

强光注入提高光反馈 VCSELs 混沌载波基频^{*}

刘胜芳 夏光琼 吴加贵 李林福 吴正茂[†]

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2007 年 5 月 30 日收到, 2007 年 6 月 28 日收到修改稿)

研究了外部光注入对光反馈垂直腔表面发射半导体激光器 (VCSEL) 混沌载波基频的影响. 研究表明: 当外部注入光频率与 VCSEL 自由运行的振荡频率失谐一定时, 随着外部光注入强度的增加, 混沌载波基频总体呈现上升的趋势; 通过调整失谐频率和注入强度大小, 外部光注入可以使混沌载波基频得到大幅度的提高; 当归一化的注入系数 $K=330$, 失谐频率为 42 GHz, 可得到基频位于 47.3 GHz 的混沌信号输出.

关键词: VCSEL, 光注入, 光反馈, 混沌载波基频

PACC: 0545, 4255P

1. 引言

近年来混沌保密通信越来越受到人们的关注, 并得到广泛地应用^[1, 2]. 由于光混沌的动力学行为复杂, 对参数相当敏感, 因此成为保密通信的一个热点话题^[3-8]. 在混沌通信中, 保密性和传输速率是两大最重要的指标, 其中传输速率取决于混沌载波基频^[9]. 混沌载波频率与激光器的弛豫振荡频率密切相关, 弛豫振荡频率限制了半导体激光器的最大调制频率. 采用强光注入的方式可以提高半导体激光器的最大调制频率^[10-14]. 通过强光注入到垂直腔表面发射半导体激光器 (VCSEL), 实验上已获得 50GHz 的调制带宽^[15]. 因此可以预计, 利用外部光注入, 通过调整系统参量, 可以使外光反馈 VCSEL 输出的混沌载波基频得到提高.

本文基于描述外部光注入下光反馈 VCSEL 的速率方程, 对外部光注入对光反馈 VCSEL 输出混沌载波基频的影响进行了研究. 数值研究的结果表明, 利用外部光注入可大幅度地提高混沌载波基频. 当 VCSEL 的电流偏置在 2 倍阈值电流, 在无外光注入下, 其混沌信号载波基频为 8.7 GHz, 采用强光注入, 可实现载波基频为 47.3 GHz 的混沌光输出.

2. 理论模型

图 1 是外部光注入, 光反馈 VCSEL 的示意图.

混沌载波发射机由中心频率为 1550 nm 的 S-LD 和外腔反射镜组成. M-LD 为另一个中心频率可调的半导体激光器, 其输出的连续光经过光隔离器, 可变衰减器和分束器后注入副激光器 S-LD 中. 可变衰减器用于改变注入光强度, 光隔离器保证光的单向传输.

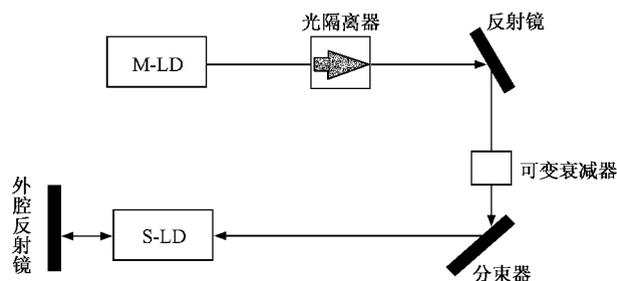


图 1 外部光注入下, 光反馈 VCSEL 的示意图

在外部光注入下, 光反馈 VCSEL 的动态特性可以由包含注入项和反馈项的速率方程来描述:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{c}{n_b} \Gamma \xi (N - N_{th}) E + \frac{c\sqrt{T}}{2n_b L} E_m \cos(\phi - 2\pi\Delta t) + \gamma_{ext} E(t - \tau) \cos[\omega_0 \tau + \phi - \phi(t - \tau)] \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \alpha \frac{c}{n_b} \Gamma \xi (N - N_{th}) - \frac{c\sqrt{T}}{2n_b L} \frac{E_m}{E} \sin(\phi - 2\pi\Delta t) - \gamma_{ext} \frac{E(t - \tau)}{E} \sin[\omega_0 \tau + \phi - \phi(t - \tau)] \quad (2)$$

^{*} 重庆市自然科学基金和西南大学高新技术培育基金资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

$$\frac{dN}{dt} = \Lambda' - N \times \gamma_N - \frac{2\pi\epsilon_0 n_b c}{h\omega_0} [g_{th} + \xi(N - N_{th})] E^2, \quad (3)$$

