

光注入提高半导体激光器混沌载波发射机的带宽^{*}

王云才[†] 张耕玮 王安帮 王冰洁 李艳丽 郭 萍

(太原理工大学物理系,太原 030024)

(2006 年 12 月 18 日收到,2007 年 4 月 3 日收到修改稿)

外光反馈下的半导体激光器可视为混沌载波发射机.数值研究发现,外部强光注入可以显著提高混沌载波发射机的带宽,带宽提高的程度在一定范围内与注入光的强度成正比.当外部光注入系数 $k_{inj} = 0.39$ 时,混沌载波的带宽由无光注入时的 2.7 GHz 增大到 14.5 GHz,提高了 5 倍多.研究还发现,在相同的注入强度条件下,当注入光的频率比半导体激光器的中心频率高 2—4 GHz 时,可实现最大限度的带宽增强.此外,适当提高半导体激光器的偏置电流也可以在一定程度上提高其产生的混沌载波的带宽.

关键词:半导体激光器,混沌,带宽

PACC: 0545, 4255P, 4265T

1. 引 言

近年来,混沌在保密通信领域中的应用受到越来越广泛的关注^[1-10],混沌同步系统也从最初的混沌电路实现^[2]发展到目前的激光器实现^[3-10].利用不同的激光器实现混沌保密通信成为一个研究热点^[3-7],如利用多模固体 Nd:YAG 激光器^[3-5]、非线性光纤环振荡器系统^[6]、掺铒光纤激光器^[7]等均实现了激光混沌通信.半导体激光器由于具有在外光反馈或外光注入下容易实现混沌光输出、易于封装且广泛地应用于现代光通信系统等诸多优点,而成为混沌激光保密通信系统中载波发射机和接收机的首选器件^[8-16].Argyris 等^[11]将半导体激光器的结构参数作为密钥,在 120 km 的商用光通信网络中实现了传输速率为 1 Gbit/s、误码率为 10^{-7} 的混沌保密通信.文献 [12] 利用混沌载波实现了视频信号的保密传输.在数据通信中,数据保密与高速传输是两个最为核心的技术指标.2002 年, Kusumoto 等^[13]用两个中心波长为 780 nm 的半导体激光器实现了 1.5 GHz 正弦信号的混沌保密通信;2005 年, Paul 等^[14]实现了信号带宽为 3.5 GHz 的混沌保密通信.实际上,混沌保密通信中信号的传输速率取决于混沌载波的带宽.因此,提高混沌载波带宽是实现高速混沌激光保

密通信的必由之路,但是到目前为止,仅有少数学者对混沌保密通信中混沌信号的载波带宽进行了研究. Takiguchi 等^[15]模拟发现注入锁定可产生 8 GHz 带宽的混沌载波信号; Murakami 等^[16]在研究处于混沌同步的半导体激光器的滤波特性时发现,作为接收器的半导体激光器对混沌载波和信号光的接收响应峰值出现在半导体激光器的弛豫振荡频率处,认为混沌载波带宽与半导体激光器的弛豫振荡频率有关,而弛豫振荡频率又与半导体激光器的最大调制带宽有关.在早期的对增益开关半导体激光器的调制带宽的研究中,已发现可以利用外光注入来提高半导体激光器的调制带宽^[17-19],注入光的强度^[17,18]、频率失谐^[19]等因素对最大调制频率有决定性的影响.本文研究了外光注入增强混沌载波发射机发射带宽的方法,通过数值模拟发现,提高混沌载波半导体激光器发射机的偏置电流可产生宽带混沌载波,利用外光注入也可以增强混沌载波发射机的带宽,只有适当的正频率失谐才可以更加有效地增强发射机的带宽,这与弛豫振荡频率^[20]或者调制带宽^[21]随频率失谐的变化有所不同.

2. 理论分析

图 1 为通过外部光注入增强半导体激光器混沌

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60577019)资助的课题.

