

文章编号:1004-4213(2011)04-0542-5

线宽增强因子对外光注入半导体激光器非线性单周期振荡特性的影响

张明江^{1,2}, 刘铁根¹, 李静霞², 王云才²

(1 天津大学 精密仪器与光电子工程学院; 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2 太原理工大学 光电工程研究所, 太原 030024)

摘 要:线宽增强因子是影响半导体激光器输出特性的一个重要参量,不同材料不同结构类型的半导体激光器的线宽增强因子有较大的差异.利用光注入半导体激光器的单模速率方程模型,数值研究了线宽增强因子对外光注入半导体激光器的非线性单周期振荡特性的影响.结果表明:外光注入半导体激光器的动态特性对线宽增强因子的变化极为敏感,随着线宽增强因子的增加,在负失谐注入范围内单周期振荡区域显著增大,同时注入锁定的稳态输出被大大抑制.分析了线宽增强因子对非线性单周期振荡光谱特性和振荡频率的影响,结果表明:随着半导体激光器线宽增强因子的增大,单周期振荡的频率越大;当线宽增强因子不变时,单周期振荡的频率随注入光强度和频率失谐的增加而增加.

关键词:半导体激光器;非线性动力学;线宽增强因子;混沌;周期振荡

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114004.0542

0 引言

近年来,半导体激光器的非线性动力学特性引起了研究者的高度关注: Simpson 等人研究了光注入半导体激光器的非线性动力学特性^[1]; Lin 等人研究了光电反馈半导体激光器的非线性输出特性^[2]; Lawrence 等人研究了外调制下光反馈半导体激光器的非线性特性^[3], 李孝峰等人则研究了多次外光反馈下垂直腔面发射激光器的非线性动态特性^[4]. 在半导体激光器的诸多动态特性中,单周期振荡有着广泛的应用.例如,单周期振荡被研究者用于光载无线电系统中光生微波^[5]和调制格式转换^[6]、光时分复用系统中的全光时钟分频^[7].由于单周期振荡的重要应用价值,使其研究备受瞩目.研究者研究了注入强度、波长失谐、反馈量以及偏置电流对其特性的影响,这四个参量都属于外部参量,研究表明通过调节外部参量可获得不同特性的单周期振荡输出^[8-11].此外,内部参量对半导体激光器非线性动态特性的影响也引起了研究者的广泛关注,例如, Liu 等人研究了载流子寿命、光子寿命和微分增益系数对半导体激光器动态特性的影响^[12],夏光琼等人则

研究了非线性增益对外部注入半导体激光器动态行为的影响^[13],潘炜等人研究了自发辐射因子对垂直腔面发射激光器的非线性行为的影响^[14], Hwang 等人研究了线宽增强因子对单周期振荡的影响^[15], Wiczorek 等人研究了倍周期分叉动态特性与线宽增强因子的关系^[16],并讨论比较了不同类型激光器的线宽增强因子对各自动力学特性的影响^[17]. Pochet 等人研究了线宽增强因子对量子点激光器的二倍周期及混沌行为的影响^[18].

在半导体激光器的诸多内部参量中,线宽增强因子是一个极其重要的参量,它表征了半导体激光器由于载流子密度起伏导致的线宽展宽和啁啾特性^[17,19].正是由于线宽增强因子的存在,半导体激光器的输出才会呈现各种非线性动力学现象,因此深入研究线宽增强因子对半导体激光器系统的影响具有重要的意义.本文数值模拟详细研究了线宽增强因子对光注入半导体激光器的非线性单周期特性的影响.结果表明,当线宽增强因子增大时,光注入半导体激光器可在较大范围内获得单周期振荡的非线性输出,而注入锁定的稳态输出则受到较大的抑制.定量分析了线宽增强因子的变化对非线性单周

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB327800)和国家自然科学基金(No. 60777041, No. 60927007)资助

第一作者:张明江(1976—),男,讲师,博士,主要研究方向为光通信中的关键技术与器件. Email: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

收稿日期: 2010-09-10; **修回日期:** 2010-12-03

期振荡光谱特性和振荡频率的影响,结果表明,随着线宽增强因子的增大,单周期振荡频率也随之增大.