式中, E , E_m 分别为 S-LD 和 M-LD 的场振幅, ϕ 是激光器的输出相位, N 为载流子数密度, 对于副激光器, M-LD 输出的连续光作为直接注入, Δ 为 M-LD 与自由运行 S-LD 的频率差异. 不考虑外部注入光的传输时间, $\phi - 2\pi\Delta t$ 表示外部光注入引起的相位延迟, 而 $\omega_0\tau + \phi - \phi(t - \tau)$ 表示光反馈引起的相位延迟, τ 为反馈光引入的传播时间, $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为 S-LD 自由运行时的中心角频率 (f_0 是 S-LD 自由运行时的中心频率), Γ 是限制因子, n_b 为介质折射率, ξ 是微分增益, ϵ_0 为真空介电常数, h 为普朗克常数, α 是线性增益因子, c 是光在真空中的速率, L 为 S-LD 的腔长, T 为 S-LD 光注入端面的透射率, γ_N 和 γ_E 分别是载流子和光子衰减率, Λ' 是抽运速率, $\gamma_{ext} = (1 - R) \sqrt{\frac{R_{ext}}{R}} / \tau_{in}$ (其中 R 和 R_{ext} 分别为激光器输出端面的强度反射率, R_{ext} 为反射镜的反射光功率与激光器输出功率之比, τ_{in} 为光在激光腔内往返一次所需的时间, $\tau_{in} = 2n_b L / c$) 为外腔反馈系数. S-LD 在自由

运行时的阈值增益 g_{th} 和阈值载流子数密度 N_{th} , 以及阈值抽运速率 Λ_{th} 可表示为

$$g_{th} = \frac{n_b \times \gamma_E}{2c\Gamma}, \quad (4a)$$

$$N_{th} = N_{tr} + \frac{n_b \times \gamma_E}{2c\Gamma\xi}, \quad (4b)$$

$$\Lambda_{th} = \gamma_N \times N_{th}, \quad (4c)$$

其中 N_{tr} 是透明载流子数密度. 通过数值求解方程 (1)–(3), 可对光反馈 VCSEL 在外部光注入条件下的动态特性进行分析.

3. 结果与讨论

3.1. 无光注入的情况

在图 2 中给出了无外部光注入, $\Lambda' = 2\Lambda_{th}$ 时, VCSEL 输出信号的时间序列和功率谱分布. 数值计算中所用的数据为^[16] $R_{ext} = 0.033$, $\tau = 6$ ns, $n_b = 3.4$, $\Gamma = 0.05$, $\xi = 10^{-19}$ m², $T = 0.004$, $L = 1.5$ μ m, $R = 0.996$, $c = 3 \times 10^8$ m/s, $\gamma_N = 2 \times 10^9$ s⁻¹, $\gamma_E = 5 \times 10^{11}$ s⁻¹, $N_{tr} = 10^{24}$ m⁻³, $\alpha = 2$. 从图 2 可以看出, 输出信号为混沌信号, 混沌信号载波基频为 8.7 GHz.

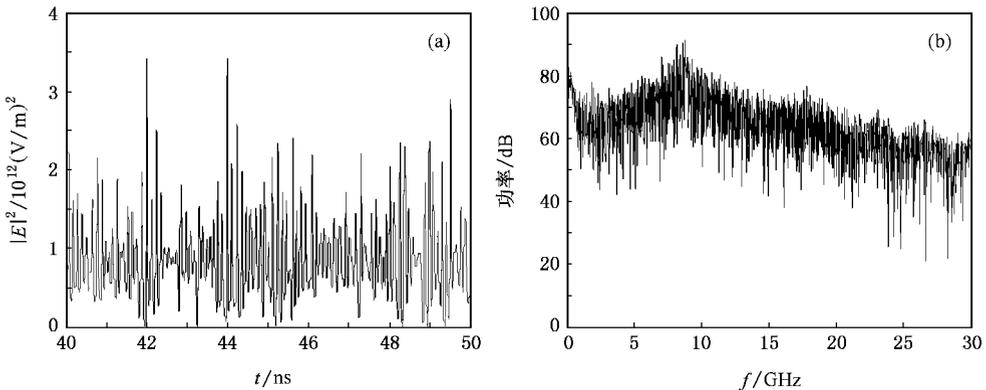


图 2 无外光注入时的混沌输出信号的时间序列 (a) 和功率谱 (b)

3.2. 光注入对混沌载波基频的影响

在外部光注入下, 引入归一化注入系数 $K (= \frac{c\sqrt{T}}{2n_b L \times \gamma_N} \frac{E_m}{E_0})$, E_0 是 S-LD 偏置在 2 倍阈值电流下, 自由运行时腔内的场振幅. 图 3 给出了失谐频率 (即外部注入光频率与 S-LD 自由运行时的中心频率差) $\Delta = 42$ GHz, 场振幅峰值的平方 $|E_{peak}|^2$ 和注入

系数 K 变化的分岔图. 从图中可以看出, 当 K 值相对较小时, S-LD 的输出为混沌态; 随着 K 值的逐渐增大, S-LD 的输出将经历从混沌到多周期、稳态的过程.

