

# 双反馈半导体激光器的混沌特性研究

赵严峰<sup>†</sup>

(黄淮学院电子科学与工程系 驻马店 463000)

(2009 年 1 月 17 日收到 2009 年 4 月 7 日收到修改稿)

实验利用双反馈半导体激光器获得了关联维数为 3.8 的高维混沌光, 同时对比分析了双反馈与单反馈两种不同模式产生混沌的区别。结果表明: 在反馈强度均为  $-26$  dB 时, 双反馈产生混沌的关联维数高于单反馈产生混沌的关联维数 2.6。双反馈可获得带宽为 11 GHz 的混沌光, 为单反馈产生混沌带宽 5.5 GHz 的两倍。当双反馈的两个外腔长度不相等时, 混沌的自相关曲线能很好的隐藏外腔长度信息, 可提高混沌通信的保密性。

关键词: 双反馈, 半导体激光器, 混沌, 带宽

PACC: 0545, 4255P, 4265T

## 1. 引言

近年来, 混沌由于在保密通信<sup>[1-4]</sup>及激光测距<sup>[5,6]</sup>中的潜在应用得到了人们的广泛关注。对于混沌的产生及应用, 人们基于单反馈半导体激光器进行了大量的研究<sup>[7-8]</sup>。2002 年, Kusumoto 等<sup>[9]</sup>用 780 nm 的单反馈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<sup>[10]</sup>实现了信号带宽为 3.5 GHz 的混沌保密通信。事实上, 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, 如何产生更高带宽的混沌载波是实现高速混沌激光保密通信的必由之路。目前对于混沌带宽增强的研究主要集中于利用外光注入来实现。文献[11]通过数值模拟利用光反馈的方式实现了混沌带宽的增强。Takiguchi 等<sup>[12]</sup>数值模拟利用注入锁定技术产生了 8 GHz 带宽的混沌载波信号。然而, 很少有人利用双反馈实现混沌带宽的增强。文献[13]研究表明双反馈可以增加激光器产生混沌的关联维数。有矛就有盾, 伴随着混沌保密通信的出现, 许多研究人员将注意力集中在如何破解混沌保密通信。文献[14]研究表明从混沌载波自相关曲线的次高峰所对应的延迟时间即可提取出外腔长度信息。这就降低了混沌通信的保密性。因此, 如何隐藏外腔长度信息也成为混沌保密通信的一个重点问题。

基于此, 本文实验分析了双反馈半导体激光器

产生混沌的关联维数、带宽及自相关曲线等特性, 同时与单反馈半导体激光器产生的混沌做了对比分析, 结果表明: 双反馈可以提高混沌载波的带宽及关联维数。且其自相关曲线的旁瓣水平(peak sidelobe level, PSL)相对于单反馈时更低。同时发现双反馈产生混沌的自相关曲线可以很好地隐藏外腔长度的信息。结果表明: 双反馈产生的混沌载波在宽带混沌保密及抗干扰的混沌激光测距中具有更大的应用前景。

## 2. 实验过程及分析

实验装置如 1 图所示, 此系统中的反馈由平面镜  $M_1$  和  $M_2$  提供。半导体激光器(LD)输出光经透镜准直后, 经过中性滤波片, 被分束器  $BS_1$  ( $R/T = 5:5$ ) 分成两束, 透射光由反射镜  $M_1$  反射并耦合进激光器, 实现光反馈。反射光经过分束器  $BS_2$  后, 一束经光阑由  $M_2$  反射, 与  $M_1$  形成双反馈。另一束作为探测光, 由数字示波器、光谱分析仪及频谱分析仪进行检测。反馈光的强度大小通过调节中性滤波片(NDF)来改变。实验中所用激光器的中心波长为 808 nm, 阈值电流  $I_{th}$  为 45.5 mA。

实验中, 反馈强度定义为  $r = 10\log(P_1/P_2)$ ,  $P_1$  与  $P_2$  分别为反射光与激光器输出光强度。令  $M_1$ ,  $M_2$  产生的反馈强度分别为  $r_1$  和  $r_2$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  与 LD 之间的反馈腔长度分别为  $l_1$  和  $l$ 。

