

平坦宽带混沌激光的产生及同步*

张秀娟 王冰洁 杨玲珍 王安帮 郭东明 王云才†

(太原理工大学理学院物理系,太原 030024)

(2008 年 7 月 20 日收到,2008 年 9 月 26 日收到修改稿)

利用光纤环长外腔光反馈半导体激光器产生了频谱平坦的宽带混沌激光,其对应的激光频谱可有效地隐藏外腔的谐振频率,增加了系统的保密性.通过单向耦合方式,将产生的混沌激光注入到另一个参数相近的半导体激光器中,实现了平坦宽带混沌同步输出,两同步激光器输出的相关系数达到 0.84.同时实验研究了注入强度和主从激光器的频率失谐对同步质量的影响,结果表明在强光注入锁定下,在很大频率失谐范围内均可实现同步,而且注入强度越大,主从激光器输出的相关系数越大,维持混沌同步所允许的频率失谐范围越大.

关键词:混沌同步,单向光纤环,光反馈,半导体激光器

PACC:4265T,4255P,4230Q

1. 引言

自从 1990 年 Pecora 和 Carroll^[1]提出并实验实现电路系统的混沌同步以来,混沌保密通信在近年来得到了广泛的关注.与电路系统产生的混沌载波相比,激光系统可以产生高维宽带的混沌载波,更适合高速大容量的保密通信.迄今为止,人们已相继实现了基于 Nd:YAG 激光器^[2],CO₂ 激光器^[3],掺铒光纤激光器^[4],半导体激光器^[5]的混沌同步实验系统.由于光反馈半导体激光器可以产生高维宽带的混沌激光^[6],是实现光学混沌通信的理想光源,在混沌产生、同步及通信的研究中备受关注^[7-12].Fischer 等人利用光反射镜反馈半导体激光器实现了混沌同步^[13],并实验验证了在通信中潜在的应用,但实验中并未分析各参数对同步质量的影响.后来, Lee 等人和 Chlouverakis 等人分别实验研究了主从激光器的频率失谐和反馈强度对同步的影响^[14,15].Liu 等人利用单向环光反馈半导体激光器实验实现了混沌同步^[16],并实验和理论分析了强注入和弱注入下注入系数和频率失谐对同步质量的影响^[17].然而他们实验中得到的同步混沌载波的频谱中有很明显的外腔谐振峰.在混沌保密光通信中,外腔长度通常作为保密通信的密钥^[18,19],频谱平坦的宽带混沌载波可以

有效地隐藏外腔特征信息,增强系统的保密性.文献[8]研究了不同长度的光纤外腔半导体激光器产生的混沌激光频谱,发现当光纤外腔的长度在几米的量级时可获得高维频谱连续的混沌载波.本文利用光纤环长外腔光反馈半导体激光器得到频谱平坦的宽带混沌载波.通过强光单向注入,在全光纤的非对称结构中实现了平坦宽带的混沌同步,同时分析了注入强度和频率失谐对同步质量的影响.此装置更容易与目前的光纤通信兼容,对构建高速大容量的混沌光保密通信网络具有显著的指导意义.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示,实验中所用的两个参数相近的半导体激光器为武汉电信器件有限公司的 LDM5S752,两激光器的中心波长(工作在室温下)和量子斜效率的失配为 3.5%,主从激光器的阈值电流分别为 23.0 mA 和 22.2 mA.图中虚线框内的是混沌发射机,用外腔光反馈的 DFB 半导体激光器来产生混沌激光,外腔是单向传输的光纤环,腔长为 15.4 m.在光纤环外腔中,光隔离器保证光单向传输,用一个 80:20 的耦合器使 20%的光反馈,80%的光输出;反馈光的强度用光衰减器来调节,偏振控制器(PC₁)用来调节反馈光的偏振状态.发射机出射的

* 国家自然科学基金(批准号 60577019 和 60777041)与山西省国际合作项目(批准号 2007081019)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