[†] E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

载波发射机带宽的装置示意图.混沌载波发射机由半导体激光器 LD1 和一个反射系数可调的反射镜组成,如图 1 中的虚线框所示.在一定的条件(如反馈光强度、LD1 的工作电流等)下,LD1 作为非线性器件输出光功率随机变化的混沌信号.在混沌保密通信中,此混沌信号将作为混沌载波用于隐藏所要传送的信息.图 1 中另一个半导体激光器 LD2 作为外部注入光光源,其输出的连续光经过光隔离器以及分束器后注入到 LD1 中.下面我们将分析外部连续光注入对混沌载波发射机带宽的影响(在研究偏置电流对带宽的影响时,不考虑外光注入对发射机的影响,即注入光功率为零).

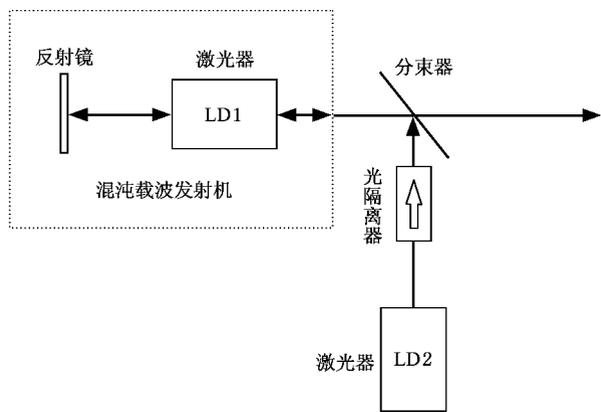


图 1 外光注入增强混沌载波发射机带宽实验装置示意图

光注入对半导体激光器的影响可用下列包含注入项和反馈项的单纵模速率方程来描述:

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

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

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

这里 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 分别代表半导体激光器 LD1 和 LD2.(2)和(3)式的后两项分别对应于反射镜引入的光反馈和半导体激光器 LD2 提供的光注入(LD2 的速率方程中不包含这两项). 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_p 为光子寿命, τ_n 为载流子寿命; $K(t)$ 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, q 为电荷电量. $\theta(t) = \omega_1 \tau + \phi(t) - \phi(t - \tau)$ 反映了反馈光引入的相位延迟, τ 为反馈光引入的传播时间; $\xi(t) = \omega_2 \tau + \phi(t) - \phi(t - \tau_c) + (\omega_2 - \omega_1)t$ 表示外部注入光引入的相位延迟, τ_c 为外部注入光的传输时间; $\Delta\nu = (\omega_2 - \omega_1)(2\pi)$ 是 LD2 与 LD1 的频率差,又称频率失谐. k_{inj} 是衡量注入光强弱的一个参量,表示注入光的强弱; k_f 是衡量反馈光强弱的一个参量,表示反馈光的强弱. k_{inj} 和 k_f 可表示如下:

$$k_{inj} = (1 - R) \sqrt{\frac{r_p}{R}}, \quad (4)$$

$$k_f = (1 - R) \sqrt{\frac{r_{er}}{R}}, \quad (5)$$

式中 R 为激光器 LD1 输出端面的光强反射率, r_p 为 LD2 发射的光功率与注入到 LD1 的光功率之比, r_{er} 为反射镜的光强反射率.

我们首先分析在固定的反馈功率、没有外光注入时混沌载波发射机的带宽与半导体激光器偏置电流之间的关系,然后研究外光注入的功率及频率失谐对混沌载波发射机带宽的影响.在数值模拟过程中,两半导体激光器取相同的参数,各参数的取值^[22]如下: $\alpha = 5.5$, $g = 2.1 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{s}$, $\tau_n = 2 \times 10^{-9} \text{ s}$, $V = 1.5 \times 10^{16} \text{ m}^3$, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $\tau_p = 1.9 \text{ ps}$, $N_0 = 3 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $\tau_{in} = 9 \text{ ps}$, $I_{th} = 12 \text{ mA}$, $\epsilon = 0$, $\beta = 1 \times 10^{-5}$, $\Gamma = 0.4$, $R = 0.31$, $\tau_c = \tau = 1 \text{ ns}$.