图 4 给出了注入系数 $K = 280$ 时 S-LD 输出信号的时间序列以及功率谱分布. 从图 4 中可以看到: 当注入系数 $K = 280$ 时, 输出混沌信号的基频位于 45.9 GHz 处. 可见光注入可以提高混沌载波基频.

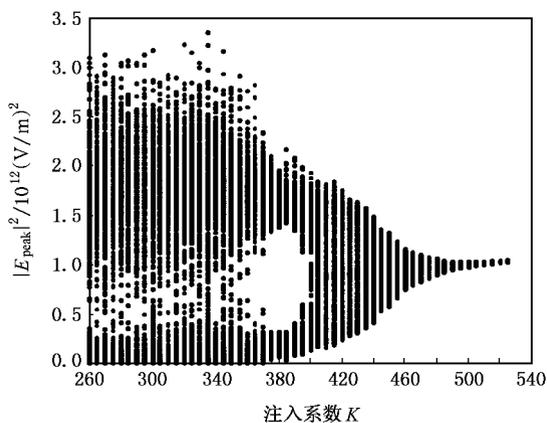


图 3 S-LD 输出峰值场振幅的平方 $|E_{\text{peak}}|^2$ 随注入系数 K 变化的分岔图

图 5 给出了失谐频率分别为 38 GHz、40 GHz 和 42 GHz 时,注入系数 K 从 270 增大到 330, S-LD 输出混沌载波基频随 K 的变化关系.对于确定的频率失谐值,混沌载波基频随着注入系数的增大而总体呈现增加的趋势,在增加的过程中伴随着波动;对于相同的 K 值,失谐频率 Δ 越大,所得到的混沌载波基频越大.另外,需要指出的是,在 Δ 取定后,混沌载波基频虽然随着 K 值的增加而总体呈现增大,但是 K 值不能无限制地增大,因为从图 3 可以看出, K 值过大,会导致 S-LD 的输出达到稳定态,不再输出混沌载波.当然,使 VCSEL 输出呈现混沌态, K 的取值范围将随着失谐频率的变化而发生改变.

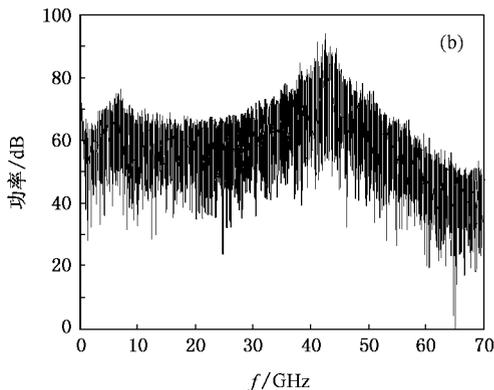
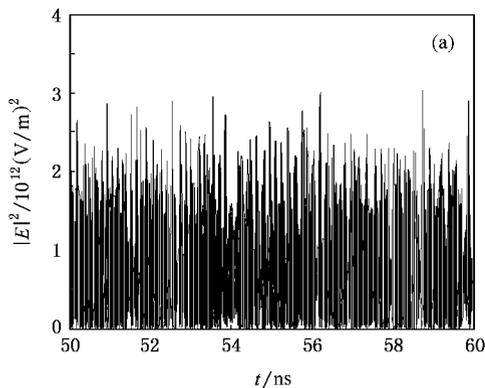


图 4 $K = 280$ 时混沌输出信号的时间序列 (a) 和功率谱 (b)

