

掺铒光纤环形激光器混沌带宽 特性数值研究*

杨玲珍 乔占朵 郭云翘 王云才[†]

(太原理工大学物理系, 太原 030024)

(2009 年 7 月 30 日收到; 2009 年 10 月 30 日收到修改稿)

利用掺铒光纤环形激光器非线性克尔效应模型, 研究抽运功率和非线性系数对激光器输出混沌信号带宽的影响. 研究表明: 在非线性系数一定的情况下, 混沌带宽随着抽运功率的增加先增大后减小; 固定抽运功率为 0.1 W, 当非线性系数增加到 $45 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时, 掺铒光纤激光器输出的混沌带宽达到最大值 (153 GHz), 非线性系数继续增加, 输出混沌的带宽将逐渐减小.

关键词: 克尔效应, 掺铒光纤激光器, 混沌, 带宽

PACC: 4265, 4255N, 4265T, 0545

1. 引 言

由于混沌信号具有天然的保密性、抗干扰性、不可预测性等特点, 使得混沌在保密通信和抗干扰测距中的应用被广泛研究^[1-6]. 在应用中, 混沌的带宽直接关系到信号传输的速率和测距的距离分辨率^[7]. 掺铒光纤环形激光器产生的混沌激光波长位于光纤低损耗区域, 属于人眼安全的波长, 且平均功率高, 使得掺铒光纤激光器在混沌保密通信、混沌测距等领域中具有广阔的应用前景. 然而目前国际上报道的掺铒光纤激光器混沌的产生大多是基于光调制原理, 产生的混沌带宽较低, 限制了它在混沌保密通信、混沌测距等领域中的应用^[8-13]. 如何提高光纤激光器混沌带宽, 扩展其在高速混沌保密通信和混沌测距中的应用已成为研究者关注的一个热点. 1999 年, Abarbanel 等^[14]建立了掺铒光纤环形腔的非线性克尔效应模型, 指出该系统产生的混沌带宽至少能达到 10^9 Hz 量级, 并提出双环的引入能够提高带宽. 在此基础上, Zhang 等^[15]理论模拟实现了 50 GHz 带宽的混沌载波. 2005 年, 桑新柱等^[16]利用光纤的非线性效应, 实验

得到高频混沌激光输出. 本文利用掺铒光纤环形激光器的非线性克尔效应模型, 详细分析了抽运功率和非线性系数对系统输出混沌带宽的影响.

2. 理论模型

图 1 为掺铒光纤环形激光器混沌产生装置示意图. 半导体激光器输出的抽运光经过波分复用器耦合进掺铒光纤中构成掺铒光纤放大器, 光隔离器使光场保持单向传输; 偏振控制器用于调节光场的偏振状态; 耦合器将一部分光输出用于检测; 光电探测器将输出的光信号转换成电信号, 转换后的电信号输入到示波器中进行检测.

在光纤环形腔内, 光场为 $E(z, t) = \varepsilon(z, t) \exp(i(k_0 z - \omega_0 t))$ (ω_0 为光波角频率, $\omega_0 = k_0 c/n$), 在相对坐标 $\tau = t - z/v_g$ (v_g 为群速度) 下, 光场包络的传输可由下式描述:

$$\frac{\partial \varepsilon_{x,y}(z, \tau)}{\partial z} = g(\tau) \varepsilon_{x,y} + L_{x,y} \varepsilon_{x,y} + N_{x,y} \varepsilon_{x,y}. \quad (1)$$

这里, $L_{x,y}$ 为光场传输的线性项算子, 包括线性双折射、群速度色散和增益色散, $L_{x,y}$ 通常在频域表示,

* 国家自然科学基金(批准号:60777041)和山西省青年科技研究基金(批准号:2008021008)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