3. 偏置电流对混沌载波发射机带宽的影响

当无光注入时,半导体激光器 LD1 在适当的反馈水平($k_f = 0.1$)下输出混沌信号.图 2(a)(b)为 $I_b = 1.2I_{th}$ 时混沌载波发射机产生的混沌信号的时序图和功率谱;图 2(c)(d)分别为 $I_b = 1.5I_{th}$ 时输出信号的时序图和功率谱.从图 2 可以看出,提高偏置

电流后发射机仍然输出混沌信号,但得到的载波带宽却由 1.7 GHz 增大到 5.3 GHz(对于混沌载波的功率谱,对其进行拟合从而得到较光滑的响应曲线,从

中求出其 3 dB 带宽),可见适当增大半导体激光器的偏置电流可以提高发射机的带宽.

图 3 给出了混沌载波发射机的带宽在不同反馈

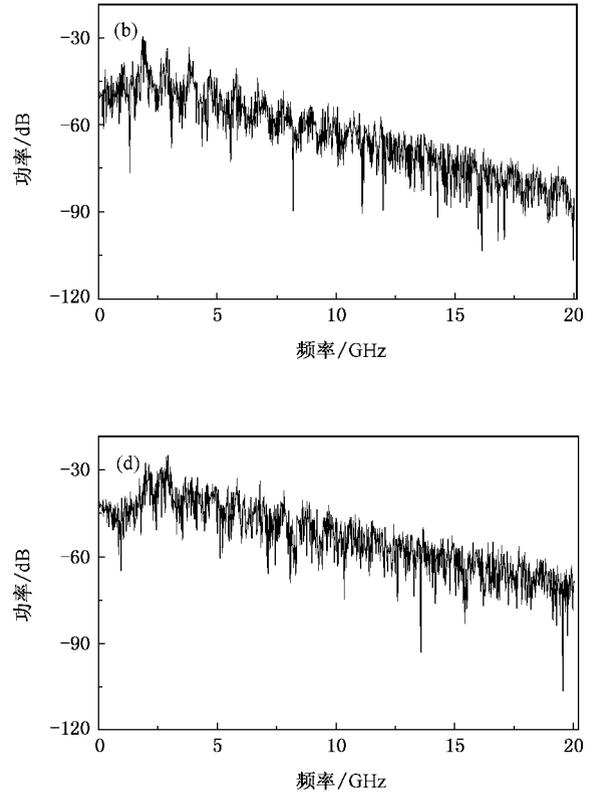
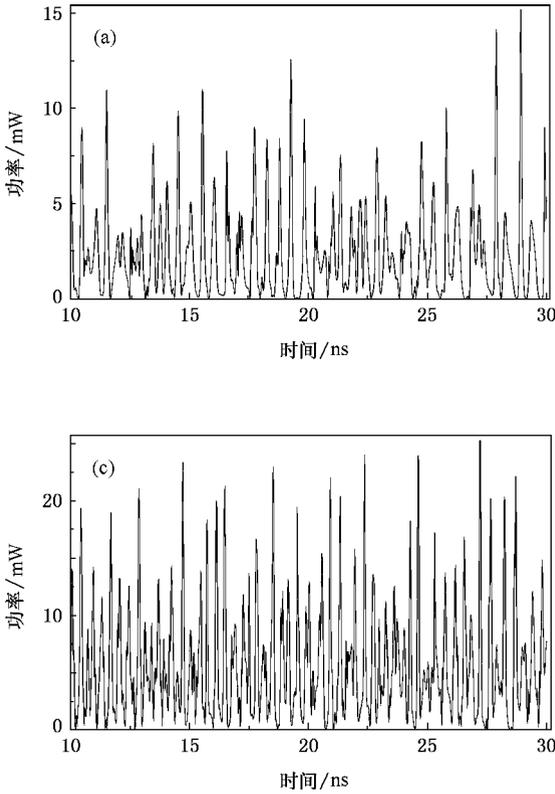


