inj} \sin(\psi) + \sqrt{\beta_{sp}} \xi_y, \\
 \dot{N} &= \gamma_N \left[\mu(t) - N \left(1 + |E_x|^2 + |E_y|^2 \right) - \right. \\
 &\left. - in(E_y E_x^* - E_x E_y^*) \right], \\
 \dot{n} &= -\gamma_s n - \gamma_N \left[n \left(|E_x|^2 + |E_y|^2 \right) + \right. \\
 &\left. + iN(E_y E_x^* - E_x E_y^*) \right],
 \end{aligned} \tag{1}$$

где k – скорость затухания поля; γ_N – скорость релаксации инверсии; γ_S – скорость переверота спинов, ответственная за выравнивание инверсии носителей с различными спинами; α – амплитудно-фазовая связь (альфа фактор);

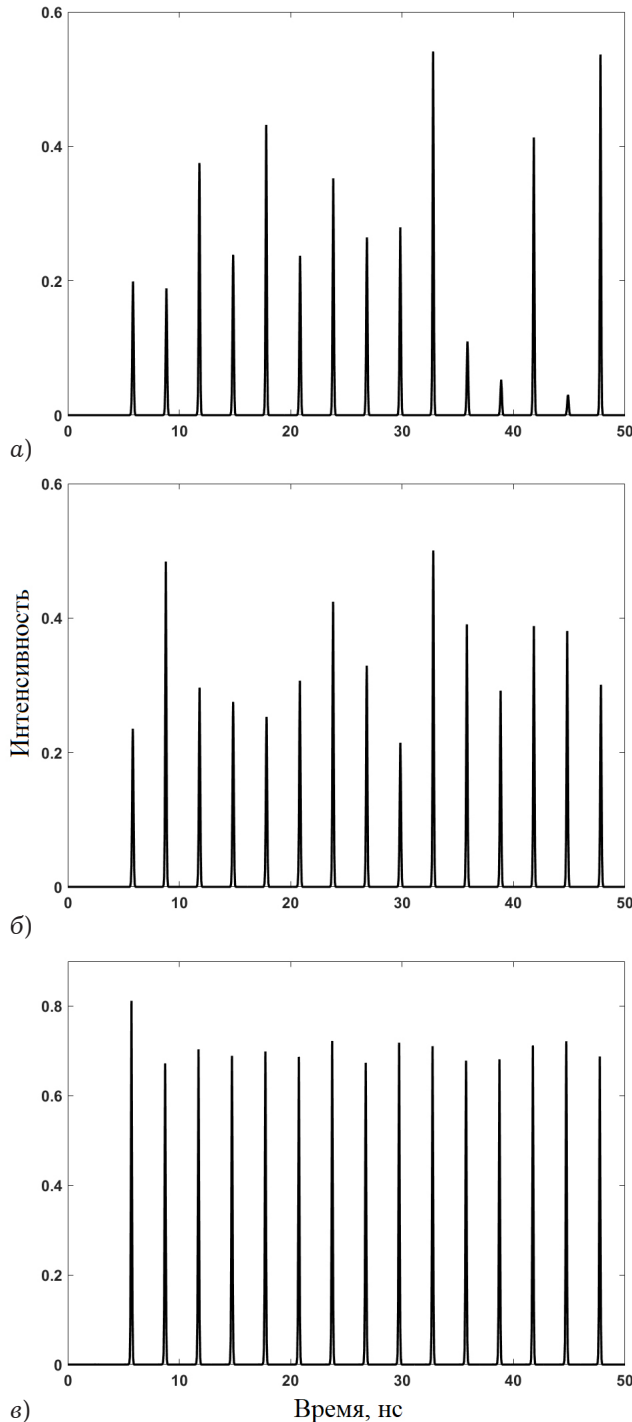


Рис. 1. Значение интенсивности генерируемого лазером излучения от времени при следующих значениях амплитуды инжектируемого сигнала: а) $E_{inj} = 0$; б) $E_{inj} = 5 \cdot 10^{-6}$; в) $E_{inj} = 10^{-4}$

γ_a и γ_p – коэффициенты дихроизма и двулучепреломления соответственно; E_{inj} – амплитуда инжектируемого излучения; $\Delta\omega$ – параметр расстройки между частотой генерируемого и инжектируемого излучения; ψ – угол между х-поляризованной модой и плоскостью поляризации инжектируемого излучения; β_{sp} – сила шума спонтанного излучения; $\xi_{x,y}$ – дельта коррелированный Гауссовский белый шум;

$\mu(t)$ – безразмерный параметр накачки, пороговое значение статической накачки $\mu_{th} = 1$.