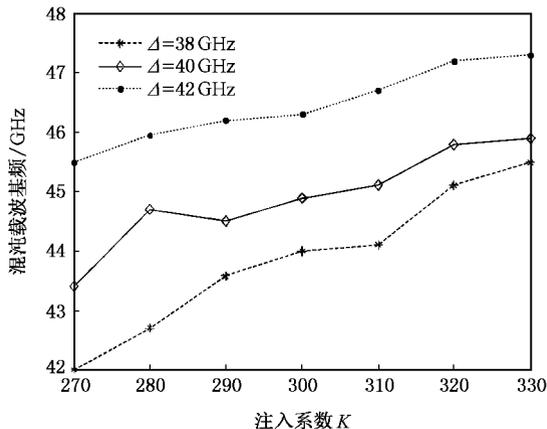


图 5 不同失谐频率 Δ 下,混沌载波基频随注入系数的变化

4. 结 论

本文基于外光注入下,光反馈 VCSEL 的速率方程组,研究了外部光注入对混沌载波基频的影响.研究表明,在注入系数满足 VCSEL 输出为混沌信号的前提下,随着注入光强度的增加,VCSEL 输出的混沌载波基频总体呈现增加的趋势,在增加的过程中伴随着波动;另外,失谐频率的大小对 VCSEL 输出动态有很大的影响,失谐频率取不同值时,不仅导致 VCSEL 输出呈现混沌态时 K 的取值范围发生改变,同时也会影响输出混沌载波的基频大小;当注入系数 $K = 330$,失谐频率为 42 GHz,我们得到了基频位于 47.3 GHz 的混沌信号输出.



- [1] Shi Z G , Ran L X 2006 *J. Electronmagn. Waves and Appl.* **20** 1335
- [2] Dmitriva A S , Panas A I , Zakharchenko K V 2003 *Nonlinear Phenomena in Complex Systems* **6** 488
- [3] Wu J G , Wu Z M , Lin X D , Zhang Y , Zhong D Z , Xia G Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4169 (in Chinese) [吴加贵、吴正茂、林晓东、张毅、钟东洲、夏光琼 2005 物理学报 **54** 4169]
- [4] Li X F , Pan W , Ma D , Luo B , Zhang W L , Xiong Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5094 (in Chinese) [李孝峰、潘 炜、马 冬、罗 斌、张伟利、熊 悦 2006 物理学报 **55** 5094]
- [5] Yan S L , Wang S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1687 (in Chinese) [颜森林、汪胜前 2006 物理学报 **55** 1687]
- [6] Wang Y C , Zhang G W , Wang A B *et al* 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4372 (in Chinese) [王云才、张耕玮、王安帮等 2007 物理学报 **56** 4372]
- [7] Liu Y , Takiguchi Y , Davis P , Aida T , Saito S , Liu J M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 4306
- [8] Lodi V A , Donati S , Scire A 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 953
- [9] Takiguchi Y , Ohyagi K , Ohtsubo J 2003 *Opt. Lett.* **28** 319
- [10] Simpson T B , Liu J M , Gavrielides A 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 709
- [11] Meng X J , Chau T , Wu M C 1998 *Electron. Lett.* **34** 2031
- [12] Okajima Y , Hwang S K , Liu J M 2003 *Opt. Commun.* **219** 357
- [13] Chrostowski L , Chang C H , Chang-Hasnain C J 2002 *Electron. Lett.* **38** 965
- [14] Murakami A , Kawashima K , Atsuki K 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 1196
- [15] Chrostowski L , Zhao X , Chang-Hasnain C J , Shau R , Ortsiefer M , Amann M C 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 367
- [16] Wieczorek S , Chow W W , Chrostowski L , Chang-Hasnain C J 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 552

Improving chaotic carrier fundamental frequency in VCSELs with optical feedback by strong light injection^{*}

Liu Sheng-Fang Xia Guang-Qiong Wu Jia-Gui Li Lin-Fu Wu Zheng-Mao[†]

(School of Physics , Southwest University , Chongqing 400715 , China)

(Received 30 May 2007 ; revised manuscript received 28 June 2007)

Abstract

In this paper , the influence of the external light injection on the chaotic carrier fundamental frequency of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) with optical feedback have been investigated. The results show that , for the fixed frequency offset between the master laser diode and the slave VCSEL , the chaotic carrier fundamental frequency will generally increase with the increase of injection intensity ; the chaotic carrier fundamental frequency can be improved significantly by adjusting frequency offset and injection intensity. For the normalized injection intensity K of 330 and frequency offset 42 GHz , chaotic output with 47.3GHz fundamental frequency can be obtained.

Keywords : VCSEL , light injection , optical feedback , chaotic carrier fundamental frequency

PACC : 0545 , 4255P

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Chongqing City , China , and the High-Tech Nurtured Fund of the Southwest University.

[†] Corresponding author. E-mail : zmwu@swu.edu.cn