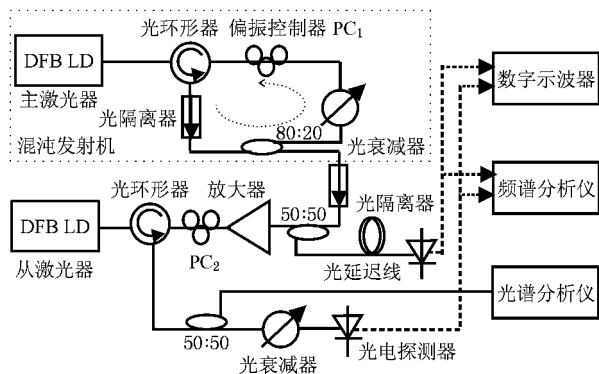


图 1 基于光纤环反馈 DFB 半导体激光器实现混沌同步的实验装置

混沌激光经过光隔离器、50:50 的耦合器、光放大器 (EDFA) 和偏振控制器 (PC₂) 注入单独的 DFB 半导体激光器。光隔离器保证混沌激光单向耦合;用 50:50 的耦合器分出 50% 的光用来实时探测主激光器的输出,混沌光经 EDFA 放大后注入从激光器,通过改变 EDFA 的增益来控制注入强度;偏振控制器 (PC₂) 用来调节注入光的偏振状态,使得注入光的偏振态与从激光器输出光的偏振态相匹配,保证混沌光更

有效地注入。数字存储示波器 (Tektronix TDS3052B) 和频谱分析仪 (Agilent N9010A) 用来实时观测主从激光器的输出状态,光谱分析仪 (Agilent 86140B) 来探测从激光器的输出光谱。可以利用实时示波器观测主从激光器的同步情况,但需在主激光器的探测路径中引入光延迟线用来补偿主从激光器的输出延时,从激光器探测路径中的衰减器以使得从激光器的输出平均功率与主激光器的一致。

主激光器的反馈强度表示为 $R = 10 \lg [P_f (1 - \eta) (P_o / 1 - \eta)]$, 其中 P_f 为返回激光器之前的反馈光的平均功率, P_o 为激光器输出的平均功率, $\eta = 0.3$ 为激光器输出端面的反射损耗。用 $\Delta f = f_m - f_s$ 来表示主从激光器之间的频率失谐, 其中 f_m 和 f_s 分别为主激光器和从激光器自由输出时的光频率; 用 $K_{inj} = 10 \lg (P_{inj} / P_{out})$ 来表示主激光器输出的混沌光注入从激光器的注入强度, 其中 P_{inj} 为混沌光注入从激光器之前的光功率, P_{out} 为从激光器自由输出时的光功率。我们采用相关系数来定量地表征同步质量, 其表达式如下:

$$\rho = \frac{[P_m(t) - P_m(t)] [P_s(t + \Delta t) - P_s(t + \Delta t)]}{\sqrt{| P_m(t) - P_m(t) |^2 | P_s(t + \Delta t) - P_s(t + \Delta t) |^2}}$$

其中, $P_m(t)$ 为主激光器的输出功率, $P_s(t + \Delta t)$ 为从激光器的输出功率, Δt 为主从激光器输出的时间延迟。当主从激光器的输出完全一致时, 相关系数为 1, 当两激光器输出完全不相关时, 相关系数为 0。相关系数越接近 1, 同步性越好。

3. 实验结果

实验中, 主激光器的偏置电流为 $1.56 I_{th}$ (36 mA), 中心波长为 1554.2 nm, 外腔的反馈延迟时间为 76.8 ns。缓慢调节光纤环内的光衰减器和偏振控制器 (PC₁) 当反馈强度为 -13.1 dB 时, 实验得到频谱平坦的宽带混沌激光输出, 其时序图和对应的频谱图如图 2 所示, 图 2(a) 为混沌波的时间序列; 图 2(b) 为输出的时间序列对应的频谱, 图中黑色的曲线为混沌态时的输出频谱, 灰色的曲线为频谱仪的噪声基底。从图 2(b) 可以看出, 得到的混沌激光

的频谱连续平坦, 没有出现反馈外腔引起的谐振峰, 明显地优于文献 [10, 13, 16] 的实验结果。由于在反馈强度一定的情况下, 长的外腔可以得到更多的外腔模式 (ECM), 这样激光器输出高维的混沌光的频谱连续平坦^[8, 20]。同时我们利用光反馈半导体激光器的速率方程数值模拟了频谱随腔长的变化, 结果如图 3 所示, 从图中可以看出, 随反馈腔长的增加, 混沌频谱中的外腔谐振峰, 也随之增多, 最后频谱变得平滑, 如图 3(c) 所示。因此实验中利用长腔反馈有效地隐藏了反馈的外腔延迟时间 (对应光反馈半导体激光器的外腔长度), 从而增加了系统保密性。

为了实现混沌同步, 发射机输出的混沌光通过 EDFA 放大后强注入从激光器, 我们通过调节 EDFA 的抽运电流来改变注入强度, 微小的调节从激光器的工作温度来改变主从激光器的频率失谐, 调节偏振控制器 (PC₂) 使注入光的偏振态与从激光器输出光的偏振态相匹配时得到很好的同步。从激光器的偏置电流固定在 $1.3 I_{th}$ (26 mA)。当注入强度 $K_{inj} =$

