

交叉相位调制提高半导体激光器混沌 载波发射机带宽方法*

颜森林[†]

(南京晓庄学院物理与电子工程系, 南京 210017)
(2009 年 1 月 20 日收到; 2009 年 2 月 21 日收到修改稿)

提出半导体激光器混沌交叉相位调制(XPM)光反馈提高混沌载波发射机带宽方法,建立了有外腔光纤传输反馈 XPM 控制下的激光动力学物理模型. 理论导出 XPM 作用下激光双反馈频率失谐公式,指出 XPM 产生的非线性相移影响了激光器增益和线宽增强因子,其光纤二阶非线性效应使激光振幅和相位变化更加丰富,而非线性相移的出现进一步增加了新的频率分量并使频谱展宽. 数值结果表明, XPM 使激光器混沌带宽增加到 4 倍以上,使激光混沌张弛振荡频率增加到 2.85 倍,其光纤长度、入纤光功率、面镜反射系数、光纤二阶非线性系数等都能影响激光混沌带宽.

关键词: 混沌, 半导体激光器, 交叉相位调制, 带宽

PACC: 0545, 4255P, 4265T

1. 引 言

混沌是自然界普遍存在的一种非线性变化现象,具有对初值条件敏感特性,其变化具有随机特点,信号具有类白噪声谱特点,其长期行为是难以预测的^[1,2]. 所以,近年来混沌在保密通信中的应用越来越受到人们的广泛关注. 而激光混沌具有高的频率和宽的频谱,更为研究者所重视,利用不同的激光器实现混沌保密通信已成为一个研究热点^[3-8],如利用多量子阱激光器、多模固体 Nd:YAG 激光器、掺铒光纤激光器等均实现了激光混沌通信. 光反馈或光注入半导体激光器具有容易实现混沌激光输出且易于封装等优点,已成为激光混沌保密通信中载波发射机和接收机的首选器件^[9-16]. 文献[11]将半导体激光器的结构参数作为密钥已在光网络中实现了传输速率为 1 Gbit/s 的混沌保密通信. 目前又有信号带宽为 3.5 GHz 的混沌保密通信系统^[14]. 在保密通信中,数据高速传输是最为核心的技术指标之一. 提高混沌载波带宽是实现高速混沌激光保密通信的重要手段,目前主要有注入锁定增加激光混沌载波信号带宽等方法^[15-18]. 本文主要

研究通过外腔光纤交叉相位调制(XPM)提高混沌激光载波发射机发射带宽的方法. 利用的物理机制如下:当两束具有相同(或者不同)波长的光在光纤内沿相反方向传输时,前向波和反向波可以通过 XPM 发生相互作用,这种 XPM 互相作用常会产生新的非线性相移及新的不稳定性等^[19-21]. 所以,利用 XPM 的非互易性研究增强混沌激光载波发射机发射带宽是一个新的方法.

2. 理论模型

外腔延时反馈半导体激光器在实验和理论上已被广泛研究. 由于延时反馈作用,激光会呈现出许多复杂的不稳定动力学现象,如常会呈现出分岔、混沌等许多复杂的动力学行为,其激光动力学方程组为^[6-10]

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}(G - \gamma_p)A(t) + \frac{k}{\tau_L}A(t - \tau) \times \cos[\phi(t) - \phi(t - \tau) + \omega_0\tau], \quad (1a)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G - \gamma_p) - \frac{k}{\tau_L} \frac{A(t - \tau)}{A(t)} \times \sin[\phi(t) - \phi(t - \tau) + \omega_0\tau] + \Delta\omega, \quad (1b)$$

* 江苏省高等学校自然科学基金基础研究计划(批准号: 08KJ510019)资助的课题.

