

# 相干长度可连续调谐的半导体激光器<sup>\*</sup>

孔令琴 樊林林 王安帮 王云才<sup>†</sup>

(太原理工大学理学院物理系,太原 030024)

(2009 年 1 月 14 日收到,2009 年 2 月 18 日收到修改稿)

实验利用光反馈的方法获得了相干长度连续可调的半导体激光光源,通过调节反馈强度及抽运电流,有效控制了光反馈半导体激光器的相干长度.其相干长度可由无反馈时的几米连续调至  $100\ \mu\text{m}$ .同时,利用光反馈半导体激光器速率方程,数值模拟了反馈强度及抽运电流对半导体激光器相干长度的影响.实验及数值模拟均表明:通过调节反馈强度的大小可以有效控制半导体激光器的相干长度,光反馈半导体激光器的相干长度随反馈强度的增大而减小,而偏置电流对相干长度无明显影响.模拟结果与实验结果符合.

关键词:光反馈半导体激光器,相干长度,反馈,混沌

PACC:4255,4260D,4262,4265T

## 1. 引言

激光以其良好的相干性被广泛应用于各种光学测量技术中,如相干光纤通讯<sup>[1]</sup>、量子频标<sup>[2]</sup>等.然而对于一些测量技术如相干层析<sup>[3]</sup>、彩虹测量<sup>[4]</sup>等,高相干光源反而会引入散斑噪声,降低测量精度.因此具有良好光束特性的低相干光源则成为这些测量系统的最佳光源.超辐射发光二极管可产生低相干光,且已应用于激光全息成像<sup>[5]</sup>,但其光功率有待进一步提高.飞秒激光器虽可产生高亮度、相干长度较短的脉冲激光,但其体形巨大,且价格昂贵.半导体激光器以其体积小、光束小且致密以及价格低廉等优点,已成为很多光学测量技术的首选光源.因此对半导体激光器输出光的相干性进行有效控制,使其能够同时应用于相干和非相干测量技术中具有重要意义.

理论和实验研究表明,光反馈可以压窄或展宽半导体激光器的光谱线宽<sup>[6-8]</sup>.目前窄化线宽技术已经成熟,其产品外腔半导体激光器的线宽可压窄至  $1\ \text{kHz}$ <sup>[9]</sup>,即相干长度可达上百千米.在线宽展宽方面,Lenstra 等<sup>[10]</sup>提出在光反馈下,当半导体激光器的输出处于相干塌陷时,其光谱线宽可达  $25\ \text{GHz}$ .近年来,Peil 等人<sup>[4,11]</sup>利用短腔反馈实现了对半导体激光器相干长度的剪裁,获得了相干长度为

$130\ \mu\text{m}$  的非相干光源.并将此非相干光源应用于彩虹测量技术,提高了彩虹技术的测量精度.光反馈对半导体激光器相干性的影响,使其作为相干长度可调的光源成为可能.然而,很少有人研究利用长腔反馈实现对半导体激光器相干长度的连续可调.基于此,本文通过实验详细分析了长腔反馈下,抽运电流及光反馈强度对半导体激光器相干长度的制约条件,并获得了相干长度连续可调的半导体激光光源,其相干长度可从无反馈时的几米连续变化至  $100\ \mu\text{m}$ .

## 2. 实验装置及结果

实验装置如图 1 所示,半导体激光器输出光经透镜准直后,经过半波片 HWP,被偏振分束器 PBS 分成两束,其分束比可以通过调节半波片和偏振分束器的相对角度而改变.一束光由反射镜  $M$  反射并耦合进激光器,实现光反馈.另一束作为输出光,其中一部分进入迈克耳逊干涉仪,平面镜  $M_5$  被固定在压电陶瓷上,随着迈克耳逊干涉仪两臂长度之差的改变,干涉后的光强会逐次出现干涉相长( $P_{\max}$ )及干涉相消( $P_{\min}$ ).数字存储示波器(Tektronix TDS3052B)用来对干涉后的光强进行实时监控,利用相干条纹可见度来分析输出光的相干性.频谱分

