

波长可调谐混沌产生和同步的实验研究*

桑新柱 余重秀 王葵如

(北京邮电大学电子工程学院,北京 100876)

(2005 年 7 月 16 日收到,2006 年 4 月 13 日收到修改稿)

分析了掺铒光纤环形激光器中非线性高频混沌产生和同步的基本原理,提出了高频波长可调谐光混沌产生的实验方案,实验实现了不同波长高频混沌的产生.实验获得了高频混沌在传输 1 km 后与接收机激光器产生混沌的同步,为构建高速动态保密光混沌通信网络扫清障碍.

关键词:保密通信,掺铒光纤环形激光器,混沌,同步

PACC:0545,4255

1. 引言

随着社会的全面进步,通讯中的数据安全问题日益突出,特别是在军事、银行和电子商务等领域.混沌用于描述确定动态系统的无规则和不可预测的行为.在物理和生物系统中,混沌振荡器的同步是一种常见现象.由于混沌及其同步现象在保密通信中的巨大应用前景,近年来混沌同步在各种系统中的研究引起人们巨大的兴趣.混沌的同步首先在电路系统中得以实现^[1-3],并提出用于通信系统.但在电路系统实验研究中发现它的带宽只有几万赫兹,限制了它的通信容量.随后人们开展了激光器中混沌的产生和同步研究,以探索构建大容量保密光通信系统.目前已经开展了 Nd:YAG 激光器、CO₂ 激光器、半导体激光器和掺铒光纤激光器中的混沌同步现象研究^[4-7].光混沌通信的关键在于高频混沌的产生,以及发射机和接收机之间的光混沌同步.理论研究表明掺铒光纤激光器系统具有丰富的非线性混沌形态^[8-10],并且它产生激光混沌的波长位于光纤低损耗区,是实现安全混沌通信的一种较好的选择.目前国际上实验报道的掺铒光纤激光器中光混沌的产生和同步大多基于光调制原理^[7,11,12],产生混沌的频率较低,限制了它在高速光纤通信中的应用.我国研究者近年来也开展了混沌光通信方面的理论研究^[13,14],但尚未见实验报道.本文分析掺铒光纤环形激光器中基于非线性原理高频光混沌产生

和同步的基本模型,提出了波长可调谐混沌的实验方案,实验实现波长可调谐光混沌的产生.经过传输 1 km 后和接收机产生的混沌同步,为构建高速动态保密光混沌通信网络扫清障碍.

2. 基本模型分析

在包含线性双折射效应、群速度色散、偏振效应和非线性效应的情况下,掺铒光纤中电场 $E(z, t) = \epsilon(z, t)e^{i(k_0 z - \omega_0 t)}$ 在相对坐标 $\tau = t - z/v_g$ (v_g 为群速度色散)下可由下式描述^[15]:

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

式中 g 和 $n(\tau)$ 分别是增益参数和粒子数反转,线性算子 L 包括线性双折射、群速度色散和增益, z 表示光在光纤中传播位置.在频域线性算子可以表达为

$$L_{x,y} = \pm \frac{ik_0(n_x - n_y)}{2n_0} \mp \frac{\Delta}{n_0 c} i\omega - \frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 - \frac{gn(\tau)\omega^2 T_2^2}{1 + \omega^2 T_2^2}, \quad (2)$$

式中 ω 为角频率, $\Delta = n_0(n_x - n_y)$.非线性算子 N 与克尔非线性有关,可以表示为

$$N_{x,y} \epsilon_{x,y} = i\chi_3 \left\{ \left(|\epsilon_{x,y}(z, \tau)|^2 + \frac{2}{3} |\epsilon_{y,x}(z, \tau)|^2 \right) \epsilon_{x,y}(z, \tau) \right\}. \quad (3)$$

电场经过光纤产生的无量纲非线性相移为 ψ_{nl} , 在

* 国家自然科学基金(批准号 60577045)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号 20050013002)资助的课题.