[†] E-mail: senlinyan@163.com

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \gamma_c N - G V_p A^2(t). \quad (1c)$$

这里, A 和 ϕ 是激光场振幅和相位; N 是激光载流子数; $G = (\Gamma v_g a/V)(N - N_{th}) / \sqrt{1 + A^2/A_s^2}$ 是模式增益, 其中 v_g 是光子群速度, a 是增益常数, $\Gamma = V/V_p$ 是压缩和限制因子, V 是腔体积, V_p 是激光模式体积, A_s 是饱和光子场强, $N_{th} = n_{th} V$ 是激光透明时的载流子数, n_{th} 是它的密度值; $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{int})$ 是光子损耗速率, 其中 α_m 是腔光子损耗, α_{int} 是内部光子损耗; I 是驱动电流; q 是单位电荷; β_c 是光线宽增强因子; $\gamma_c = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$ 是载流子非线性损耗速率, 其中 A_{nr} 是非辐射复合速率, B 是辐射复合因子, C 是俄歇复合因子; k 是光反馈系数; $\tau_L = 2n_g L/c$ 是光在激光器腔长 L 内来回一周的时间, 其中 c 是真空中的光速, $n_g = c/v_g$ 是激光器群速折射率; τ 是激光在外腔中传输延时时间; ω_0 是激光中心频率; $\Delta\omega$ 是反馈引起的激光频率失谐。

设计的外腔延时光反馈激光器光纤传输反馈 XPM 增强激光混沌载波带宽模块如图 1 所示, 其中 A_+ 是激光器输出的激光在光纤中前向传输波, A_- 是经过面镜反射后在光纤中传输的反向传输波. 我们知道, 当两束具有相同(或者不同)波长的光在光纤内沿相反方向传输时, 前向波和反向波可以通过 XPM 发生相互作用并产生非线性相移. 在光纤中的前向波和反向波可满足方程组^[9, 21]

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_+}{\partial z} + \frac{1}{v_{gf}} \frac{\partial A_+}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_+}{\partial \tau^2} + \frac{\alpha}{2} A_+ \\ = i\gamma(|A_+|^2 + 2|A_-|^2)A_+, \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial A_-}{\partial z} + \frac{1}{v_{gf}} \frac{\partial A_-}{\partial \tau} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_-}{\partial \tau^2} + \frac{\alpha}{2} A_- \\ = i\gamma(|A_-|^2 + 2|A_+|^2)A_-, \end{aligned} \quad (2b)$$

其中, z 是传输距离, v_{gf} 是光纤群速度, β_2 是光纤色散系数, α 是光纤损耗系数, γ 是光纤二阶非线性 Kerr 系数. 这里所设计的反馈光路光纤长度不过数

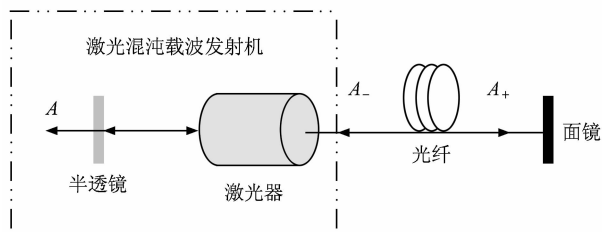


图 1 外腔激光器光纤传输反馈 XPM 增强激光混沌载波带宽模块

米, 因而可简化忽略光纤损耗, 同时还考虑到混沌光波具有准连续波的特性, 激光慢变包络相对稳定传输, 则前向波和反向波由 XPM 产生的非线性相移分别为

$$\phi_+ = \gamma z(W_{+0} + 2W_{-0}), \quad (3a)$$

$$\phi_- = \gamma z(W_{-0} + 2W_{+0}), \quad (3b)$$

其中 $W_{\pm 0}$ 是前向波和反向波进入光纤时的入射功率. 如光纤长度为 L_0 , 仅考虑光脉冲中心相移变化, 则激光经过光纤一个来回后所产生总的非线性相移为