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:60577019,60777041)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

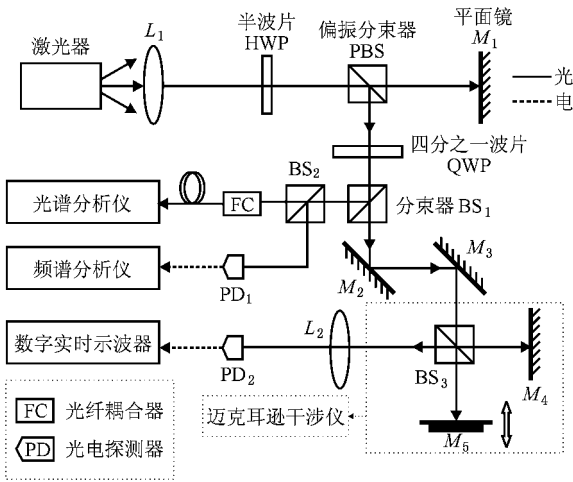


图 1 利用光反馈实现半导体激光器相干长度可调的实验装置

析仪 (Agilent N9010A) 和光谱分析仪 (Agilent 86140B) 用来实时观测激光器的输出状态及输出光谱. 实验所用的半导体激光器的中心波长为 778 nm, 阈值电

流为  $I_{th} = 49.5 \text{ mA}$ , 其工作温度通过温度控制器稳定在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . 输出偏振比为 120:1 的线偏振光. 四分之一波片 QWP 及偏振分束器 PBS 组成光隔离器, 用来阻止探测光返回激光器.

本文用反馈光强与激光器输出光强之比  $r$  表示反馈强度. 考虑到器件损耗及偏振方向等因素, 其反馈强度  $r$  可表示为

$$r = 10 \lg \{ R (1 - \eta_1) (1 - \eta_2) \sin^2 2\alpha \} \quad (1)$$

其中,  $R = 93\%$  为反射镜  $M_1$  的强度反射率,  $\eta_1 = 5\%$ ,  $\eta_2 = 8\%$  分别为 PBS 及 HWP 的损耗,  $\alpha$  为激光的偏振方向与半波片的光轴之间的夹角.

同时, 用条纹可识别度  $V_{(l)}$  来衡量激光器输出光的相干程度, 其表达式为

$$V_{(l)} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (2)$$

其中,  $l$  为迈克耳逊干涉仪两臂长度之差引起的光程差.