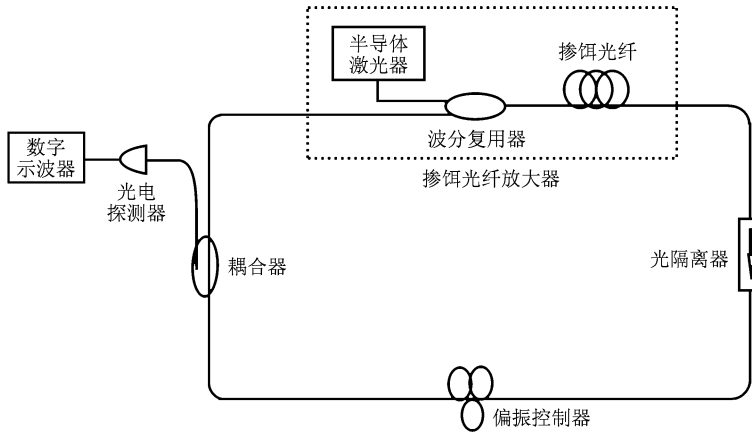


图1 掺铒光纤环形激光器混沌产生装置示意图

具体表达式为

$$L_{x,y} = \pm \frac{i k_0 B_m}{2n_0} \mp \frac{\Delta}{n_0 c} i \omega - \frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 - \frac{g(\tau) \omega^2 \tau_2^2}{1 + \omega^2 \tau_2^2}, \quad (2)$$

其中 ω 为角频率, B_m 表示双折射程度, $B_m = n_x - n_y$, n_x 和 n_y 分别表示 x 方向和 y 方向光纤的有效折射率, $\Delta = n_0 B_m$, $n_0 = (n_x + n_y)/2$, β_2 是群速度色散参数, τ_2 为 Er^{3+} 横向弛豫时间; $g(\tau)$ 为增益系数,

$$g(\tau) = 1/l_A \int_0^{l_A} g(z', \tau) dz',$$

其中 l_A 为环形腔内掺铒光纤长度; $N_{x,y}$ 为光场传输的非线性项算子, $N_{x,y}$ 与非线性克尔效应有关, 通常在空间域表示, 具体表达式为

$$N_{x,y} \varepsilon_{x,y} = i \gamma \left\{ \left(|\varepsilon_{x,y}(z, \tau)|^2 + \frac{2}{3} |\varepsilon_{y,x}(z, \tau)|^2 \right) \times \varepsilon_{x,y}(z, \tau) \right\}, \quad (3)$$

其中 γ 为光纤的非线性系数.

在环形腔内, 光纤吸收矩阵为 \mathbf{R} , 偏振控制器的琼斯矩阵为 \mathbf{J}_{PC} , 普通单模光纤长度为 l_f , 普通光纤部分的传输矩阵为 $\mathbf{U}_{\text{fiber}}$, 有源光纤部分的传输矩阵为 \mathbf{Q} , τ_R 为光场传输一周所需要的时间. 光场经激光器一周后的演变表示为

$$\varepsilon(z = l_A + l_f, \tau + \tau_R) = \mathbf{R} \mathbf{J}_{\text{PC}} \mathbf{U}_{\text{fiber}} \mathbf{Q} (\varepsilon(z = 0, t)). \quad (4)$$

这里

$$\mathbf{U}_{\text{fiber}} = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 \\ -u_2^* & u_1^* \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$|u_1|^2 + |u_2|^2 = 1,$$

其中 u_1^*, u_2^* 分别为 u_1, u_2 的复共轭;

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_x & 0 \\ 0 & R_y \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中 R_x, R_y 分别为光纤 x 方向、 y 方向的吸收系数;

$$\mathbf{J}_{\text{PC}} = \mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_1) \mathbf{J}_{\lambda/2}(\theta_2) \mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_3), \quad (7)$$

其中 $\mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_1)$ 和 $\mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_3)$ 分别为快轴与 x 轴成 θ_1 和 θ_3 角四分之一波片的琼斯矩阵,

$$\mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_1) = \frac{1-i}{2} \begin{pmatrix} i + \cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 & i - \cos 2\theta_1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{J}_{\lambda/4}(\theta_3) = \frac{1-i}{2} \begin{pmatrix} i + \cos 2\theta_3 & \sin 2\theta_3 \\ \sin 2\theta_3 & i - \cos 2\theta_3 \end{pmatrix},$$

$\mathbf{J}_{\lambda/2}(\theta_2)$ 为快轴与 x 轴成 θ_2 角二分之一波片的琼斯矩阵,

$$\mathbf{J}_{\lambda/2}(\theta_2) = \begin{pmatrix} \cos 2\theta_2 & \sin 2\theta_2 \\ \sin 2\theta_2 & -\cos 2\theta_2 \end{pmatrix}.$$