$$\Delta\phi_N = 3\gamma L_0(W_{-0} + W_{+0}), \quad (4)$$

其中 $W_{-0} = k_f^2 W_{+0}$. 而激光输出功率形式是 $W(t) = \hbar\omega_0 V_p A^2(t) / (2\tau_L)$. 由于光纤反馈引入, 则原方程组(1a)和(1b)中的右边还须分别再加上新的振幅和相位作用项 $\xi(t)$ 和 $\varphi(t)$,

$$\begin{aligned} \xi(t) = \frac{\eta k_f}{\tau_L} A(t - \tau_f) \cos[\omega_0 \tau_f + \phi(t) \\ - \Delta\phi_N(t - \tau_f) - \phi(t - \tau_f)], \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = -\frac{\eta k_f}{\tau_L} \frac{A(t - \tau_f)}{A(t)} \sin[\omega_0 \tau_f + \phi(t) \\ - \Delta\phi_N(t - \tau_f) - \phi(t - \tau_f)], \end{aligned} \quad (5b)$$

其中, τ_f 是激光在光纤传输的时间, η 是光纤入射耦合系数, k_f 是面镜反馈系数. 由于光纤的影响, 激光振幅和相位又增加了延时变化项, (5) 式中的 $\Delta\phi_N$ 是二阶非线性变化项. 由于新增二阶非线性变化项使得激光振幅和相位更加丰富, 新的 $\Delta\phi_N$ 频率分量不断产生, 变化的频率分量展宽了频谱, 也意味着混沌频谱更宽. 为了简单了解原理, 只需看一下不动点的特点. 由(1)和(5)式得到 XPM 作用下的不动点

$$\begin{aligned} G = \gamma_p - \frac{2k}{\tau_L} \cos(\omega_0 \tau_f) \\ - \frac{2\eta k_f}{\tau_L} \cos(\omega_0 \tau_f - \Delta\phi_N), \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} \beta_c(G - \gamma_p) = -2\Delta\omega + \frac{2k}{\tau_L} \sin(\omega_0 \tau) \\ + \frac{2\eta k_f}{\tau_L} \sin(\omega_0 \tau_f - \Delta\phi_N). \end{aligned} \quad (6b)$$

得到 XPM 作用下激光双反馈的频率失谐形式为

$$\begin{aligned} \Delta\omega = \frac{k}{\tau_L} [\beta_c \cos(\omega_0 \tau) + \sin(\omega_0 \tau)] \\ + \frac{\eta k_f}{\tau_L} [\beta_c \cos(\omega_0 \tau_f - \Delta\tau_f) \end{aligned}$$

$$+ \sin(\omega_0 \tau_f - \Delta \tau_N)]. \quad (7)$$

由此可见,增益和线宽增强因子都受到 XPM 产生的非线性相移的影响,其激光相位及频率特性也将随着发生变化.由于混沌对系统参数变化以及外界影响极其敏感,即使 XPM 所产生的非线性相移很小,也能对混沌产生敏感影响,这就是光纤传输反馈 XPM 提高混沌频谱方法的物理机制.如不存在 XPM 反馈作用,则(7)式可简化为著名的延时反馈激光频率失谐公式.

3. 数值结果

为了计算频谱展宽,下面给出频谱的形式及谱宽,

$$S(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \exp[-i\phi(t) + i(\omega - \omega_0)t] dt \right|^2, \quad (8)$$

$$\Delta\omega = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (\omega - \omega_0) S(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega}. \quad (9)$$

定义频谱展宽因子

$$\sigma = \frac{\Delta\omega_{\text{XPM}}}{\Delta\omega_0}, \quad (10)$$

其中 $\Delta\omega_{\text{XPM}}$ 和 $\Delta\omega_0$ 分别表示有 XPM 以及没有 XPM 时的谱宽,所以频谱展宽因子 $\sigma > 1$ 表示频谱展宽, $\sigma < 1$ 表示频谱被压缩.本文中取激光波长为 1.31 nm,激光器各参量值列于表 1 中,取零色散光纤并取 $\gamma = 20 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$.图 2 是激光器原输出信号频谱,图 3 是附加 XPM 时的频谱,计算出 σ 均大于 1,表明 XPM 作用使频谱展宽,且高频分量明显增多.