图 2 不同偏置电流下混沌载波发射机产生的混沌载波时序图及功率谱 (a) $I_b = 1.2I_{th}$ 时产生的混沌信号的时序图 (b) $I_b = 1.2I_{th}$ 时的功率谱 (c) $I_b = 1.5I_{th}$ 时的时序图 (d) $I_b = 1.5I_{th}$ 时的功率谱

强度 ($k_f = 0.08, 0.09$) 下随偏置电流的变化曲线. 从图 3 可以看出, 带宽的变化呈递增趋势. 在同样的反馈水平下 ($k_f = 0.08$), 当偏置电流从 $1.1I_{th}$ 提高到

$1.5I_{th}$ 时, 混沌载波发射机的 3 dB 带宽从 0.93 GHz 提高到 3.4 GHz, 是原来的 3.7 倍; 当反馈系数提高到 0.09 时, 混沌载波发射机的带宽随偏置电流的增加而从 1.3 GHz 提高到 3.5 GHz, 是原来的 2.7 倍. 这种递增的趋势与弛豫振荡频率随偏置电流的变化以及调制带宽随偏置电流的变化趋势^[14] 相类似. 由此可见, 偏置电流的增加也可以增大混沌载波发射机带宽. 但是混沌信号的 Lyapunov 指数却并不是随偏置电流的增加而一直增大, 而是在特定的偏置电流时呈现出较大值. 所以, 为了获取混沌状态较好且大带宽的混沌载波, 有必要选择合适的偏置电流.

4. 光注入对混沌载波发射机带宽的影响

数值模拟发现, 当半导体激光器 LD1 的偏置电流在 $1.2I_{th} \sim 1.3I_{th}$ 之间时, 得到的混沌信号的最大 Lyapunov 指数较大, 混沌信号的关联维数较高, 因此在以下研究中取 LD1 的偏置电流为 $1.2I_{th}$. 根据表 1