1 物理模型

光注入对半导体激光器的影响可用下列包含注入项的速率方程来描述

$$\frac{dN_{1,2}(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV} - \frac{N_{1,2}(t)}{\tau_n} - g(N_{1,2}(t) - N_0) \frac{S_{1,2}(t)}{1 + \epsilon S_{1,2}(t)} \quad (1)$$

$$\frac{dS_{1,2}(t)}{dt} = \Gamma g(N_{1,2}(t) - N_0) \frac{S_{1,2}(t)}{1 + \epsilon S_{1,2}(t)} + 2 \frac{k_{inj}}{\tau_{in}} \sqrt{S_2(t - \tau_c) S_1(t)} \cos \xi(t) - \frac{S_{1,2}(t)}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta N_{1,2}(t)}{\tau_n} \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi_{1,2}(t)}{dt} = \frac{1}{2} \alpha \left[\frac{\Gamma g(N_{1,2}(t) - N_0)}{1 + \epsilon S_{1,2}(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right] - \frac{k_{inj}}{\tau_{in}} \sqrt{\frac{S_1(t - \tau_c)}{S_2(t)}} \sin \xi(t) \quad (3)$$

式中, N 、 S 和 φ 分别为半导体激光器的载流子密度、光子密度和电场的相位,下标 1,2 分别代表主激光器和从激光器. 式(2)和(3)的右边第二项代表注入项(主激光器的速率方程中不包含这一项). α 为线宽增强因子, g 为微分增益系数, N_0 为透明载流子密度, τ_n 为载流子寿命, τ_p 为光子寿命, τ_c 为外部注入光的传输时间, ϵ 为增益饱和系数, β 为自发辐射因子, Γ 是光场限制因子, $I(t)$ 为半导体激光器的抽运电流密度, V 为激光腔的有源区体积, e 为电荷电量, $\xi(t) = (\omega_2 - \omega_1)t$ 表示主、从激光器的频率失谐, $k_{inj} = (1 - R) \sqrt{r_p/R}$ 是衡量注入光强弱的一个参量, 式中 R 为从激光器输出端面的光强反射率, r_p 为主激光器发出的光功率和注入从激光器的光功率之比. 在数值模拟过程中, 两半导体激光器取相同的参量, 每个参量的取值见表 1.

表 1 模拟参量

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
α	1~10
g	$8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$
τ_n	$2.8 \times 10^{-9} \text{ s}$
V	$3.36 \times 10^{-16} \text{ m}^3$
e	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
τ_p	$1.21 \times 10^{-12} \text{ s}$
ϵ	$3.32 \times 10^{-23} \text{ m}^3$
β	1×10^{-5}
Γ	0.4
N_0	$0.58 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$
I_{th}	22 mA

2 结果和分析

半导体激光器和其它激光器系统主要的一个区别在于半导体激光器具有不为零的线宽增强因子, 其典型值一般在 1~10 之间^[20]. 不同材料体系和不同结构类型的半导体激光器的线宽增强因子各有不同, 例如, 对于 GaAlAs/GaAs 激光器而言, 横向条形结构(Transverse Junction Stripe, TJS)的线宽增强因子典型值为 6.7~8.3, 掩埋异质结(Buried Heterostructure, BH)结构典型值为 6.2 左右, 量子阱结构典型值为 1.5~1.7, 而对于 InGaAsP/InP 长波长激光器, BH 结构的线宽增强因子典型值为 4.6~8.0, 沟道衬底掩埋异质结(Channel-Substrate Buried Heterostructure, CSBH)结构的典型值为 3.7~6.4. 对于给定的半导体激光器, 其线宽增强因子是不变的, 但是, 对于不同的半导体激光器而言, 其线宽增强因子往往是各不相同的, 因此研究线宽增强因子对半导体激光器的非线性动力学特性的影响是具有现实意义的.

2.1 光注入半导体激光器的动力学特征分布

图 1 为光注入半导体激光器的线宽增强因子分别为 3 和 5 时的非线性动力学输出的状态图(P_1 为单周期; P_2 为倍周期; P_x 为其他周期; P_4 为四倍周