由于反馈量进一步增加, XPM 作用增强了, XPM 所产生的非线性相移随之增加,高频分量也明显增多,而增加的新频率分量展宽了频谱,即混沌频谱变宽了.还由(4)式可知,非线性相移随光传输距离的增加而增加,随光纤 Kerr 系数的增加而增加,同时也随着入纤光功率的增加而增加.

3.1. 光纤传输长度的影响

图 4 是光在较长光纤中传输后的输出激光频谱.从图 4 可见,由于光传输时间增加即传输光纤长度的增加,非线性相移进一步增加了,新的频谱分量增多,频谱明显向高频分量增加,频谱变得更宽了.

表 1 激光器参量取值

参 量	取 值
腔长 $L/\mu\text{m}$	350
腔宽 $w/\mu\text{m}$	2
腔厚 $d/\mu\text{m}$	0.15
压缩和限制因子 Γ	0.29
群速折射率 n_g	3.8
光子损耗系数 $\alpha_m + \alpha_{\text{int}}/\text{cm}^{-1}$	49
延时时间 τ/ns	2
反馈系数 k	0.03
非辐射复合速率 $A_{\text{nr}}/\text{s}^{-1}$	1.0×10^8
辐射复合因子 $B/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1.2×10^{-10}
俄歇复合因子 $C/\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	3.5×10^{-29}
饱和光子场振幅 $E_s/\text{m}^{-3/2}$	1.6619×10^{11}
增益常数 a/cm^2	2.3×10^{-16}
光线宽增强因子 β_c	6
驱动电流 I/mA	20
频率 $\omega_0/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	1438×10^{12}
激光透明时载流子密度 $n_{\text{th}}/\text{cm}^{-3}$	1.2×10^{18}
频率失谐 $\Delta\omega/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$4\pi \times 10^9$

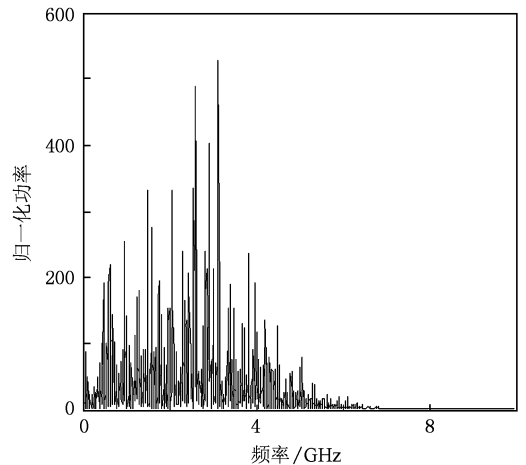


图 2 原输出的信号频谱

3.2. 光纤 Kerr 系数的影响

图 5 是光纤取较大 Kerr 系数时的激光器输出激光的频谱图.由于现代光纤技术的发展,如光子晶体光纤较传统光纤具有更高的非线性系数^[19-21],所以数值模拟中可取 $\gamma = 35 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 以进一步说明光纤非线性使 XPM 作用增强并能进一步增宽频谱.图 5 中其他参数和图 2(a) 相同,得到 $\sigma = 2.3 > 1$,即较大 Kerr 系数下 XPM 能进一步增宽混沌频谱.