掺铒光纤放大器的放大倍数 $G(z) = \exp(g(\tau)z)$, $G(z)$ 与抽运光功率 $P_p(0)$ 及信号光功率 $P_s(0)$ 的隐函数关系式为

$$[G(z)]^\alpha \exp(-\alpha \Gamma_s \sigma_{es} N_0 z) = 1 - \frac{\nu_p P_s(0)}{\nu_s P_p(0)} [G(z) - 1] - \frac{[\ln G(z) + \Gamma_s \sigma_{as} N_0 z] A_{\text{eff}} h \nu_p}{\tau_1 P_p(0) \Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})}. \quad (8)$$

这里 $\alpha = \frac{\Gamma_p \sigma_{ap}}{\Gamma_s (\sigma_{as} + \sigma_{es})}$, 其中 σ_{ap} 和 σ_{as} 分别为抽运光和信号光的吸收截面, σ_{es} 为激发态的受激辐射截

面, Γ_p 和 Γ_s 分别为抽运光和信号光的限制因子; ν_p 和 ν_s 分别为抽运光和信号光的光频; A_{eff} 为纤芯有效截面; N_0 为 Er^{3+} 掺杂粒子数密度; τ_1 表示激发态粒子寿命. 纤芯中的光强 $I \propto |\varepsilon|^2$, 功率 $P_s(0) =$

$\frac{A_{\text{eff}}}{\Gamma_s} I$. (8) 式揭示了光场与增益之间的相互作用, 若干圈循环之后光场与增益最终达到平衡. 在数值模拟计算过程中, 模拟参量取值列于表 1.

表 1 模拟参量取值

参量	取值	参量	取值	参量	取值
l_A/m	10	θ_1/rad	0.5	Γ_s	0.6
l_F/m	10	θ_2/rad	1.0	ν_p/Hz	3.061×10^{14}
τ_1/ms	10	θ_3/rad	1.5	ν_s/Hz	1.935×10^{14}
τ_2/ps	1	$\sigma_{\text{ap}}/\text{m}^2$	3.8×10^{-25}	$A_{\text{eff}}/\text{m}^2$	1.26×10^{-11}
$\beta_2/\text{ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$	-20	$\sigma_{\text{as}}/\text{m}^2$	3.1×10^{-25}	N_0/m^{-3}	2×10^{24}
R_x	0.45	$\sigma_{\text{es}}/\text{m}^2$	2.7×10^{-25}	B_m	1.8×10^{-6}
R_y	0.46	Γ_p	0.6		

3. 模拟结果

3.1. 混沌的产生

对于石英光纤, 非线性系数 γ 可以在 1—10

$\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 范围内变化. 在非线性系数 $\gamma = 3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 时, 通过调节抽运功率的变化, 分析掺铒光纤激光器输出的动力学特性. 随着抽运功率的增加, 激光器输出从稳定状态经周期状态进入混沌状态. 图 2 表示当非线性系数 $\gamma = 3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 时, 不同抽运功率下各输出状态的时序图. 当抽运功率 $P_p =$