Ток накачки модулируется треугольным асимметричным сигналом амплитуды $\Delta\mu$, ток нарастает от значения μ_0 за время T_1 и уменьшается обратно до μ_0 за время T_2 . Один цикл модуляции выглядит следующим образом: $\mu(t) = \mu_0 + \Delta\mu(t/T_1)$ если $0 \leq t \leq T_1$. $\mu(t) = \mu_0 + \Delta\mu[1 - (t - T_1)/T_2]$ если $T_1 \leq t \leq T_1 + T_2$. Среднее значение тока накачки равно $\mu_{ave} = \mu_0 + \Delta\mu/2$ и не зависит от периода модуляции $T = T_1 + T_2$. Асимметрия модулирующего сигнала определяется параметром $\alpha_a = T_1/T$, значения параметра лежат в диапазоне $0 \leq \alpha_a \leq 1$.

2. Результаты моделирования

Для численного интегрирования системы уравнений (1) был использован стандартный метод Рунге – Кутты четвертого порядка с шагом 0.0001. Для моделирования были выбраны типичные для ВИЛ параметры [5]: $k = 300 \text{ нс}^{-1}$, $\alpha = 3$, $\gamma_N = 1 \text{ нс}^{-1}$, $\gamma_a = 0.5 \text{ нс}^{-1}$, $\gamma_p = 50 \text{ рад/с}$, $\gamma_s = 50 \text{ нс}^{-1}$ и $\beta_{sp} = 10^{-6} \text{ нс}^{-1}$. Треугольная модуляция тока накачки приводит к генерации оптических импульсов, даже если среднее значение тока накачки меньше порогового значения. Существует оптимальное значение параметра асимметрии $\alpha_a \approx 0.8$, при котором среднее значение амплитуды генерируемых импульсов имеет максимальное значение, а дисперсия амплитуды импульсов, напротив, имеет минимальное значение. На рис. 1 показаны зависимости интенсивности генерируемого лазером излучения $I = |E_x|^2 + |E_y|^2$ от времени, при различных значениях амплитуды инжектируемого излучения. Остальные параметры были следующими: $\mu_0 = 0.5$, $\Delta\mu = 0.8$, асимметрия $\alpha_a = 0.8$, расстройка $\Delta\omega = 0$ и $\Psi = \pi/4$ (инжекция в обе линейно поляризованные моды E_x и E_y).

На рис. 1, а хорошо видно, что в отсутствие инжекции лазер генерирует сильно нерегулярные оптические импульсы. Слабая инжекция стабилизирует амплитуду генерируемых импульсов (рис. 1, б). Более сильная инжекция позволяет добиться генерации почти регулярных оптических импульсов (рис. 1, в).

На рис. 2 показана зависимость статистических характеристик генерируемого лазером сигнала от величины инжектируемого поля. Хорошо видно, что дисперсия генерируемых импульсов быстро уменьшается при использовании инжекции внешнего излучения и стремится к нулю.

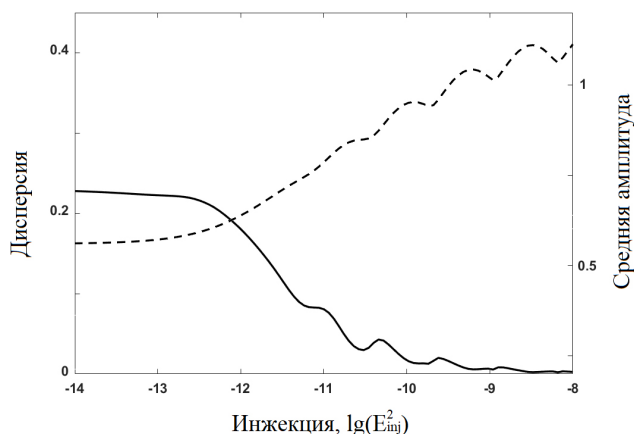


Рис. 2. Зависимость дисперсии генерируемых импульсов (сплошная линия) и их средней амплитуды (пунктирная линия) от амплитуды инжектируемого сигнала