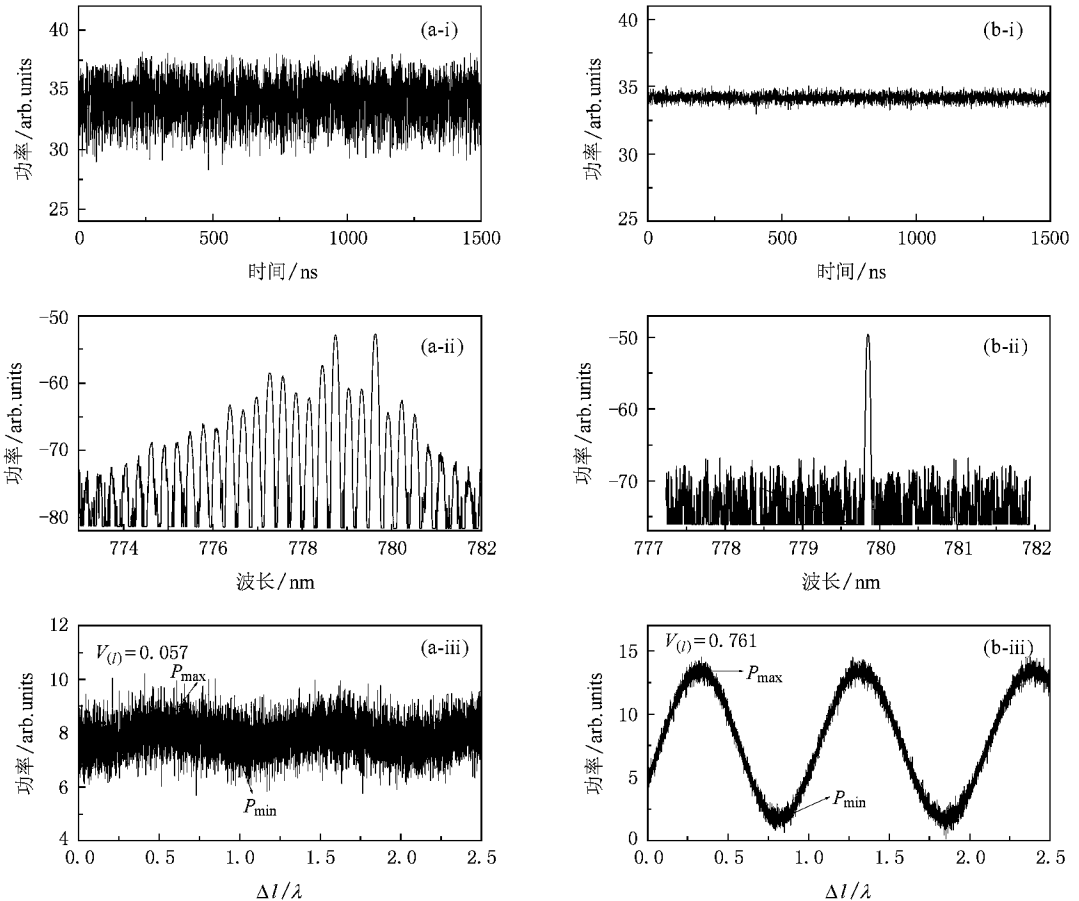


图 2 偏置电流  $I_b = 1.52 I_{th}$ , 无反馈 (b) 及反馈强度  $r = -20.6 \text{ dB}$  (a) 时激光器输出光的时序图 (i), 光谱图 (ii), 及条纹可识别度  $V_{(l)}$  图 (iii) ( $\Delta l$  表示光程差的改变量)

设置激光器抽运电流  $I_b = 1.52I_{th}$ , 外腔长为 30 cm. 实验发现, 在适当的反馈强度下, 半导体激光器的输出进入相干塌陷区, 此时激光的相干性减弱, 进一步增加反馈, 激光器的输出进入混沌状态, 激光的相干性严重恶化. 图 3 (a) 及 (b) 分别表示反馈为  $r = -20.6$  dB 及无反馈时, 激光器输出的时序 (i), 光谱 (ii) 及条纹干涉图 (iii). 通过调节半波片的偏振方向, 发现当反馈强度  $r = -20.6$  dB 时, 激光器的输出进入高维混沌状态, 同时激光器由单模振荡变为多纵模振荡, 如图 3 (a-i), (a-ii) 所示. 图 3 (a-iii), (b-iii) 分别显示了光程差为 8 mm 时, 激光器有无反馈时, 输出的条纹干涉图.  $\Delta l$  表示光程差的变化. 从图中可以看出, 无反馈时激光器输出光的条纹可识

别度  $V_{(l)}$  为 0.761, 而当反馈强度为  $r = -20.6$  dB 时, 激光器输出光的条纹可识别度迅速下降至 0.057. 光反馈严重破坏了激光器输出光的相干性.

相干长度  $L$  定义为在可见度包络曲线中, 当可见度下降到最大值的  $1/e$  处时对应的光程差. 无反馈时, 激光器输出光的相干长度超出了迈克耳逊干涉仪的测量范围. 实验利用杨氏双缝干涉的方法, 测出此时激光的相干长度约为几米. 随着反馈强度的增大, 激光器会经历单周期 ( $P_1$ )、倍周期 ( $P_2$ ) 从而进入混沌状态 (Chaos). 图 3 为激光器在不同输出状态下所对应的相干长度随反馈强度的变化, 插图 (a); (b); (c) 分别为激光器在不同输出状态下所对应的时序图.