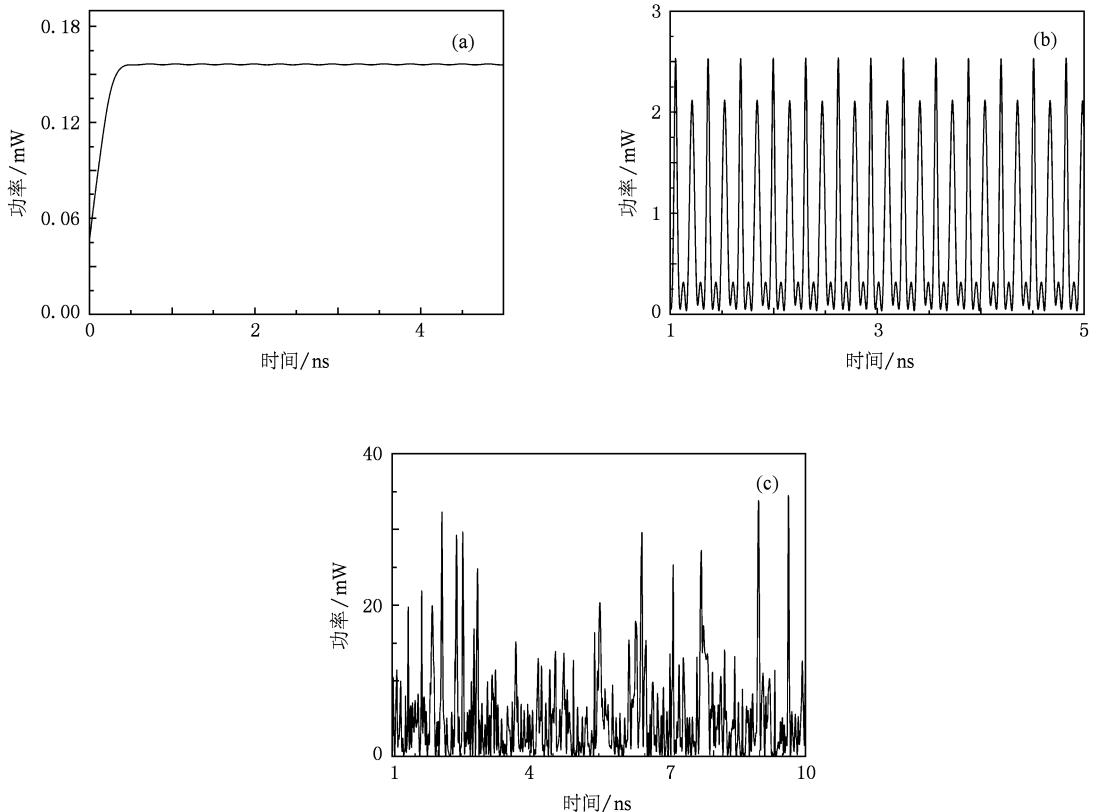


图 2 当非线性系数 $\gamma = 3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 时, 不同抽运功率下各输出状态的时序图 (a) 稳定状态, (b) 周期状态, (c) 混沌状态