Отметим, что интенсивность инжектируемого излучения $I_{inj} = |E_{inj}|^2$ на несколько порядков меньше интенсивности генерируемого лазером излучения. Даже такая слабая инжекция позволяет добиться практически полной стабилизации лазера. Кроме того, инжекция внешнего излучения позволяет значительно увеличить амплитуду генерируемых импульсов.

Заключение

В данной работе проведено численное моделирование динамики полупроводникового вертикально излучающего лазера с модуляцией тока накачки треугольным асимметричным сигналом и инжекцией внешнего оптического излучения. В отсутствие инжекции лазер может генерировать субнаносекундные оптические импульсы, даже если средний ток оказывается ниже порогового значения. Данное явление позволяет значительно уменьшить разогрев активной среды лазера, а, следовательно, уменьшить ресурсы на охлаждение передатчика и увеличить срок его службы. Это особенно актуально для космических систем связи, где решение проблемы теплоотвода и увеличение срока службы передатчика имеют первостепенное значение. Однако у данного метода есть существенный недоста-

ток – лазер генерирует нерегулярные оптические импульсы, что делает невозможным применение таких лазеров в качестве передатчика в высокоскоростных оптических системах связи.

В статье исследована возможность стабилизации излучения полупроводникового вертикально излучающего лазера с помощью инжекции внешнего оптического излучения. Показано, что даже слабая оптическая инжекция позволяет стабилизировать излучение лазера и добиться генерации почти строго регулярных оптических импульсов. Стабилизирующий эффект оказывается значительным даже если интенсивность инжектируемого излучения на несколько порядков меньше интенсивности генерируемого излучения. Кроме того, инжекция позволяет увеличить амплитуду генерируемых лазером оптических импульсов. Таким образом, инжекция внешнего излучения эффективно стабилизирует генерацию полупроводникового вертикально излучающего лазера с асимметричной треугольной токовой модуляцией.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-32-60151 мол_а_дж, Государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности (3.1158.2017).

Список литературы

1. Agrawal G.P. Effect of gain nonlinearities on period doubling and chaos in directly modulated semiconductor lasers // Appl. Phys. Lett. 1986. Vol. 49. P. 1012–1015.
2. Bennett S., Snowden C.M., Iezekiel S. Nonlinear dynamics in directly modulated multiple-quantum-well laser diodes // IEEE J. Quantum Electron. 1997. Vol. 3. P. 2076–2083.
3. Zamora-Munt J., Masoller C. Generation of optical pulses in VCSELs below the static threshold using asymmetric current modulation // Opt. Express. 2008. Vol. 16. P. 17848–17853.
4. San Miguel M., Feng Q., Moloney J.V. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor // Phys. Rev. A. 1995. Vol. 52. P. 1728–1739.
5. Martin-Regalado J., Prati F., San Miguel M., Abraham N.B. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers // IEEE J. Quantum Electronics. 1997. Vol. 33. P. 765–783.

Stabilization of the vertical cavity surface emitting laser subject to asymmetrical triangular current modulation

A.A. Krents, N.E. Molevich

We investigate the effect of external optical injection on the dynamics of the vertical cavity surface emitting laser under asymmetrical triangular modulation theoretically. The vertical cavity surface emitting laser with asymmetrical current modulation emits irregular optical pulses both in amplitude and in polarization. In this paper we demonstrate that optical injection leads to stabilization of laser output. Laser with injected signal emits regular subnanosecond optical pulses. Dependence of statistical characteristics of emitted pulses from injected signal parameters is investigated.

Keywords: vertical cavity surface emitting laser, current modulation, optical injection.