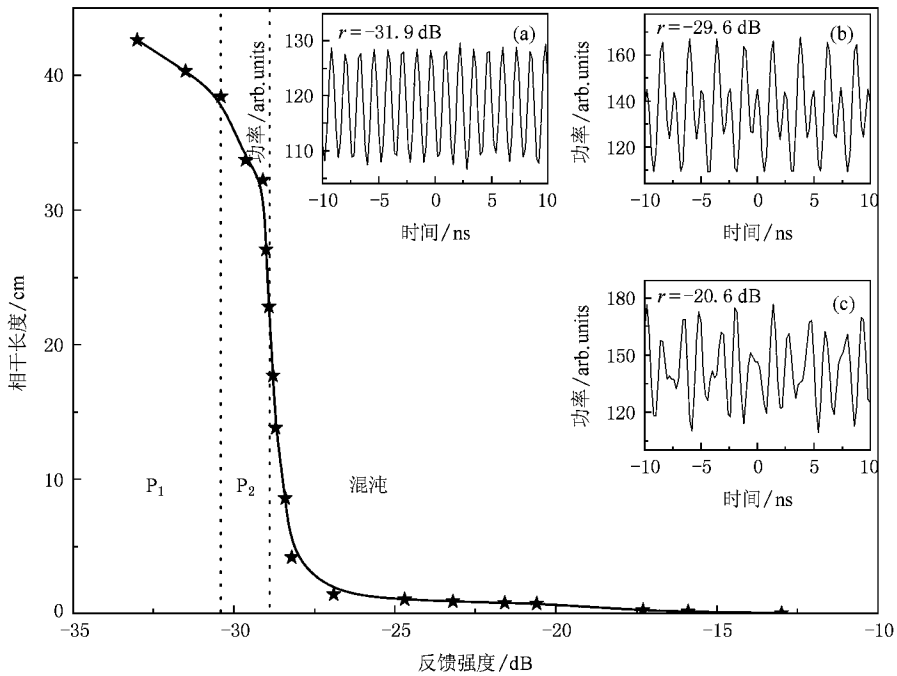


图 3 激光器的输出光在  $P_1$ 、 $P_2$  及混沌 (Chaos) 输出状态下, 相干长度随反馈强度的变化 ( $P_1$ : 单周期振荡;  $P_2$ : 倍周期震荡. 插图分别对应  $P_1$ (a)、 $P_2$ (b) 及混沌 (c) 输出光的时序图)

从图 3 可以看出, 随着反馈强度的增加, 激光器的输出会经历单周期 (a)、倍周期 (b), 然后过渡至混沌状态 (c), 同时光谱迅速展宽且由单模变为多纵模. 在此过程中, 激光器输出光的相干长度也由单周期时的 40 cm 左右下降至混沌状态时的几个厘米. 在不同的区域, 激光器相干长度对反馈强度的敏感性不同, 在单周期、倍周期及稳定的混沌区域, 随反馈强度的增加, 相干长度缓慢下降. 而当激光器的输出由倍周期演化至混沌的过程中, 相干长度迅速从 30 cm 下降至 3 cm 左右, 其变化幅度约为 25 cm/dB.

因此, 在此过程中, 需精密调节反馈光强度来控制相干长度的大小. 当激光器的输出进入稳定混沌区域后, 相干长度随反馈强度的增加缓慢下降. 当反馈强度增至  $-13$  dB 时, 相干长度降至最小值 100  $\mu\text{m}$ . 此后相干长度则随着反馈强度的增加而增加, 同时激光器也由多模变为稳定的单模输出.

我们同时研究了抽运电流对相干长度的影响. 图 4 为反馈强度分别为  $-20.2$  dB,  $-18.6$  dB,  $-16.8$  dB 下, 相干长度随抽运电流的变化. 从图中可以看出, 随着抽运电流的增加, 激光器的相干长度