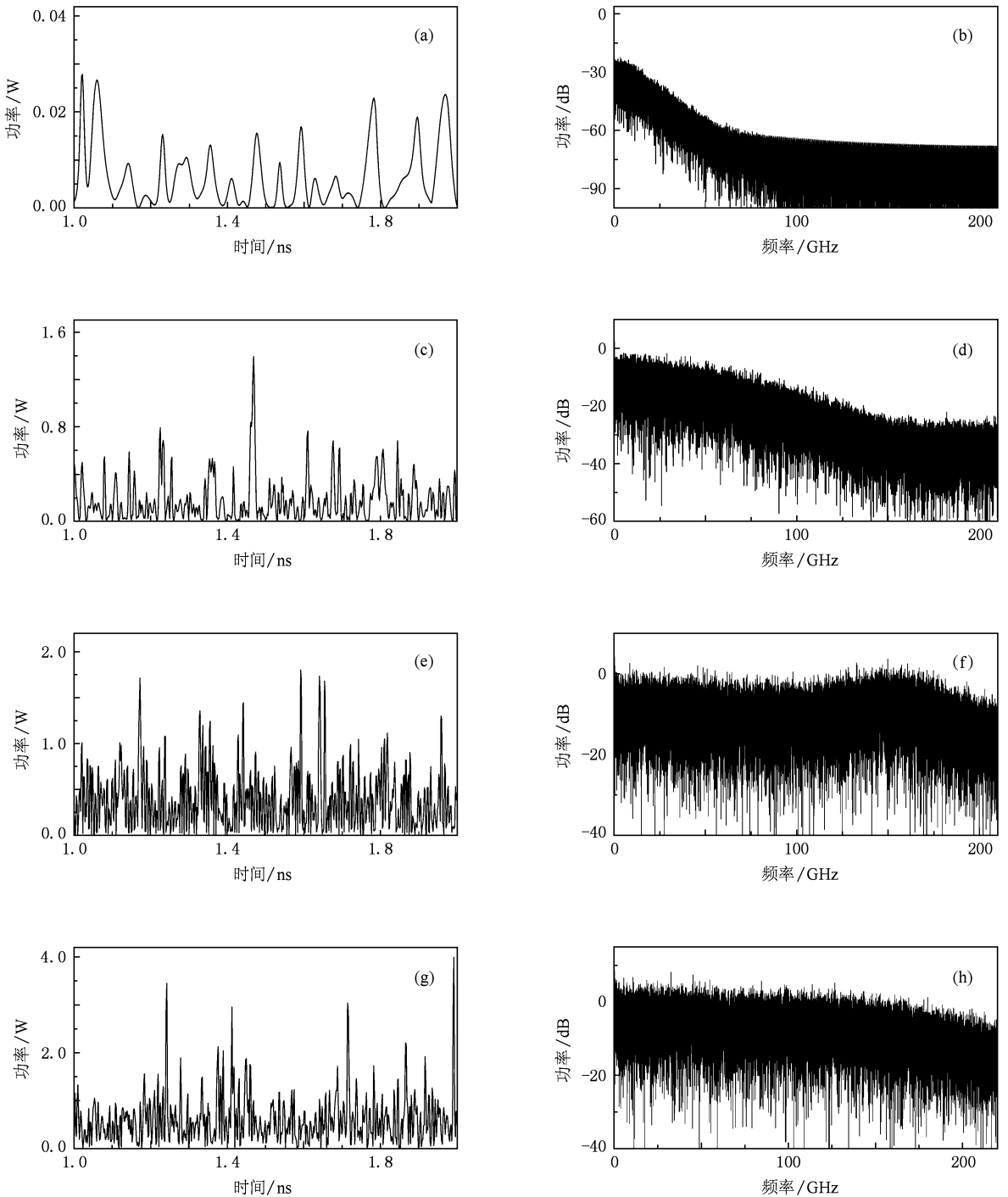


图3 非线性系数 $\gamma = 3 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时,不同抽运功率下混沌信号的时序图及功率谱 (a) $P_p = 0.02 \text{ W}$ 时的时序图, (b) $P_p = 0.02 \text{ W}$ 时的功率谱, (c) $P_p = 0.5 \text{ W}$ 时的时序图, (d) $P_p = 0.5 \text{ W}$ 时的功率谱, (e) $P_p = 1.5 \text{ W}$ 时的时序图, (f) $P_p = 1.5 \text{ W}$ 时的功率谱, (g) $P_p = 2.5 \text{ W}$ 时的时序图, (h) $P_p = 2.5 \text{ W}$ 时的功率谱

0.0045 W 时,激光器输出为稳定状态,如图 2(a) 所示;当 $P_p = 0.006 \text{ W}$ 时,输出演变为周期状态,如图 2(b) 所示;继续增加抽运功率,当 $P_p = 0.016 \text{ W}$ 时,输出进入混沌状态,如图 2(c) 所示. 从图 2 还可以

看出,随着抽运功率的增加,输出光功率也在增大.

3.2. 抽运功率对混沌带宽的影响

在非线性系数 $\gamma = 3 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 不变的情况下,

研究掺铒光纤激光器系统输出混沌带宽随抽运功率的变化. 当抽运功率从 0.02 W 增加到 2.5 W, 掺铒光纤激光器系统输出一直呈现混沌状态. 由于掺铒光纤环形腔产生混沌的主要原因是非线性克尔效应, 而抽运功率的改变会导致非线性效应的变化, 从而使非线性效应产生的非线性相移发生变化, 所以抽运功率增加必然会导致输出混沌状态的变化, 如图 3 所示. 图 3(a) 为 $P_p = 0.02$ W 时的时序图, 图 3(b) 为与 (a) 图相应的功率谱, 输出混沌带宽为 14 GHz. 本文混沌带宽的计算方法如下: 将混沌时间序列进行傅里叶变换, 得到横轴为频率 f , 纵轴为功率 P 的频谱. 设

$$r = \frac{\int_0^B P df}{\int_0^\infty P df},$$

当 $r = 80\%$ 时, 所对应的频率值即为混沌带宽^[17]. 图 3(c) 为 $P_p = 0.5$ W 时的时序图, 图 3(d) 为与 (c) 图相应的功率谱, 输出混沌带宽为 65 GHz. 图 3(e) 为 $P_p = 1.5$ W 时的时序图, 图 3(f) 为与 (e) 图相应的功率谱, 输出混沌带宽为 153 GHz. 图 3(g) 为 $P_p = 2.5$ W 时的时序图, 图 3(h) 为与 (g) 图相应的功率谱, 输出混沌带宽为 126 GHz. 随着抽运功率的增大, 相应的时序图的混沌脉冲序列先逐渐变得密集而后又变得稀疏, 并且抽运功率的增加使得时序图混沌的峰值增大, 相应的功率谱也在上升.

在非线性系数 $\gamma = 3 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时, 不同抽运功率下混沌带宽的变化如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 掺铒光纤环形激光器利用非线性克尔效应产生的混沌带宽随着抽运功率的增加先增加后减小, 当 $P_p = 1.5$ W 时, 输出混沌带宽达到最大, 其值为 153 GHz.