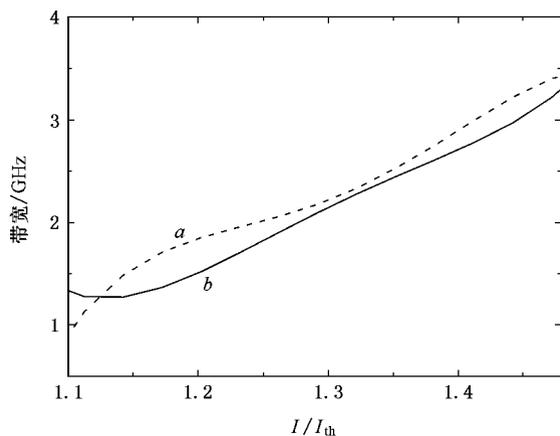


图 3 混沌载波发射机的带宽随偏置电流的增加而提高. 曲线 a 为 $k_f = 0.08$, 曲线 b 为 $k_f = 0.09$

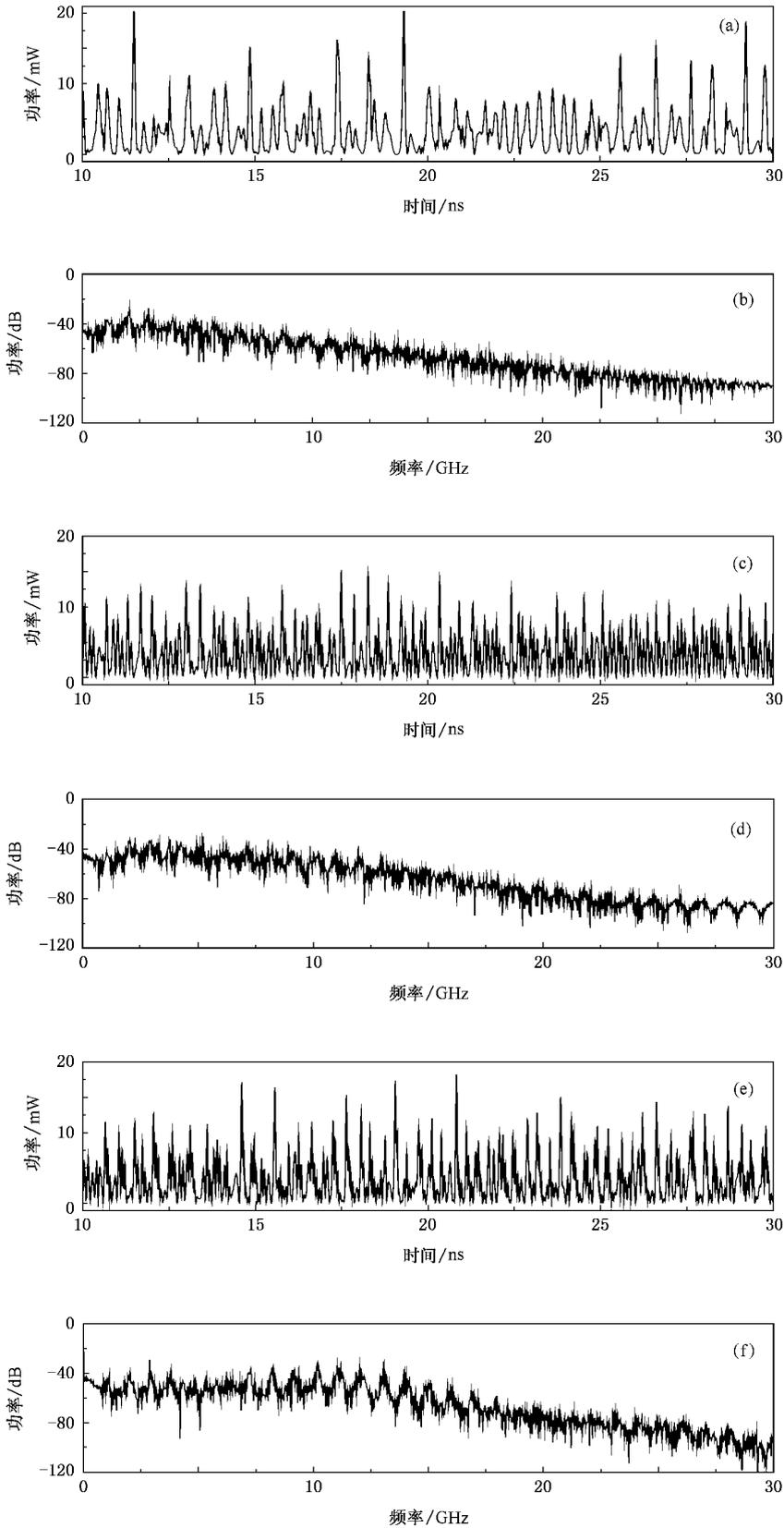


图4 不同注入强度下混沌信号的功率时序图及功率谱 (a)和(b)为无外光注入时混沌信号光功率的时序图和功率谱, (c)和(d)为 $k_{inj} = 0.21$ 时的时序图和功率谱 (e)和(f)为 $k_{inj} = 0.37$ 时的时序图和功率谱

的参数,我们计算得到此时半导体激光器 LD1 的弛豫振荡频率约为 1.6 GHz.当反馈强度 $k_f = 0.12$ 时,混沌载波发射机产生的混沌信号的时间序列及功率谱如图 4 所示.图 4(a)(b)是无外光注入时混沌信号的时序图及功率谱,此时混沌载波发射机的带宽约为 2.7 GHz.图 4(c)(d)为注入系数 $k_{inj} = 0.21$ 时混沌载波发射机产生的混沌信号相应的时序图及功率谱.根据图 4(d)可计算出此时混沌载波发射机的 3 dB 带宽为 9.1 GHz.图 4(e)(f)是 $k_{inj} = 0.37$ 时的时序图以及相应的功率谱,图 4(f)对应的混沌载波发射机的 3 dB 带宽为 13.2 GHz.比较图 4(b)(d), (f)发现当强光注入后,混沌载波发射机的带宽随着注入外光功率的增加而增加.同时,混沌载波发射机输出的混沌信号的频谱变得不平滑,出现多个谐波峰值,随着注入系数 k_{inj} 的增大,混沌信号频谱的响应峰右移,所对应的峰值频率增加.