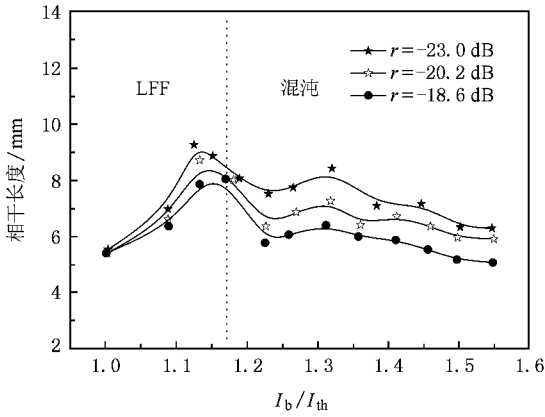


图4 反馈强度分别为 -20.2 dB, -18.6 dB, -16.8 dB 时, 激光器输出光的相干长度  $L$  随  $I_b/I_{th}$  的变化

无明显变化,同时激光器的输出由低频起伏 ( $I_b < 1.17I_{th}$ ) 进入稳定的混沌状态.

为了分析光反馈半导体激光器的低相干性,我们测量了当激光器输出混沌光时所对应的条纹可识别度  $V_{(L)}$  曲线的精细结构图. 调节反馈强度  $r = -13$  dB, 偏置电流  $I_b = 1.52 I_{th}$ , 将迈克尔逊干涉仪参考臂置于 10 cm 处, 移动另一臂, 由(2)式可得图 5 所示的  $V_{(L)}$  曲线. 实线为步径 10  $\mu\text{m}$  下测得的  $V_{(L)}$  曲线的精细结构, 虚线为拟合后  $V_{(L)}$  曲线的包络图. 从精细结构图中可看出  $V_{(L)}$  在迈克尔逊干涉仪两臂长度之差为激光器内腔光学长度(1.02 mm)的整数倍时会出现较大的峰值, 这些峰值是激光器的多模振荡引起的相干性周期性出现的结果. 从图 5 的插图中可看出, 在两臂长差为 50  $\mu\text{m}$  时,  $V_{(L)}$  迅速下降至最大值的 1/e 以下, 且在此后的 1 mm 范围内仍低于最大值的 1/e. 此低相干混沌激光光源在彩虹测量

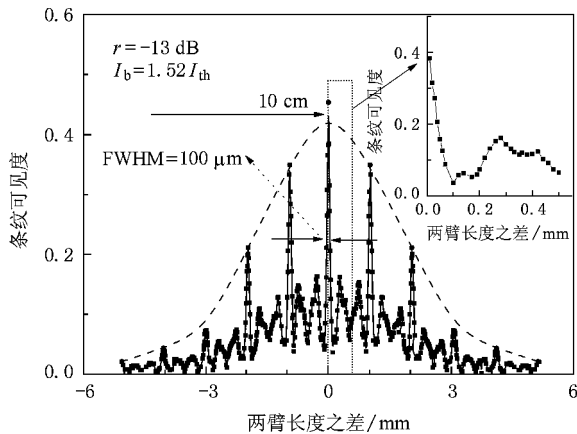


图5 反馈强度为  $r = -13$  dB, 条纹可识别度  $V_{(L)}$  随迈克尔逊干涉仪两臂长差变化曲线的精细结构

技术, 光时域反射仪<sup>[12]</sup>等短距离的光学精密测量中有很大的应用前景.