3.3. 非线性系数对混沌带宽的影响

由于非线性系数 γ 与非线性折射率系数 n_2 成正比, 因而可以通过选择 n_2 较大的材料制造光纤以达到增大非线性系数的目的. 例如, 用硅酸铅制造的光纤 n_2 值比普通石英光纤提高了 10 倍, 用硫化物玻璃制作的光纤 n_2 值甚至可以达到 4.2×10^{-18}

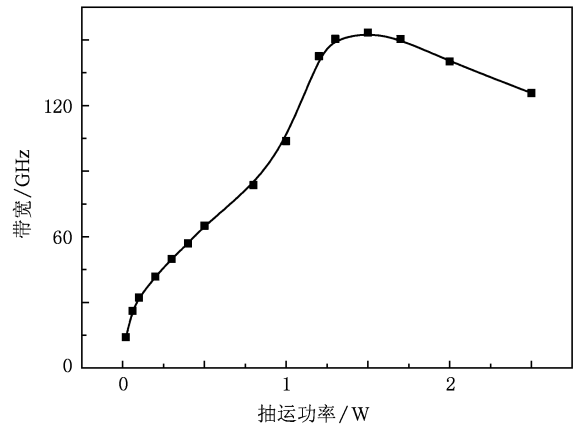


图 4 非线性系数 $\gamma = 3 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时, 混沌带宽随抽运功率的变化

m^2/W , 比石英光纤提高了 100 多倍. 可以通过提高非线性系数增强非线性效应. 在抽运功率不变的情况下, 研究非线性系数对掺铒光纤激光器输出混沌带宽的影响. 图 5 给出了 $P_p = 0.1$ W 时不同非线性系数下混沌的时序图及功率谱. 图 5(a) 为 $\gamma = 10 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的时序图, 图 5(b) 为与 (a) 图相应的功率谱, 混沌带宽为 50 GHz. 图 5(c) 为 $\gamma = 30 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的时序图, 图 5(d) 为与 (c) 图相应的功率谱, 混沌带宽为 96 GHz. 图 5(e) 为 $\gamma = 45 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的时序图, 图 5(f) 为与 (e) 图相应的功率谱, 混沌带宽为 153 GHz. 图 5(g) 为 $\gamma = 140 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的时序图, 图 5(h) 为与 (g) 图相应的功率谱, 混沌带宽为 100 GHz. 从图 5(a), (c), (e) 可以看出, 随非线性系数的增加混沌脉冲序列逐渐变密, 继续增加到 $\gamma = 140 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时, 混沌脉冲序列变得稀疏, 如图 5(g) 所示. 从图 5 还可以看出, 随着非线性系数 γ 值的增加, 时序图中混沌的峰值没有发生大的变化.

固定 $P_p = 0.1$ W 时, 混沌带宽随非线性系数的变化如图 6 所示. 当非线性系数 $\gamma < 45 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时, 随着非线性系数的增加, 混沌带宽迅速增加, 而当非线性系数 $\gamma > 45 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时, 随着非线性系数的增加, 混沌带宽开始缓慢减小. 在 $\gamma = 45 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时混沌带宽达到最大值 (153 GHz).

从图 4 可以看出, 当 $\gamma = 3 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$, $P_p = 1.5$ W 时, 输出混沌带宽达到最大值 (153 GHz), 而图 6