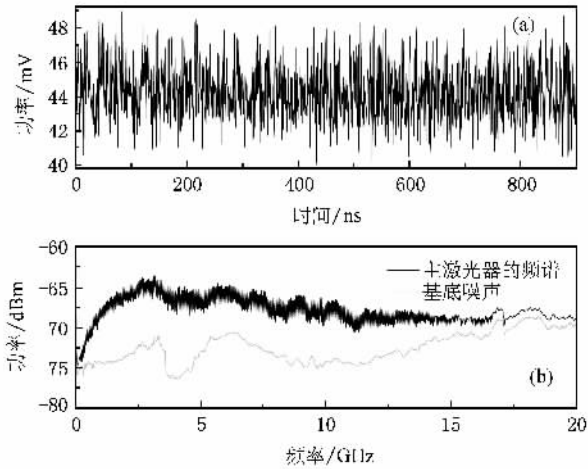


图2 主激光器的混沌输出 (a)时间序列 (b)对应的频谱(频谱仪的分辨率带宽(RBW)为3 MHz,视频带宽(VBW)为100 Hz)

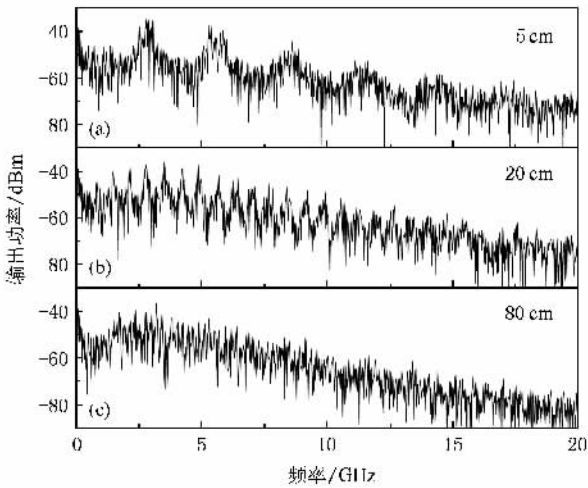


图3 数值模拟不同外腔长时发射机输出的混沌光的频谱 (a)腔长为5 cm (b)腔长为20 cm (c)腔长为80 cm

10.5 dB,主从激光器之间的频率失谐为 $\Delta f = 19.2$ GHz时,接收机也输出平坦宽带的混沌激光.利用光延迟线补偿了两激光器输出的时间延迟时,得到了平坦宽带的混沌同步,同步的相关系数为0.84.此时对应的主从激光器输出的时间序列和对应的频谱如图4所示,图中黑色的曲线为主激光器输出的时间序列,灰色的曲线为从激光器输出的时间序列.图4(a)为主从激光器的时间序列,可以看到得到的混沌光在时域上基本一致;图4(b)为对应的频谱,从图中可知,主激光器和从激光器输出的平坦宽带的同步混沌激光,是信号保密传输的优选载波.图5为主从激光器时序的功率相关点图.