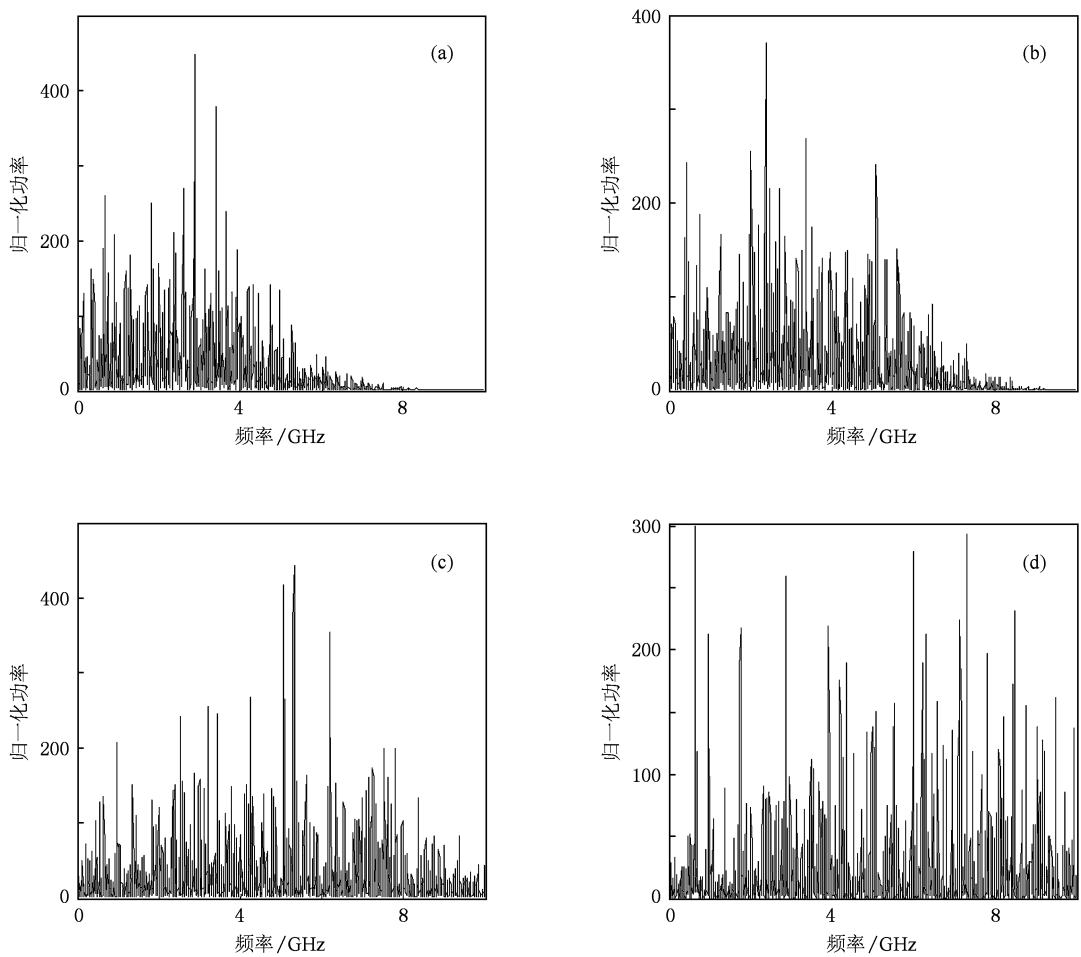


图3 有 XPM 时的频谱 (a)取 $\tau_f = 10 \text{ ns}$, $\eta = 0.64$, $k_f = 0.05$, 得 $\sigma = 1.6 > 1$; (b)取 $k_f = 0.1$, 得 $\sigma = 2.2$; (c)取 $k_f = 0.2$, 得 $\sigma = 3.6$; (d)取 $k_f = 0.4$, 得 $\sigma = 4.7$