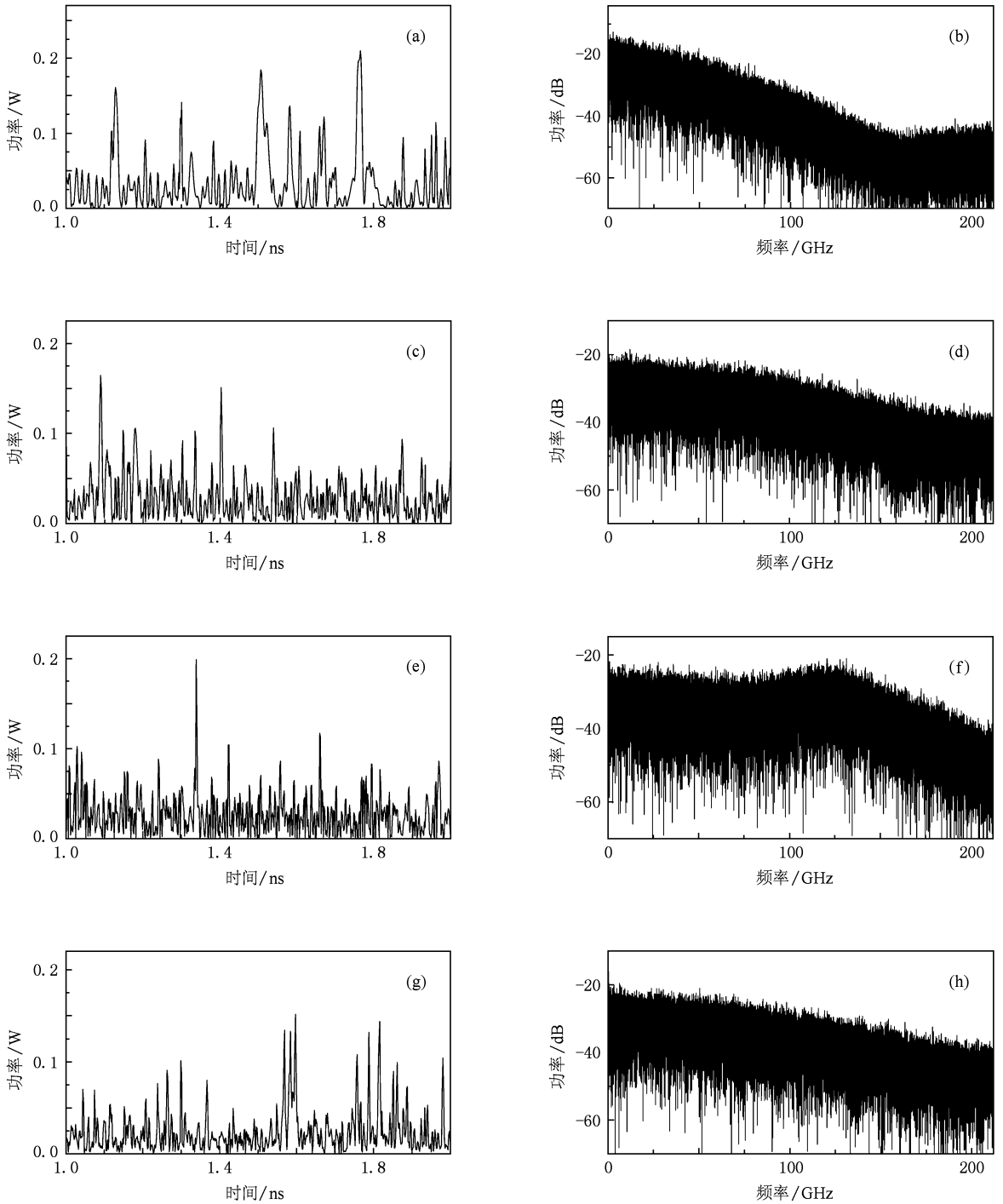


图5 抽运功率 $P_p = 0.1 \text{ W}$ 时,不同非线性系数时混沌信号的时序图及功率谱 (a) $\gamma = 10 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的时序图, (b) $\gamma = 10 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的功率谱, (c) $\gamma = 30 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的时序图, (d) $\gamma = 30 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的功率谱, (e) $\gamma = 45 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的时序图, (f) $\gamma = 45 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的功率谱, (g) $\gamma = 140 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的时序图, (h) $\gamma = 140 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时的功率谱

中得到 $P_p = 0.1 \text{ W}$, $\gamma = 45 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 时,混沌带宽最大值也达到 153 GHz. 这两次带宽达到最大时非线性系数与抽运功率的乘积相等. 这是由于非线性克尔效应在光纤激光器中产生非线性相移,使得激光