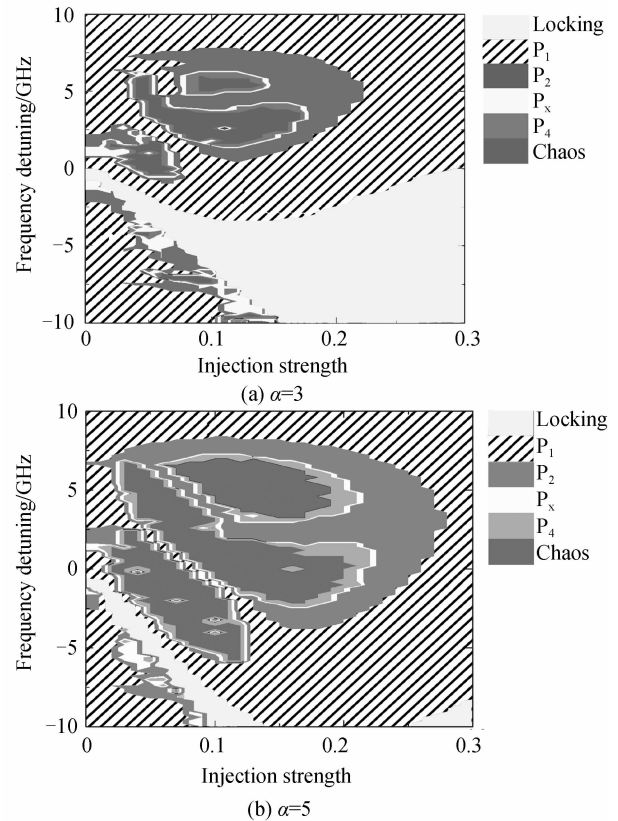


图 1 半导体激光器非线性动力学特性状态图

Fig. 1 Maps of the nonlinear dynamics of semiconductor laser

期).从图 1(a)中可以看出,当线宽增强因子一定时,激光器的振荡状态对注入光的强度和频率失谐量极为敏感,随着注入强度和注入光频率失谐的不同,半导体激光器会呈现不同的振荡状态,且这些状态不对称的分布在正负失谐范围内,可以发现在正失谐区域激光器的输出非线性现象更为丰富.此外可以发现,在注入强度较低的区域,随着注入光频率失谐量的不同,半导体激光器的输出几乎包含了单周期振荡、倍周期振荡、四倍周期振荡、混沌和其他周期振荡等全部的非线性特征,而在注入强度较大时,则主要表现为单周期振荡和注入锁定的稳态输出.

当改变激光器的线宽增强因子时,比较图 1(a)和图 1(b)可以看出,线宽增强因子仅从 3 增大至 5,激光器的非线性输出就发生了显著的变化:在负失谐范围内单周期振荡区域显著增大,极大地抑制了注入锁定的稳态输出,而混沌和倍周期输出的范围增大了近一倍.可以看出随着线宽增强因子的增大,光注入半导体激光器的输出状态越不稳定,即激光器容易工作在非线性动力学状态下.从物理本质上来看,半导体激光器的线宽增强因子连接和反映了激光器中光场强度和相位的相互作用关系,因此线宽增强因子的不同必然会导致半导体激光器输出稳定性的显著变化.比较图 1(a)和图 1(b)可以看出,即使当注入光的强度和频率失谐一定时,由于半导体激光器的线宽增强因子的不同,也可能导致半导体激光器输出不同的状态.

2.2 线宽增强因子对非线性单周期振荡的影响

从图 1 可以看出,单周期振荡和混沌两个状态在非线性动力学特性图中所占据的区域比例最大,亦即这两个状态极易获得和控制.而且这两种状态的应用也最为广泛^[9-15].关于混沌的特性,已在文献[7]中做过研究,本文着重讨论线宽增强因子对单周期振荡特性的影响.

光注入半导体激光器,由于拍频效应产生了单周期振荡,当调节注入光的强度和频率失谐时,单周期振荡在较大的范围内均能实现,并且从图 1 可以看出,随着线宽增强因子的增大,能够实现单周期振荡的范围也在增大.图 2 是当注入强度不同时输出的单周期振荡的光谱图,其中灰色线和黑色线分别表示线宽增强因子为 3 和 5 时输出的情况.图中 f_i 是注入信号光的光频, f_c 是激光器频率($f_c=0$ 时,为激光器自由振荡频率),由于外光注入 f_c 会发生红移, f_o 是由 f_c 与 f_i 拍频产生的光频差, $f_o=f_c-f_i$,此即为单周期振荡的频率.从图 2(a)~(c)可以看出,当频率失谐不变时,随着注入光的强度的增

大, f_o 也不断增加,即产生的单周期振荡的频率在增加.这是由于随注入强度的增大,产生的红移量在增大.当线宽增强因子分别为 3 和 5 时进行比较可得,线宽增强因子越大, f_o 越高.