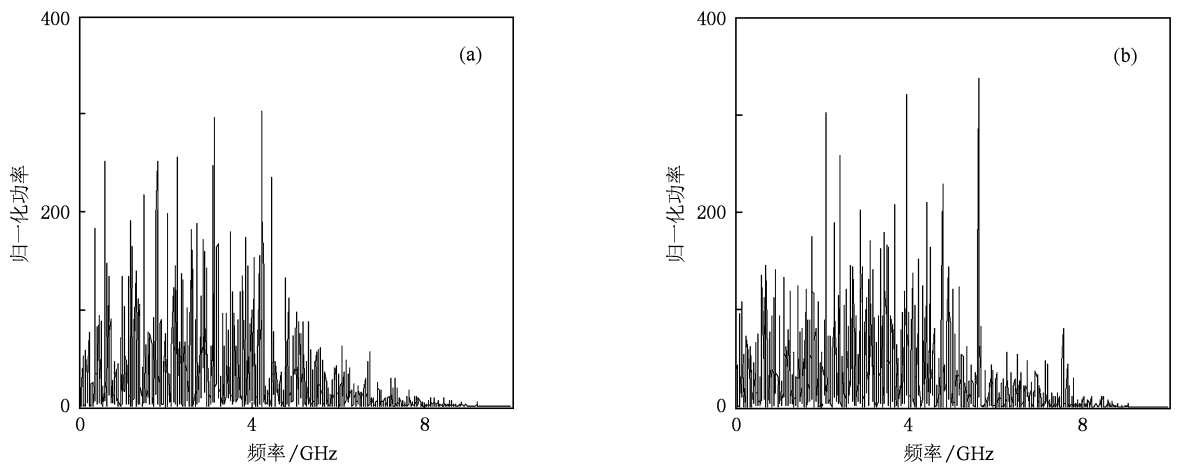


图4 光在较长光纤中传输后的激光器激光频谱 (a)取 $\tau_f = 20 \text{ ns}$, $\eta = 0.64$, $k_f = 0.1$, 得 $\sigma = 2.4 > 1$; (b)取 $\tau_f = 30 \text{ ns}$, $\eta = 0.64$, $k_f = 0.1$, 得 $\sigma = 3.1 > 1$

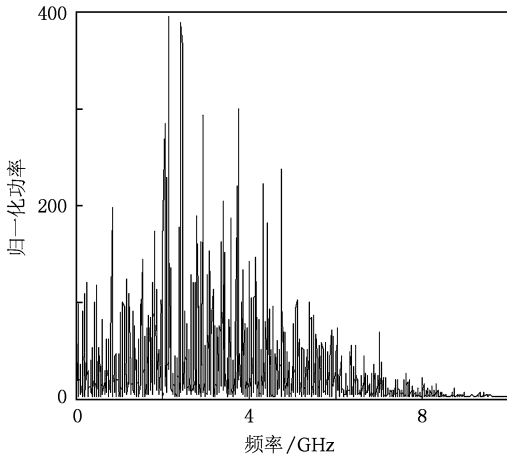


图 5 较大的光纤 Kerr 系数下的频谱

3.3. 入纤光功率的影响

图 6 是取较大入纤光功率系数 ($\eta = 0.81$) 时的频谱, 其他参数同图 5, 得到 $\sigma = 2.5 > 1$. 图 6 的频谱明显比图 5 更宽, 由于有较强的激光入纤, XPM 作用进一步增强, 所以能产生更多新的非线性相移, 其新增的频率分量进一步展览了频谱.

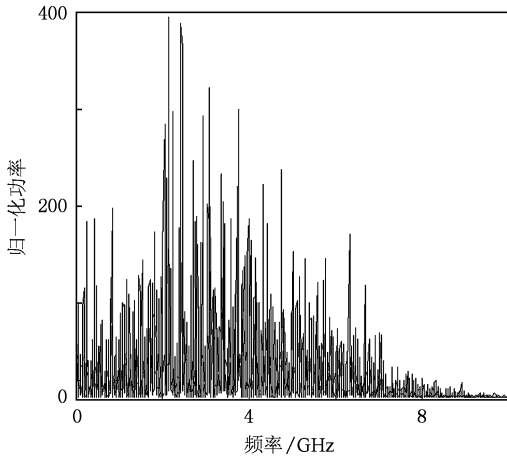


图 6 有较大入纤光功率时的频谱

3.4. XPM 对激光张弛振荡频率的影响

人们在研究激光混沌滤波特性时发现, 作为接收器的激光混沌载波和信号光的接收响应峰值出现在激光器的张弛振荡频率处, 即认为混沌载波带宽与激光器的张弛振荡频率有关, 因为张弛振荡频率与激光器的调制带宽有关^[8-12]. 所以我们进一步研究 XPM 对激光张弛振荡频率的影响. 图 7(a) 是激光器原输出信号波形 (和图 2(a) 有相同参量),