<sup>†</sup> E-mail: yanfzhao@163.com

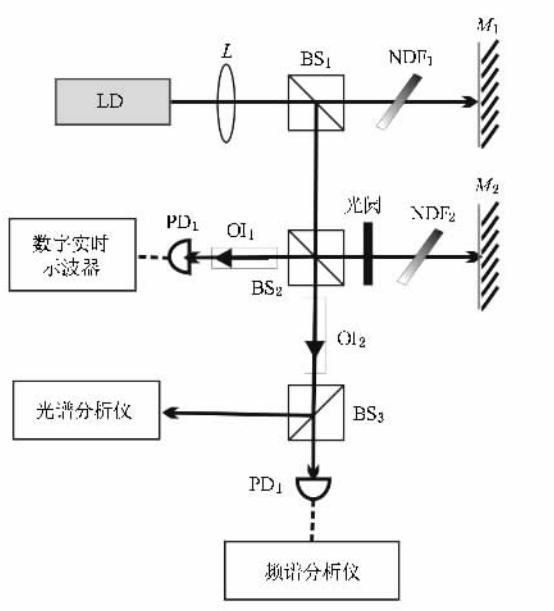


图1 实验装置图( BS: 分束器, M: 反馈镜, OI: 光隔离器, NDF: 可调中性滤波片, PD: 光电探测器 )

实验中, 设置激光器的偏置电流  $I_b = 1.5I_{th}$ , 当

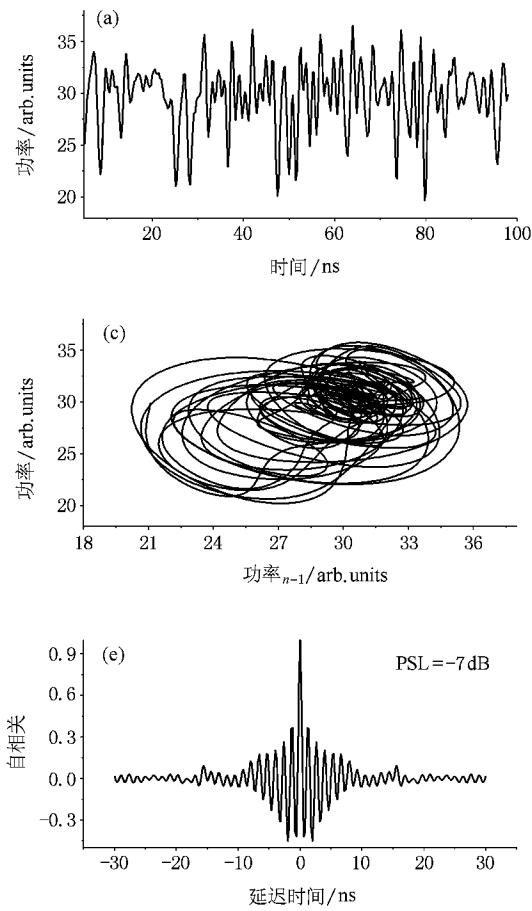
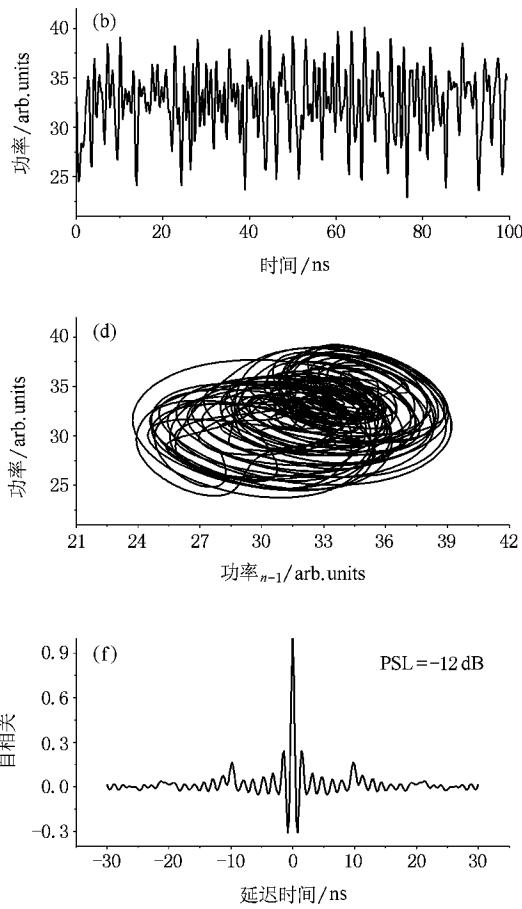