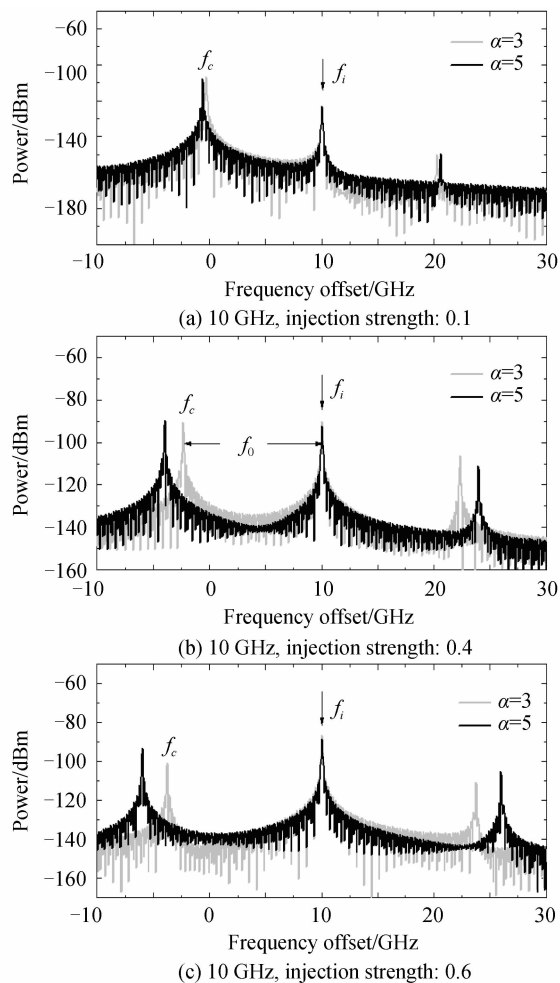


图 2 注入光强度对单周期振荡光谱的影响
Fig. 2 Dependence of the periodical oscillation optical spectra on the injection strength

图 3 为当注入光的强度不变时,频率失谐对单周期振荡的影响.如图 3(a)~(c),当线宽增强因子分别为 3 和 5 时进行比较可得,在相同的条件下,线宽增强因子越大,则所得到的单周期振荡的频率 f_o 越高.随着注入频率失谐的增加, f_o 也增加.

图 4 是线宽增强因子分别为 3, 4, 5 时,注入光强度和注入光频率失谐对单周期振荡输出的微波频谱中频率 f_o 的影响.当线宽增强因子不变时,由图 4(a)可以看出,当注入光强度为 0.3 时,随着频率失谐的增加, f_o 在不断增加;由图 4(b)可以看出,随着注入光强度的增大, f_o 增加.结果与图 3 光谱所得出的结论一致.图 4(b)同时显示了线宽增强因子越大,则单周期振荡频率对注入强度的变化越敏感,单周期振荡频率的增加速度越迅速,可以看出当注入强度系数超过 3 时,代表不同线宽增强因子的三条曲线已显著分离开来.

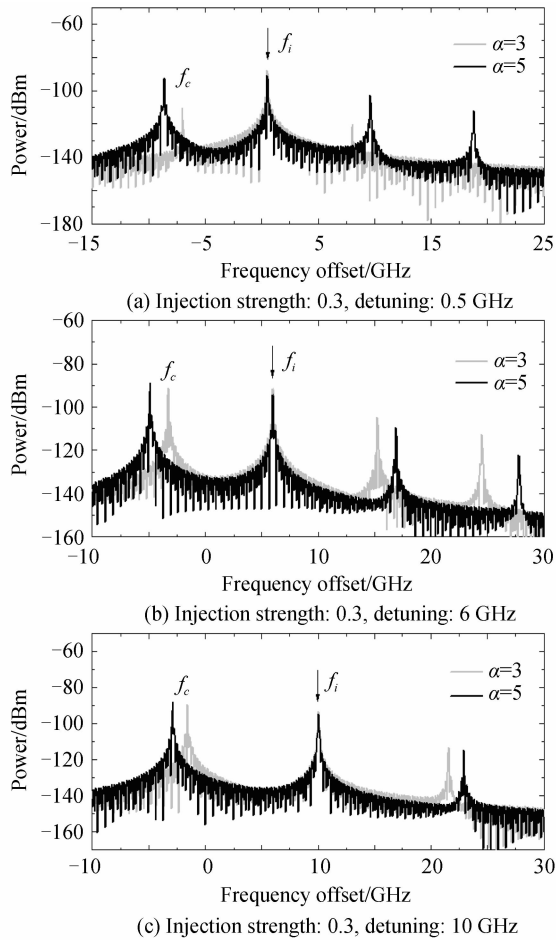


图3 注入光频率失谐对单周期振荡光谱的影响
Fig. 3 Dependence of the periodical oscillation optical spectra on the frequency detuning