其中混沌激光张弛振荡频率是 2.7 GHz. 图 7(b) 是有 XPM 作用时的混沌激光器输出信号波形 (参数取 $\tau_f = 15 \text{ ns}$, $\eta = 0.64$, $k_f = 0.2$, $\gamma = 20 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$), 其中张弛振荡频率是 5.4 GHz, 即相对原激光混沌张弛振荡频率增加了一倍, 而 $\sigma = 2.8 > 1$. 图 7(c) 是有较强 XPM 作用时的混沌激光器输出信号波形 (参数取 $\tau_f = 30 \text{ ns}$, $\eta = 0.81$, $k_f = 0.25$, $\gamma = 30 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$), 其中张弛振荡频率是 7.7 GHz, 而 $\sigma = 3.9 > 1$. 这个结果和文献 [17] 的注入方法结果类似, 而这里却省了一台激光器.

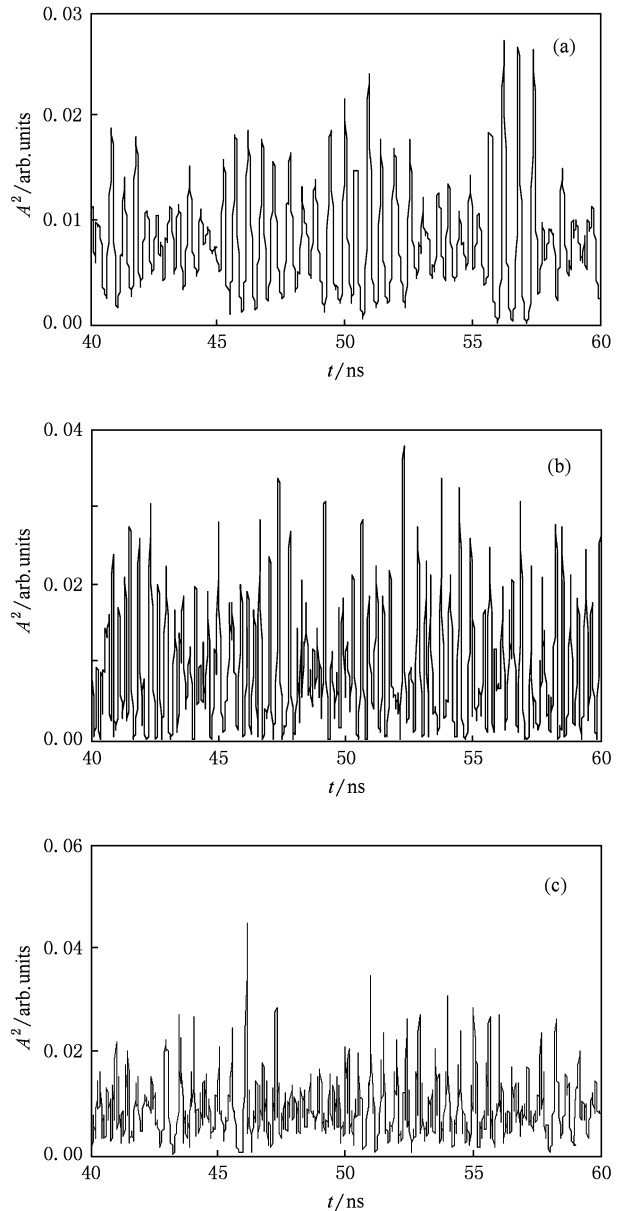


图 7 XPM 对激光张弛振荡频率的影响 (a) 激光器的原输出信号波形, (b) XPM 作用较弱时的输出信号波形, (c) XPM 作用较强时的输出信号波形

4. 结 论

本文提出外腔半导体激光器混沌 XPM 光反馈提高混沌载波发射机带宽方法. 给出了 XPM 作用下双反馈的激光频率失谐公式, 指出 XPM 产生的非线性相移影响了激光增益和线宽增强因子, 新增的非线性相移使激光振幅和相位变化更加丰富并增加