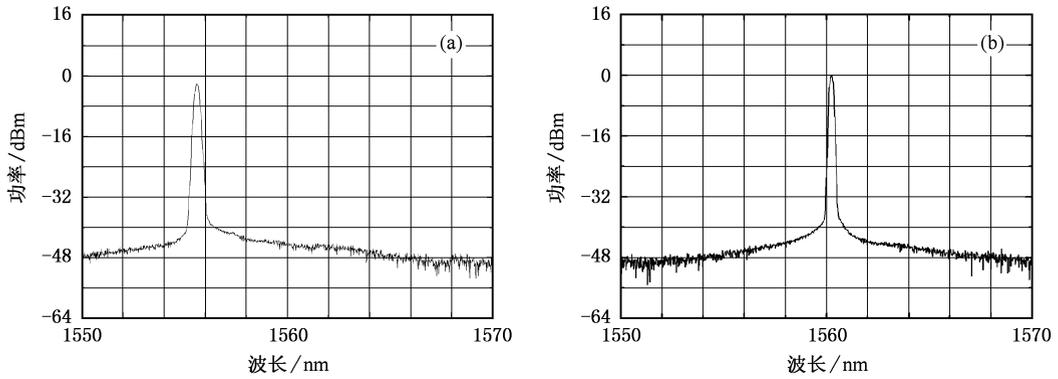


图2 非线性作用下产生的混沌光谱 (a) 1555.5 nm ;(b) 1560.5 nm

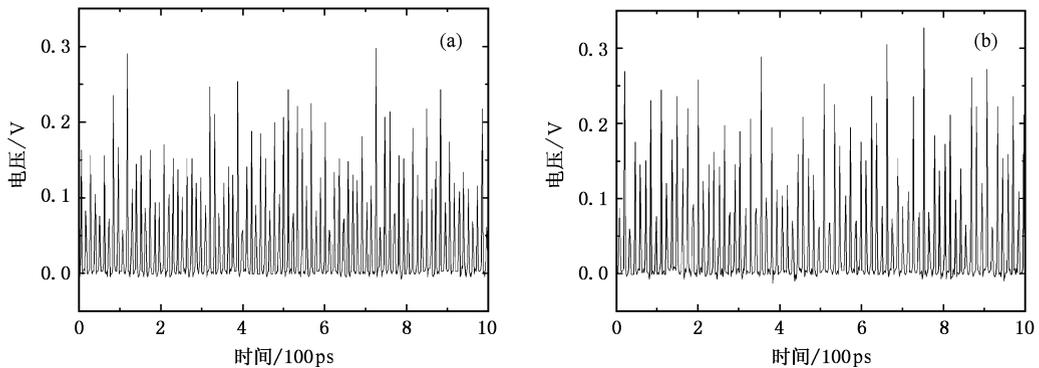


图3 两波长处产生的混沌序列 (a) 1555.5 nm ;(b) 1560.5 nm

以获得不同波长的混沌激光。采用光谱仪以及光探测器和数字示波器探测输出光的光谱和时域序列，它们的频谱随时间波动。在抽运电流为 160mA 时，实验测得两波长处在某时刻的光谱输出分别如图 2 (a) 和 (b) 所示，它们的时间序列分别如图 3 (a) 和 (b) 所示。发射机激光器产生的光混沌经过单模光纤传输 1 km 后进入右边的接收机激光器。

为实现混沌序列的同步，图 1 中的右边接收机激光器采用的器件参数需要与左边发射机激光器中器件参数基本相同。在接收机的光纤激光器中光纤延时线用于精确调节接收机激光器腔的长度。调节可调谐滤波器 TF2，使两个激光器具有相同的输出波长。在发射机中抽运电流为 160mA，两激光器的输出波长都位于 1560.5 nm 时，精心调节接收机光纤激光器中的抽运功率、偏振控制器和光纤延时线，探测器 PD1 和 PD2 可以获得几乎完全相同的混沌信号，图 4 给出了两激光器发出的混沌脉冲序列在时域上的比较。可以看出得到的混沌信号在时域上基本上一致，很好地实现了同步。同步的另一项测试方法是绘出接收机激光器脉冲强度与接收机激光器脉冲强度之间的关系，如果形成的点簇形成一条