不同强度的外光注入下混沌载波发射机带宽的变化趋势如图 5 所示.从图 5 可以看出,半导体激光器产生的混沌载波带宽随着注入光强度的增加而增加,当注入系数 $k_{inj} = 0.39$ 时,发射机的带宽可达到 14.5 GHz,是无光注入时半导体激光器产生的混沌载波带宽的 5.4 倍.注入光功率继续增大,半导体激光器不再输出混沌信号而出现注入锁定.

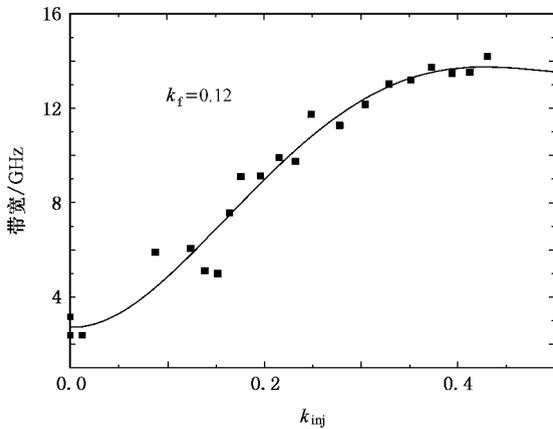


图 5 外光注入光功率对混沌载波发射机带宽的影响

数值研究还发现,当外部注入光的波长与混沌载波的波长不一致时,即存在频率失谐时,甚至可以更有效地增强混沌载波发射机的带宽.在注入系数 $k_{inj} = 0.31$ 的情况下,我们分别研究了频率失谐 $\Delta\nu$ 为 -2 和 3 GHz 时混沌载波的带宽情况.在 -2 GHz

的频率失谐下,混沌载波发射机产生的混沌信号的带宽由无失谐时的 10 GHz 降低为 8.8 GHz;在 3 GHz 的频率失谐下,混沌载波发射机产生的混沌信号的带宽由 10 GHz 增大到 13 GHz.这说明注入光的频率失谐对改变混沌载波发射机的带宽有明显影响.图 6 给出了混沌载波发射机的带宽在三个不同的注入强度下对光频率失谐的依赖关系.发现最大带宽并未出现在零失谐处,而是只有当注入光的频率比混沌载波发射机的光源 LD1 中心频率高 2—4 GHz 时,才能得到最大带宽的混沌载波.由此可见,采取适当的正失谐,可以更加有效地增大混沌载波的带宽.同时也可以看到,在相同的频率失谐下,注入强度越大,混沌载波的带宽也越大,这与由图 5 得出的结论一致.

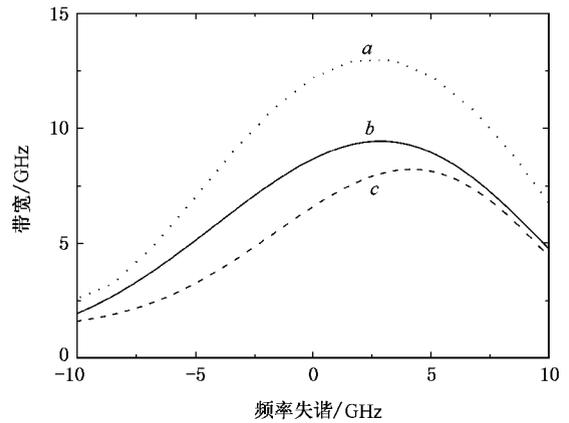


图 6 频率失谐对混沌载波发射机带宽的影响 曲线 a 为 $k_{inj} = 0.31$, 曲线 b 为 $k_{inj} = 0.19$, 曲线 c 为 $k_{inj} = 0.15$