我们研究了主从激光器的频率失谐对同步质量

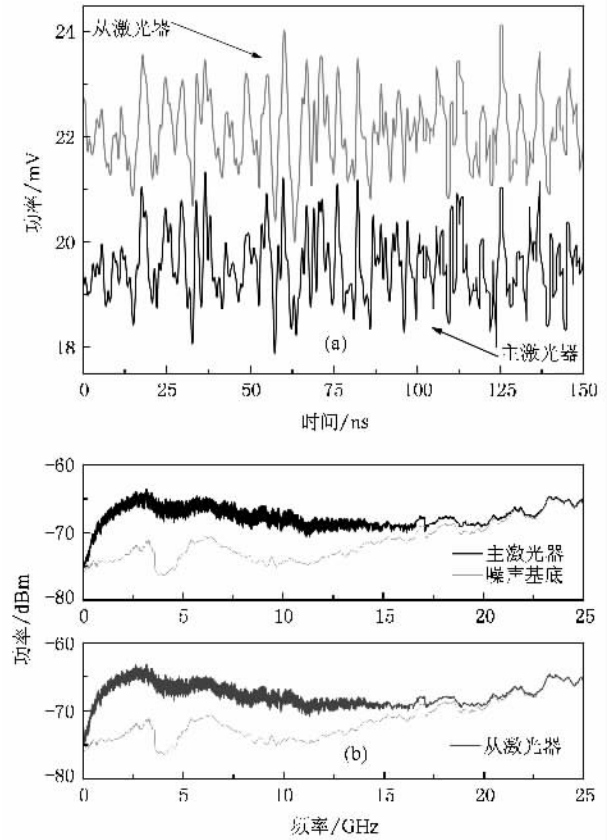


图4 主从激光器同步时的输出 (a)时间序列 (b)对应的频谱

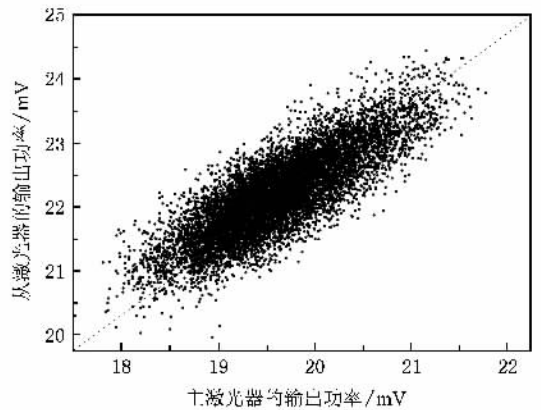


图5 主从激光器同步时输出功率的相关点图(此时主从激光器输出的相关系数为0.84)

的影响.注入强度固定在7.9 dB和10.5 dB时,调节从激光器的温度使其波长改变,使主从激光器的频率失谐从-11 GHz变化到40 GHz,观察其同步质量的变化.其同步质量(相关系数表征)随频率失谐的变化如图6所示.从图中可以看到,在一定的注入强度下,当频率失谐从负失谐到正失谐变化时,相关系数会先增大后减小,会存在一个最佳的频率失谐使

得同步相关系数最大,最佳的同步都出现在正失谐的地方.当注入强度为 7.9 dB 时,频率失谐从 3 GHz 变化到 17 GHz,从激光器都工作在注入锁定状态,并且都能保持很好的同步性(相关系数大于 0.77).当注入强度为 10.5 dB 时,相关系数最大时频率失谐为 19.2 GHz,注入强度越大,从激光器可以被注入锁定允许的频率失谐的范围越大,在失谐为 9.2 GHz 到 27.8 GHz 的范围内,主从激光器的输出维持同步(相关系数都大于 0.8).从上面我们可以得到,在强光注入锁定下,同步对两激光器的频率失谐有很大的容忍性,而且,注入强度越大,维持同步所允许的频率失谐范围越大.

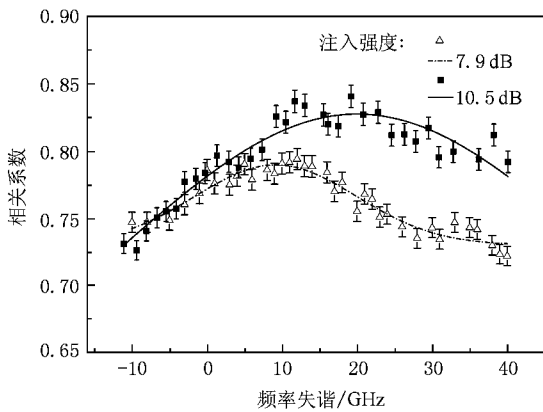


图 6 注入强度分别为 7.9 dB 和 10.5 dB 时,主从激光器的频率失谐对同步相关系数的影响

同时,在频率失谐一定的情况下分析了注入强度对同步质量的影响.主从激光器的频率失谐分别固定在 12.0 GHz 和 19.2 GHz 时,注入强度对相关系数的影响如图 7 所示.从图中可以明显地看到,在不同的失谐下,相关系数都是随注入强度的增加而增加,当增加到一定值时,会趋于平缓并缓慢的下降.注入强度增加会导致从激光器阈值载流子减少,能够达到阈值的足够的光子由外光注入来提供,所以迫使从激光器的输出与主激光器的一致,这样同步性就会随注入强度的增加而提高.当相关系数增加到 0.84 时就开始缓慢下降,由于实验中 EDFA 的自

发辐射噪声(ASE)的影响,增大 EDFA 的抽运电流时,引入的 ASE 越强,就越会严重影响系统的同步性.