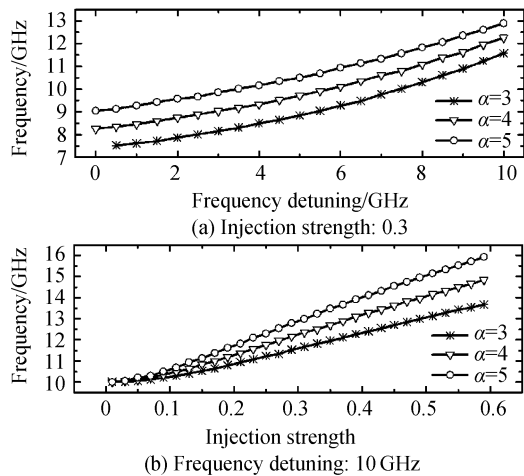


图4 频率失谐和注入强度对单周期振荡频率的影响
Fig. 4 Dependence of the period one oscillating frequency on the frequency detuning and injection strength

图5是当注入光强度和频率失谐一定时,激光器线宽增强因子对单周期振荡频率 f_0 的影响.三条曲线代表在不同的注入光强度和频率失谐时的情况,例如,(0.4,10)表示注入光强度系数为0.4,频率失谐为10 GHz.半导体激光器线宽增强因子的典型取值为1~10.从图中可以看出,当注入光强度和频率失谐不变时,随着半导体激光器线宽增强因子

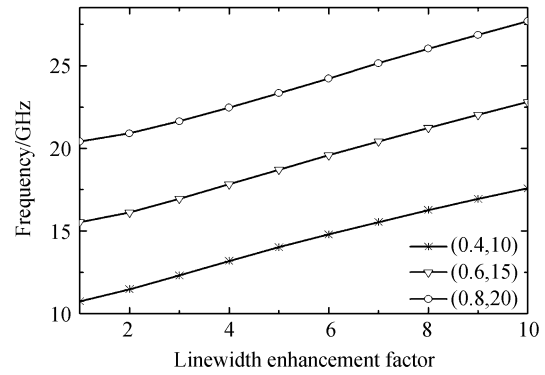


图5 线宽增强因子对单周期振荡频率的影响
Fig. 5 The dependency of period-one oscillating frequency on the linewidth enhancement factor

的增加,单周期振荡的频率 f_0 也随之增加.

3 结论

本文利用光注入半导体激光器速率方程组,数值模拟了半导体激光器的线宽增强因子对激光器输出动态特性的影响.结果发现,半导体激光器的线宽增强因子是影响激光器输出稳定性的一个重要参量,线宽增强因子越大,光注入半导体激光器越容易在较大的注入强度和频率区域内获得单周期振荡和混沌的非线性动力学现象.分析了线宽增强因子对单周期振荡光谱特性以及输出频率的影响,结果表明,随着线宽增强因子的增大,单周期振荡的频率增大.根据应用的不同可选择不同参量的线宽增强因子的半导体激光器,如当应用于光生微波时,可选择线宽增强因子较大的半导体激光器,从而可获得频率高达近百吉赫兹的微波输出.研究结果对于半导体激光器非线性单周期振荡的应用具有一定的指导意义.

参考文献

- [1] SIMPSON T B. Mapping the nonlinear dynamics of a distributed feedback semiconductor laser subject to external optical injection[J]. *Opt Commun*, 2003, **215**(2): 135-151.
- [2] LIN F Y, LIU J M. Nonlinear dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback[J]. *Opt Commun*, 2003, **221**(2): 173-180.
- [3] LAWRENCE J S, KAN D M. Nonlinear dynamics of a laser diode with optical feedback systems subject to modulation[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, **38**(2): 185-192.
- [4] LI Xiao-feng, PAN Wei, LUO Bin, et al. Theoretical study on nonlinear dynamics of vertical-cavity surface-emitting laser with multiple external optical feedbacks[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, **31**(12): 1450-1454.
李孝峰,潘伟,罗斌,等.多次光反馈下垂直腔面发射激光器非线性动态特性理论研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1450-1454.
- [5] CHAN S C, HWANG S K, LIU J M. Period-one oscillation for photonic microwave transmission using an optically injected semiconductor laser[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(22): 14921-14935.
- [6] CHAN S C, HWANG S K, LIU J M. Radio-over-fiber AM-