了新的频率分量使频谱展宽. 数值结果表明, XPM 作用能使激光器混沌带宽增加到 4 倍以上, 并发现 XPM 作用使激光混沌张弛振荡频率增加 2.85 倍, 其光纤长度、入纤光功率、面镜反射系数、光纤二阶非线性系数等都能影响激光器混沌带宽. 该方法丰富了激光混沌载波发射机带宽技术研究, 对混沌保密通信具有重要的应用价值, 对混沌理论也具有一定的参考价值.

-
- [1] Roy R, Thornburg K S 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 2009
- [2] Van Wiggeren G D, Roy R 1998 *Science* **279** 1198
- [3] Wu L, Zhu S Q 2003 *Phys. Lett. A* **308** 157
- [4] Yan S L 2007 *Chin. Phys. B* **16** 3271
- [5] Ramos R V, Souza R F 2001 *Opt. Commun.* **22** 90
- [6] Zhou Y, Wu L, Zhu S Q 2005 *Chin. Phys. B* **14** 2196
- [7] Zhang F, Chu P L 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 3334
- [8] 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]
- [9] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2819 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 2819]
- [10] 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]
- [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] Wang Y C, Zhang G W, Wang A B, Wang B J, Li Y L, Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4372 (in Chinese) [王云才、张耕玮、王安帮、王冰洁、李艳丽、郭 萍 2007 物理学报 **56** 4372]
- [18] Kong L Q, Wang A B, Wang H H, Wang Y C 2007 *Acta Phys. Sin.* **57** 2266 (in Chinese) [孔令琴、王安帮、王海红、王云才 2007 物理学报 **57** 2266]
- [19] Liu X M, Yang X, Lu F, Ng J, Zhou X, Lu C 2005 *Opt. Express* **13** 142
- [20] Liu X M, Wang T, Shu C, Wang L R, Lin A, Lu K Q, Zhang T Y, Zhao W 2008 *Laser Phys.* **18** 1357
- [21] Agrawal G P 1989 *Nonlinear Fiber Optics* (San Diego: Academic)

Bandwidth enhancement of a chaotic semiconductor laser transmitter by cross-phase modulation *

Yan Sen-Lin[†]

(*Department of Physics and Electronics Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 210017, China*)

(Received 20 January 2009; revised manuscript received 21 February 2009)

Abstract

A novel method of bandwidth enhancement of a chaotic carrier from a semiconductor laser transmitter is studied by cross-phase modulation (XPM). And a physical model of laser dynamics is presented under the condition of XPM effect of optical fiber path. A frequency detuning formula with optical dual-feedback and XPM effect is deduced. The nonlinear phase shift arisen from XPM effect impacts on the gain and bandwidth enhancement factor of the laser. The second order nonlinear effect of the fiber enriches the varieties in the amplitude and the phase of the laser while the nonlinear phase shift produces a lot of new frequencies, which spread the bandwidth. Numerical results reveal that, with XPM effect, the new bandwidth is the quadruple of the bandwidth without XPM effect, and the relaxation oscillation frequency of the chaotic laser is increased to 2.85 times that of the laser without XPM effect. It is found that the enhancement of the chaotic bandwidth depends evidently on the optical fiber length, the power input into the optical fiber, the mirror reflectance and the second order nonlinear coefficient.

Keywords: chaos, semiconductor laser, cross-phase modulation, bandwidth

PACC: 0545, 4255P, 4265T

* Project supported by the Natural Science Basic Research Program of Institution of Higher Education of Jiangsu Province, China (Grant No. 08KJ510019).

[†] E-mail: senlinyan@163.com