器的输出特性发生变化,而非线性相移的表达式为

$$\Phi_{\text{NL}} = \gamma l_A (P_x + 2P_y), \quad (9)$$

其中 P_x 和 P_y 分别是 x 方向和 y 方向光场的光功率. 当光纤长度固定时,非线性相移的大小主要由

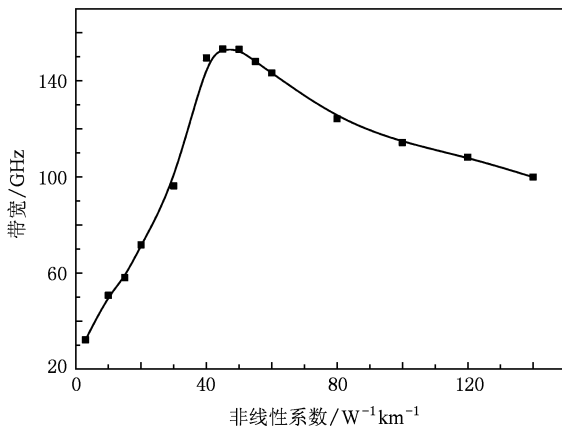


图6 抽运功率 $P_p = 0.1$ W 时,混沌带宽随非线性系数的变化

非线性系数和抽运功率决定. 非线性相移将使得激光器输出混沌带宽发生变化,当非线性相移达到特定值时,输出混沌带宽将达到最大.

4. 结 论

本文利用掺铒光纤环形腔激光器的非线性克尔效应模型,分析了抽运功率、非线性系数对混沌带宽的影响. 研究表明:当非线性系数为 $3 W^{-1} km^{-1}$,将抽运功率从 0.02 W 增加到 2.5 W 时,混沌带宽先从 14 GHz 增加到 153 GHz,然后减小到 126 GHz. 当抽运功率为 0.1 W 时,随着非线性系数的增加,混沌带宽先增大后减小,在非线性系数为 $45 W^{-1} km^{-1}$ 时达到最佳值,此时混沌带宽的最大值为 153 GHz. 分析发现,当混沌带宽达到最大值时,抽运功率与非线性系数的乘积为一固定值,即非线性相移达到特定值时,混沌带宽将达到最大. 掺铒光纤激光器宽带混沌激光输出的实现,使得掺铒光纤激光器在高速混沌保密通信、混沌遥感和混沌测距等方面具有更广泛的应用.

[1] 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]

[2] Lin F Y, Tsai M C 2007 *Opt. Express* **15** 302

[3] Qiu X, Xia G Q, Wu J G, Wu Z M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1725 (in Chinese) [邱鑫、夏光琼、吴加贵、吴正茂 2008 物理学报 **57** 1725]

[4] Zhang J Z, Wang Y C, Wang A B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3264

[5] Yang L Z, Zhang X J, Wang A B, Guo D M, Wang Y C 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3883

[6] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 991

[7] Wang Y C, Wang B J, Wang A B 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1636

[8] Kim S, Lee B, Kim D H 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 290

[9] Luo L, Tee T J, Chu P L 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 972

[10] Luo L, Chu P L, Whitbread T, Peng R F 2000 *Opt. Commun.* **176** 213

[11] Zhang F, Chu P L, Lai R, Chen G R 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 549

[12] Zhao L M, Tang D Y, Liu A Q 2006 *Chaos* **16** 013128

[13] Liu Y, Zhang W, Feng X, Liu X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2971 (in Chinese) [刘越、张巍、冯雪、刘小明 2009 物理学报 **58** 2971]

[14] Abarbanel H D I, Kennel M B, Buhl M, Lewis C T 1999 *Phys. Rev. A* **60** 2360

[15] Zhang F, Chu P L 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 3334

[16] Sang X Z, Yu C X, Wang K R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5728 (in Chinese) [桑新柱、余重秀、王葵如 2006 物理学报 **55** 5728]

[17] Lin F Y, Liu J M 2003 *Opt. Commun.* **221** 173

Study of chaotic bandwidth in erbium-doped ring fiber laser^{*}

Yang Ling-Zhen Qiao Zhan-Duo Wu Yun-Qiao Wang Yun-Cai[†]

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

(Received 30 July 2009; revised manuscript received 30 October 2009)

Abstract

Based on nonlinear Kerr effect model of erbium-doped ring fiber laser, the influences of pump power and nonlinear coefficient on chaotic bandwidth are investigated. The results indicate that, with fixed nonlinear coefficient, the bandwidth of the chaos increases first and then decreases with the increasing of pump power. Fixing the pump power at 0.1 W, the chaotic bandwidth rises up to 153 GHz with the nonlinear coefficient increased to $45 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$. On further increasing the nonlinear coefficient the chaotic bandwidth is reduced gradually.

Keywords: Kerr effect, erbium-doped fiber laser, chaos, bandwidth

PACC: 4265, 4255N, 4265T, 0545

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60777041) and the Natural Science Foundation for Young Scholars of Shanxi Province, China (Grant No. 2008021008).

[†] Corresponding author. E-mail: wangyc @ tyut.edu.cn