图2 单反馈((a)(c)(e))与双反馈((b)(d)(f))下混沌输出的时序图((a)(b))、相图((c)(d))及自相关图((e)(f)) (反馈强度  $r = -26$  dB)

$l_1 = l_2 = 24$  cm, 并且反馈强度相同时, 对比分析双反馈及单反馈输出混沌光的特性。首先闭合光阑, 观察单反馈情况下混沌的输出, 通过调节中性滤波片(NDF<sub>1</sub>), 当反馈强度达到  $r_1 = -30$  dB时, 激光器的输出变为混沌。图2(a)(c)(e)为反馈强度为  $r_1 = -26$  dB时混沌输出的时序图、频谱图、自相关及相图。从图中可以看出, 其时间序列表现为难以分辨的噪声特性, 相图则呈现出奇异吸引子; 由于反馈腔长度比较短, 因此频谱有比较明显的尖峰; 自相关曲线类似于  $\delta$  函数的线形。其品质可以用  $\delta$  峰的半峰全宽(full width at half maximum, FWHM)和旁瓣水平PSL即自相关曲线中的次最大值与峰值的比值来描述。从图中可以看出其半峰全宽 FWHM 及旁瓣水平PSL 分别为 0.2 ns(受示波器电带宽 3 GHz 的限制)和 -7 dB。然后, 打开光阑, 观察双反馈情况下混沌输出情况。图2(b)(d)(f)为反馈强度  $r_1 + r_2 = -26$  dB时, 激光器输出的混沌光的时序图、相图及自相关图。对比图2(e)与(f), 可以看出双反馈产生混沌的旁瓣水平(-12 dB)低于单反馈产生混沌的



旁瓣水平(  $-7$  dB).

同时,利用 Lyapunov 指数和关联维数对比分析了两种反馈模式下所产生的混沌状态.对任意信号的时间序列,可由其最大 Lyapunov 指数( Largest Lyapunov exponent)判定信号的状态,当最大 Lyapunov 指数为正值时信号是混沌的.此外,混沌信号的状态还可以由其时间序列的关联维数( correlation dimension)来表征.按照 G-P 算法( Grassberger 和 Procaccia 提出的从时间序列计算吸引子的关联维数的算法)<sup>[15]</sup>求得混沌的关联维数,且依照改进的最小数据量法<sup>[16]</sup>求得图 2 a) 及图 2 b) 混沌对应的最大 Lyapunov 指数为  $5.6 \times 10^6/s$  及  $8.6 \times 10^5/s$ ,其对应的关联维数分别为 2.6 和 3.8.由于双反馈相对于单反馈增加了一个自由度,因此使系统的动力学特性更加复杂.

图 3 表示两种反馈模式下,反馈强度相同时,激光器输出混沌光的频谱图.从图中可以明显看出:单反馈时混沌带宽( 3 dB 带宽)为 5.5 GHz,而双反馈产生的混沌带宽为 11 GHz,即在相同的反馈强度下,双反馈较单反馈可以产生更高带宽的混沌载波.频谱和自相关曲线是傅里叶变换对.根据变换的相似性质,频率范围越大,自相关曲线  $\delta$  峰的半峰全宽越小.因此双反馈自相关曲线的半峰全宽小于同反馈强度下单反馈产生的混沌的半峰全宽( 由于示波器带宽 3 GHz 的限制,从示波器所得数据图 2 e), (f) 中直接观察不到).这种特性使双反馈产生的混沌更有利的应用到宽带混沌保密通信及混沌激光雷达测距.