5. 结 论

本文通过对半导体激光器单模速率方程组的数值模拟,发现提高半导体激光器的偏置电流能够增大混沌载波发射机的带宽,并且带宽随着偏置电流的增强而增大.通过外部注入连续光也能够提高发射机所产生的混沌信号的带宽,随着注入光光强的增加,发射机的带宽也随之增大,直至半导体激光器的输出不再呈混沌状态.当注入光与混沌载波存在一定的频率失谐时,可以产生较大带宽的混沌载波,而且最大混沌信号的带宽出现在频率失谐为 2—4 GHz 处.这几种增强混沌载波发射机带宽的方法为实验实现宽带高速混沌保密通信提供了启迪.



- [1] Pecora L M , Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Morgul O , Feki M 1999 *Phys. Lett. A* **251** 169
- [3] Wu L , Zhu S Q 2003 *Phys. Lett. A* **308** 157
- [4] Wu L , Zhu S Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 300
- [5] Zhou Y , Wu L , Zhu S Q 2005 *Chin. Phys.* **14** 2196
- [6] Ramos R V , Souza R F 2001 *Opt. Commun.* **22** 90
- [7] Zhang F , Chu P L 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 3334
- [8] 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]
- [9] 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]
- [10] 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]
- [11] Argyris A , Syvridis D , Larger L , Lodi V A , Colet P , Fischer I , Ojalvo J G , Mirasso C R , Pesquera L , Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [12] Lodi V A , Benedetti M , Merlo S , Norgia M , Provinzano B 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1995
- [13] Kusumoto K , Ohtsubo J 2002 *Opt. Lett.* **27** 989
- [14] Paul J , Lee M W , Shore K A 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 920
- [15] Takiguchi Y , Ohyagi K , Ohtsubo J 2003 *Opt. Lett.* **28** 319
- [16] Murakami A , Shore K A 2005 *Phys. Rev. A* **72** 053810
- [17] Simpson T B , Liu J M , Gavrielides A 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 709
- [18] Yabre G 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 2367
- [19] Simpson T B , Liu J M 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 1322
- [20] Jones R J , Spencer P S , Shore K A 2000 *J. Mod. Opt.* **47** 1977
- [21] Hwang S K , Liu J M , White J K 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 972
- [22] Langley L N , Shore K A 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 434

Bandwidth enhancement of semiconductor laser as a chaotic transmitter by external light injection *

Wang Yun-Cai[†] Zhang Geng-Wei Wang An-Bang Wang Bing-Jie Li Yan-Li Guo Ping

(Department of Physics , Taiyuan University of Technology , Taiyuan 030024 , China)

(Received 18 December 2006 ; revised manuscript received 3 April 2007)

Abstract

A semiconductor laser that generates a chaotic signal with optical feedback can be treated as a chaotic transmitter. Based on single mode rate equations of semiconductor laser with optical feedback and external injection , the numerical simulation shows that the bandwidth of the transmitter is expanded by external optical injection . When the injection index k_{inj} is 0.39 , the bandwidth is increased from the value of 2.7 GHz without optical injection to 14.5 GHz. The results also reveal that , under the same injection strength , the enhancement of bandwidth depends evidently on the frequency detuning between the external injection laser diode and the chaotic carrier transmitter. The maximum bandwidth of the chaotic transmitter can be obtained when the frequency detuning is in the range from 2 to 4 GHz. The bandwidth of the chaotic transmitter can also be enhanced by increasing the bias current .

Keywords : semiconductor laser , chaos , bandwidth

PACC : 0545 , 4255P , 4265T

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60577019).

[†] E-mail : wangyc@tyut.edu.cn