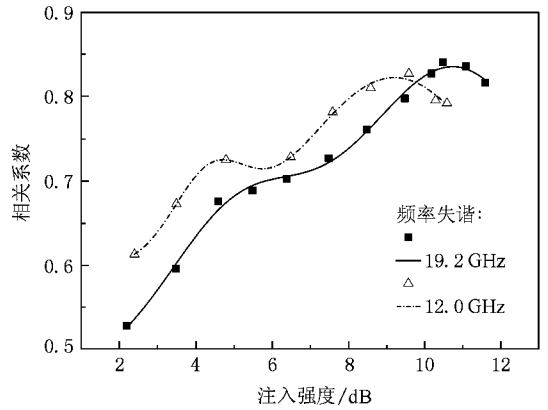


图 7 频率失谐分别为 12.0 GHz 和 19.2 GHz 时,注入强度对相关系数的影响

4. 结 论

利用光纤环长外腔光反馈半导体激光器产生了频谱光滑平坦的宽带混沌激光,通过单向耦合方式,将产生的混沌光注入从激光器,在 $K_{inj} = 10.5$ dB 强光注入, $\Delta f = 19.2$ GHz 的频率失谐下,实现频谱平坦的混沌载波的同步,同步的相关系数为 0.84.得到的频谱平坦宽带的混沌载波有效地隐藏了光反馈半导体的外腔特征,增加了系统的保密性.同时实验研究了注入强度和主从激光器的频率失谐对同步性的影响.结果显示在 10.5 dB 和 7.9 dB 强光注入锁定下,频率失谐在 -11 GHz 到 40 GHz 的范围内,同步的相关系数都能维持在 0.7 以上,同步最佳出现在正失谐处,并且注入强度越大,维持同步所允许的频率失谐的范围越大,同步质量会随注入强度的增加明显提高.

感谢安捷伦科技有限公司为我们无偿提供频谱仪.

[1] Pecora L M ,Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
 [2] Roy R ,Thornburg K S 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 2009

[3] Sugawara T ,Tachikawa M ,Tsukamoto T ,Shimizu T 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3502

- [4] 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]
- [5] Sivaprakasam S ,Shore K A 1999 *Opt. Lett.* **24** 1200
- [6] Kong L Q ,Wang A B ,Wang H H ,Wang Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2266 (in Chinese) [孔令琴、王安帮、王海红、王云才 2008 物理学报 **57** 2266]
- [7] Masoller C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 2782
- [8] Annovazzi-Lodi V ,Merlo S ,Norgia M 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1171
- [9] Zhong D Z ,Xia G Q ,Wang F ,Wu Z M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3279 (in Chinese) [钟东洲、夏光琼、王飞、吴正茂 2007 物理学报 **56** 3276]
- [10] Fujino H ,Ohtsubo J 2000 *Opt. Lett.* **25** 625
- [11] Argyris A ,Kanakidis D ,Bogris A ,Syvridis D 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **10** 927
- [12] 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]
- [13] Fischer I ,Liu Y ,Davis P 2000 *Phys. Rev. A* **62** 011801-1
- [14] Lee M W ,Paul J ,Pierce I ,Shore K A 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 302
- [15] Chlouverakis K E ,Argyris A ,Bogris A ,Syvridis D 2007 *Phys. D* **10** 1016
- [16] Liu Y ,Takiguchi Y ,Davis P ,Aida T ,Saito S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 4306
- [17] Liu Y ,Davis P ,Takiguchi Y ,Aida T ,Saito S 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 269
- [18] Bogris A ,Rizomiliotis P ,Chlouverakis K E ,Argyris A ,Syvridis D 2008 *IEEE J. Quantum Electron.* **44** 119
- [19] Lee M W ,Rees P ,Shore K A ,Ortin S ,Pesquera L ,Valle A 2005 *IEE Proc. - Optoelectron* **152** 97
- [20] Masoller C 1994 *Phys. Rev. A* **50** 2569

Flat broadband chaotic carrier generation and synchronization *

Zhang Xiu-Juan Wang Bing-Jie Yang Ling-Zhen Wang An-Bang Guo Dong-Ming Wang Yun-Cai[†]

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

(Received 20 July 2008 ; revised manuscript received 26 September 2008)

Abstract

The chaotic carrier with smooth spectrum and broad bandwidth is generated by a distributed feedback (DFB) semiconductor laser subject to unidirectional fiber ring optical feedback. The smooth spectrum of the obtained chaotic carrier hides the external cavity resonance frequency peak ,therefore the security of the system is enhanced. By unidirectional coupling ,we implement the stable chaos synchronization when the chaotic light is injected into a solitary DFB laser diode. The correlation coefficient of synchronization is 0.84. The effects of injection strength and optical frequency detuning on synchronization are investigated experimentally. The results show that in conditions of strong injected locking the synchronization can be achieved in a large range of frequency detuning ,and the stronger injection corresponds to the larger range of frequency detuning in which chaos synchronization maintains. The synchronization quality improves with the injection strength increasing.

Keywords : chaos synchronization , unidirectional fiber ring , optical feedback , semiconductor laser

PACC : 4265T , 4255P , 4230Q

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60577019 and 60777041) and the International Cooperation Project of Shanxi Province ,China (Grant No. 2007081019).

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