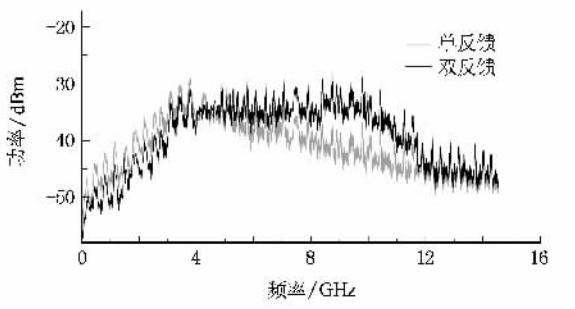


图 3 双反馈与单反馈下混沌输出的频谱图(反馈强度  $r = -26$  dB)

实验进一步分析了上述两种不同的反馈模式下混沌带宽及自相关曲线的旁瓣水平随反馈强度的变化.实验中激光器在反馈强度为  $r = -18$  dB 到  $-30$  dB 均为混沌输出.图 4(a) 为两种反馈模式下混沌带宽随反馈强度的变化.从图中可以看出,混沌

带宽随反馈强度的增大而增大,当反馈增加至  $r = -26$  dB 时,带宽趋于稳定,且两种模式下变化趋势相同.双反馈产生的混沌带宽明显高于单反馈产生的混沌带宽.从图 4(b) 中可以看出两种反馈模式下,旁瓣水平 PSL 随反馈强度增大变化趋势也是相同的,都是随反馈强度的增大而减小而后趋于稳定.但双反馈产生混沌在相关曲线的 PSL 明显低于单反馈时的 PSL.因此双反馈所产生的混沌用于测距时  
更强的抗干扰能力.

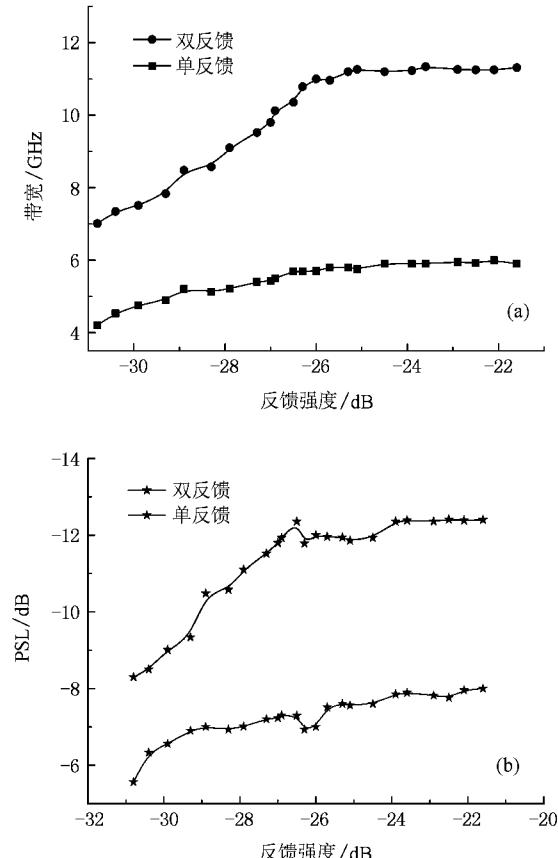


图 4 混沌带宽( a) 及旁瓣水平 PSL( b) 随反馈强度的变化

同时实验研究了  $l_1$  与  $l_2$  不等时,激光器输出混沌的特性.当  $l_1 = 24$  cm,  $l_2 = 30$  cm 调节中性滤波片使反馈强度  $r_1 + r_2 = -26$  dB, 观察产生混沌的特性.实验发现此时所产生混沌与  $l_1 = l_2$  时所产生混沌的频谱带宽相同,而 PSL 却不相同.图 5 为两种不同情况下所产生混沌的自相关图.从图 5(a) 中可以看出混沌自相关曲线的次高峰所对应的延迟时间能正确反映出反馈腔长.而当两反馈腔长度不同时,自相关曲线的次高峰所对应的延迟时间却不能正确反映反馈腔长度.这更增强了混沌通信的保密性.