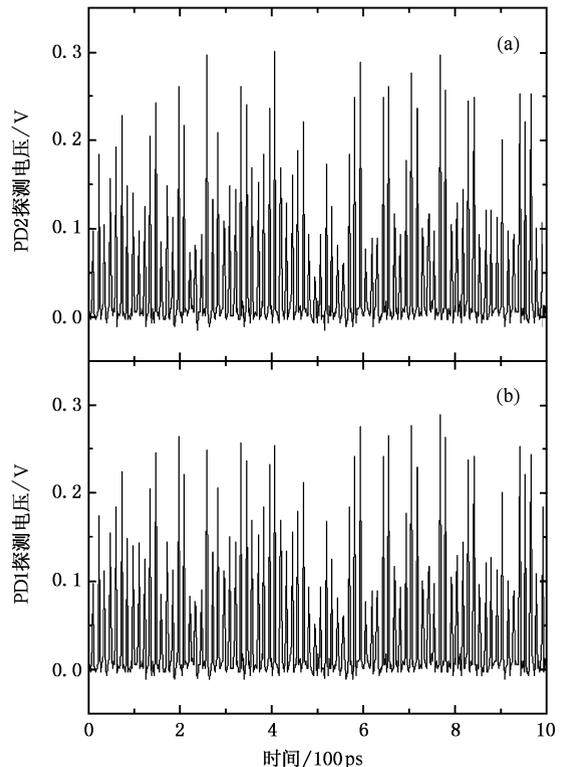


图4 两探测器同时测得的混沌信号的同步

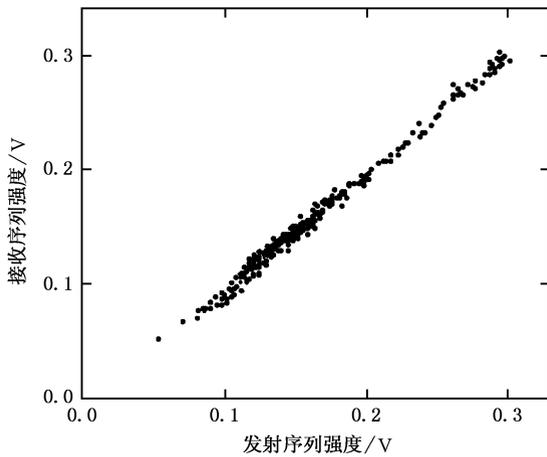


图5 接收机激光序列与发射机激光序列的关系

直线, 并 45° 倾角, 则 100% 同步. 实验测量获得的结果如图 5 所示, 可以看出基本上实现了同步. 将发射机激光器输出的混沌激光调谐到其他波长位置, 按上述方法进行调节, 可以获得类似的结果.

4. 结 论

文中分析了掺铒光纤环形光纤激光器非线性高频混沌产生以及实现同步的基本原理. 构建了基于该原理波长可调谐光混沌产生和同步的实现装置, 实验研究了不同波长处光混沌的产生. 产生的混沌激光传输 1 km 后, 与接收机混沌激光实现了同步, 为进一步研究高速动态混沌保密通信系统打下基础.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Pecora L M, Carroll T L 1991 *Phys. Rev. A* **44** 2374
- [3] Cuomo K M, Oppenheim A V 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 65
- [4] Roy R, Thornburg K S 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 2009
- [5] Sugawara T, Tachikawa M, Tsukamoto T et al 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3502
- [6] Mirasso C R, Colet P, Garcia-Fernandez P 1996 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8** 299
- [7] Luo L G, Chu P L, Whitbread T et al 2000 *Opt. Commun.* **176** 213
- [8] Sanchez F, Stephan G 1996 *Phys. Rev. E* **53** 2110
- [9] Williams Q L, Garcia-Ojalvo J, Roy R 1997 *Phys. Rev. A* **55** 2376
- [10] Zhang S H, Yang H, Qian X Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3706 (in Chinese) [张胜海、杨 华、钱兴中 2004 物理学报 **53** 3706]
- [11] Kim S, Lee B, Kim D H 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 290
- [12] Zhang F, Chu P L, Lai R et al 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 549
- [13] Wu J G, Wu Z M, Lin X D et al 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4169 (in Chinese) [吴加贵、吴正茂、林晓东等 2005 物理学报 **54** 4169]
- [14] Zhang S H, Shen K 2002 *Chin. Phys.* **11** 894
- [15] Abarbanel H D I, Kennel M B, Buhl M et al 1999 *Phys. Rev. A* **60** 2360
- [16] Luo L G, Tee T J, Chu P L 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 972
- [17] Zhang F, Chu P L 2004 *Opt. Commun.* **237** 213

Experimental investigation on wavelength-tunable chaos generation and synchronization^{*}

Sang Xin-Zhu Yu Chong-Xiu Wang Kui-Ru

(*School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

(Received 16 July 2005; revised manuscript received 13 April 2006)

Abstract

Fundamental principles of high-frequency chaos generation and synchronization in Er-doped fiber ring lasers are analyzed. The experimental configuration for generating wavelength-tunable chaos is proposed, and high-frequency chaotic lasers at different wavelengths are generated. Synchronization between the chaos generated in the receiver laser and the chaos transmitted over 1 km that is generated in the transmitter laser are achieved, which paves the way for constructing the high speed secure chaos communication network.

Keywords : secure communication, Er-doped fiber ring laser, chaos, synchronization

PACC : 0545, 4255

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60577045), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20050013002).