- to-FM up conversion using an optically injected semiconductor laser[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(15): 2254-2256.
- [7] LI Jin-xia, ZHANG Ming-jiang, NIU Sheng-xiao, *et al.* Control the period-one oscillation for all-optical clock division and clock recovery by optical pulses injection semiconductor laser[J]. *Chinese Phys B*, 2008, **17**(12): 4516-4522.
- [8] ERIKSSON S. Dependence of the experimental stability diagram of an optically injected semiconductor laser on the laser current[J]. *Opt Commun*, 2002, **210**(3): 343-353.
- [9] WANG A B, WANG Y C, WANG J F. Route broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection[J]. *Opt Lett*, 2009, **34**(8): 1144-1146.
- [10] CHAN S C, LIU J M, WHITE J K. Characteristics of period-one oscillations in semiconductor lasers subject to optical injection [J]. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2004, **10**(5): 974-981.
- [11] YAN Sen-lin. Studies on bifurcation and period in semiconductor laser due to optical injection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 996-1001.
颜森林. 光注入半导体激光器分岔与周期研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 996-1001.
- [12] HWANG S K, LIU J M. Dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser [J]. *Opt Commun*, 2000, **183**(3): 195-205.
- [13] ZHONG Dong-zhou, XIA Guang-qiong, WU Zheng-mao. Influence of nonlinear gain on the dynamics of external injection semiconductor lasers[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(4): 516-518.
钟东洲, 夏光琼, 吴正茂. 非线性增益对外部注入半导体激光器动态行为的影响[J]. *光学技术*, 2005, **31**(4): 516-518.
- [14] LI Xiao-feng, PAN Wei, LUO Bin, *et al.* Effect of spontaneous emission factor on the nonlinear behaviors of VCSELs with multiple external optical feedbacks[J]. *J of Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(5): 524-527.
李孝峰, 潘炜, 罗斌, 等. 自发辐射因子对外光反馈下 VCSELs 非线性行为的影响[J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(5): 524-527.
- [15] HWANG S K, LIANG D H. Effects of linewidth enhancement factor on period-one oscillations of optically injected semiconductor lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**(6): 061120(1)-061120(3).
- [16] WIECZOREK S, CHOW W W. Global view of nonlinear dynamics in coupled-cavity lasers—a bifurcation study[J]. *Opt Commun*, 2005, **246**(4): 471-493.
- [17] WIECZOREK S, KRAUSKOPF B, SIMPSON T B, *et al.* The dynamical complexity of optically injected semiconductor lasers[J]. *Phys Report*, 2005, **416**(1): 1-128.
- [18] POCHET M, NADERI N A, TERRY N, *et al.* Dynamic behavior of an injection-locked quantum-dash Fabry-Perot laser at zero detuning[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(23): 20623-20630.
- [19] LIU G, JIN X, CHUANG S L. Measurement of linewidth enhancement factor of semiconductor lasers using an injection-locking technique[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, **13**(5): 430-432.
- [20] CHAN S C, DIAZ R, LIU J M. Novel photonic applications of nonlinear semiconductor laser dynamics[J]. *Opt Quant Electron*, 2008, **40**(2): 83-95.

Effects of Linewidth Enhancement Factor on the Nonlinear Period-one Oscillation of a Semiconductor Laser with External Optical Injection

ZhANG Ming-jiang^{1, 2}, LIU Tie-gen¹, LI Jing-xia², WANG Yun-cai²

(1 *Tianjin University, a. Key Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science, Ministry of Education, b. College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin 300072, China*)

(2 *Institute of Optoelectronic Engineering, Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China*)

Abstract: The linewidth enhancement factor is one of the key parameters for semiconductor lasers. The value of linewidth enhancement factor is different in kinds of type semiconductor lasers. The dependency of the nonlinear period-one oscillation in optically injected semiconductor on the linewidth enhancement factor was numerically investigated, with the single-mode rate-equation of optical injection semiconductor laser. The results show that linewidth enhancement factor strongly affect the dynamical behavior of the system. As the linewidth enhancement factor increases, the range of the period-one oscillation and its frequency increase, and the injection locking stable state is suppressed greatly. Moreover, the optical spectrum and frequency of the period-one oscillation were investigated. The results reveal that the frequency of the period-one oscillation increases as the linewidth enhancement factor, injection strength and frequency detuning increasing.

Key words: Semiconductor laser; Nonlinear dynamics; Linewidth enhancement factor; Chaos; Period oscillation