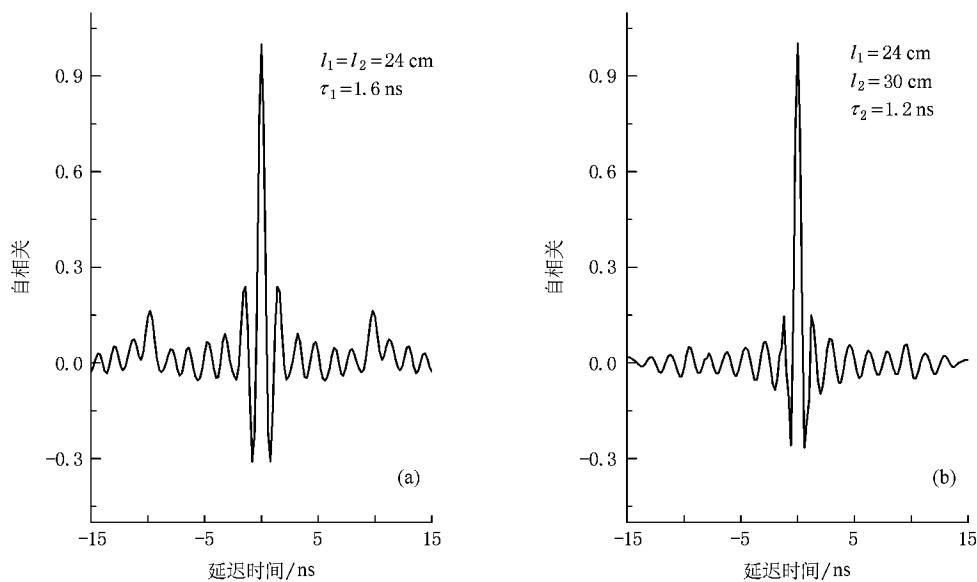


图 5 两外腔长度相同及不同时, 所产生混沌的自相关图 (a)  $l_1 = l_2 = 24 \text{ cm}$ ; (b)  $l_1 = 24 \text{ cm}, l_2 = 30 \text{ cm}$

### 3. 结 论

本文利用 DFB 半导体激光器, 通过实验对比分析了双反馈及单反馈产生的混沌特性. 结果表明: 在反馈强度相同的情况下, 双反馈可以提高混沌载波的带宽及关联维数. 其带宽可由单反馈时的 5.5

GHz 提高至 11 GHz. 关联维数也由 2.6 增至 3.8. 同时发现双反馈产生的混沌的自相关曲线可以很好的隐藏外腔长度的信息, 且双反馈相对于单反馈产生混沌, 其自相关曲线的 PSL 值更低. 结果表明相对于单反馈而言, 双反馈产生的混沌更适合应用于宽带混沌保密通信. 由于双反馈所产生的混沌具有更低的 PSL, 因此更适用于抗干扰混沌激光测距.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Sivaprakasam S, Shore K A 1999 *Opt. Lett.* **24** 1200
- [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] Fischer I, Liu Y, Davis P 2000 *Phys. Rev. A* **62** 011801-1
- [5] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Elect.* **10** 991
- [6] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Elect.* **40** 815
- [7] 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]
- [8] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2100 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 2100]
- [9] Kusumoto K, Ohtsubo J 2002 *Opt. Lett.* **27** 989
- [10] Paul J, Lee M W, Shore K A 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 920
- [11] 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、张耕伟、王安帮、王冰洁、李艳丽、郭萍 2007 物理学报 **56** 4372]
- [12] Takiguchi Y, Ohyagi K, Ohtsubo J 2003 *Opt. Lett.* **28** 31
- [13] Fischer I, Hess O, Elsäßer W, Göbel E 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2181
- [14] Koumou Y C, Colet P, Larger L, Gastaud N 2005 *IEEE J. Quant. Elec.* **41** 156
- [15] Grassberger P, Procaccia I 1983 *Physica D* **9** 189
- [16] Kim H S, Eykholt R, Salas J D 1999 *Physica D* **127** 48

# Chaos characteristics of the semiconductor laser with double external cavity optical feedback

Zhao Yan-Feng<sup>†</sup>

( *Electronic Science and Engineering Department, Huanghuai College, Zhumadian 463000, China* )

( Received 17 January 2009; revised manuscript received 7 April 2009 )

## Abstract

The chaos characteristics of a DFB semiconductor laser subjected to single and double external cavity optical feedback are analyzed experimentally. The results show that the correlation dimension, bandwidth of the chaos generated by one external cavity optical feedback can be expanded by using double external cavity optical feedback. When the laser is subjected to double external cavity optical feedback, the bandwidth with one external cavity feedback is increased from 5.5 GHz to 11 GHz. Correspondingly, the correlation dimension is increased from 2.8 to 3.6. The information of the external cavity length of the chaos generated by double external cavity optical feedback can be masked in the autocorrelation function.

**Keywords** : double external cavity optical feedback, semiconductor laser, chaos, bandwidth

**PACC** : 0545, 4255P, 4265T