### 3. 理论分析

本文通过数值模拟, 理论分析了反馈强度及抽运电流对半导体激光器相干长度的影响. 模拟中, 光反馈半导体激光器采用包含反馈项和 Langevin 噪声项的单纵模速率方程<sup>[13]</sup>来描述:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{1}{eV} - \frac{N(t)}{\tau_c} - \alpha(N(t), S(t))S(t) + F_N(t), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} = & \frac{\beta\Gamma N(t)}{\tau_c} + \Gamma\alpha(N(t), S(t))S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} \\ & + 2\frac{\kappa}{\tau_l} \sqrt{S(t)S(t-\tau)} \cos(\theta(t)) + F_S(t), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} = & \frac{1}{2}\alpha\left[\Gamma\alpha(N(t), S(t)) - \frac{1}{\tau_p}\right] \\ & - \frac{\kappa}{\tau_l} \sqrt{\frac{S(t-\tau)}{S(t)}} \sin(\theta(t)) + F_\phi(t), \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\alpha(N(t), S(t)) = \frac{G_N(N(t) - N_0)}{1 + \epsilon S(t)}$ ,  $G_N$  为微分增益,  $N_0$  为透明载流子密度;  $\theta(t) = \frac{2\pi c}{\lambda} \tau + \phi(t) - \phi(t - \tau)$ ;  $F_N(t), F_S(t), F_\phi(t)$  为 Langevin 噪声项;  $\kappa = (1 - R_2) \sqrt{R_e/R_2}$  表示反射光与输出端面处内反射光的电场幅度之比, 用来衡量反射光的强弱, 其中  $R_2$  与  $R_e$  分别表示激光器输出端面强度反射率和外腔镜面强度反射率, 因此反馈强度可用  $r = 10 \log(\kappa^2)$  来表示.  $N$  和  $S$  分别是激光器腔内载流子密度和光子密度;  $e$  为电子电量;  $V$  为有源区体积;  $\tau_c$  为载流子寿命;  $\tau_p$  为光子寿命;  $\Gamma$  为限制因子;  $N_{th}$  为阈值载流子密度;  $\epsilon$  为增益饱和系数;  $\alpha$  为线宽增强因子;  $\beta$  为自发辐射因子;  $\tau_l$  为光在外谐振腔的往返时间.

激光器的参数按照文献[14]的方法提取, 取值如下:

$$V = 1.5 \times 10^{-16} \text{ m}^3, N_0 = 4.1 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}, \alpha = 11, \beta = 10^{-5}, G = 2.2 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}, \tau_c = 2 \times 10^{-9} \text{ s}, \tau_p = 2 \times 10^{-12} \text{ s}, \Gamma = 0.42, R_2 = 0.3, \lambda = 778 \text{ nm}.$$

光反馈半导体激光器的相干长度可表示为:  $L = \lambda^2/\Delta\lambda$ , 其中  $\Delta\lambda$  为激光器光谱的 3 dB 线宽. 抽运电流设为  $1.5I_{th}$ , 反馈腔长为 30 cm. 在电流一定的

情况下,研究反馈强度对激光器相干长度的影响.无反馈时,其光谱线宽约为 20 MHz,对应其相干长度为 15 m.当反馈强度增加至 -44 dB 时,激光器进入周期状态,光谱随之展宽,相干长度也下降至 1 m 左右.当反馈强度增加至 -41 dB 时,激光器进入相干塌陷态,相干长度迅速下降至厘米量级,如图 6 所示.图 6 的插图即为激光器进入相干塌陷态后,相干长度随抽运电流的变化.从图中可以看出,进入相干塌陷态后,激光器的相干长度随反馈强度的增大逐渐降低至毫米量级.模拟结果表明,在抽运电流一定时,通过控制反馈强度的大小,可连续调节激光器的

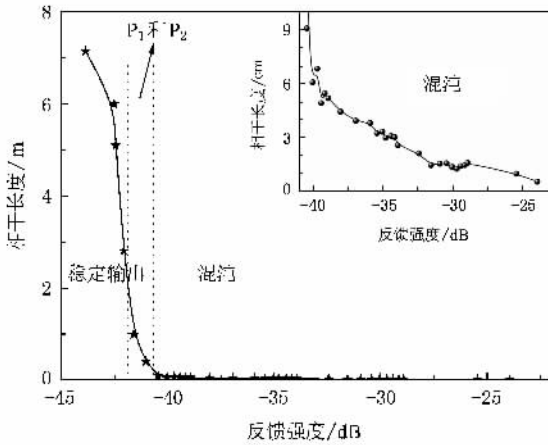


图 6 相干长度随反馈强度的变化(stable: 稳定输出;  $P_1$ : 单周期振荡;  $P_2$ : 倍周期震荡; chaos: 混沌. 插图即为激光器输出为相干塌陷及混沌态时,相干长度随反馈强度的变化.  $I_0 = 1.5 I_m$ )

相干长度,可使其相干长度由无反馈时的 15 m 连续下降至几个毫米,且相干长度随反馈强度的增大而减小.同时我们数值模拟了反馈强度一定时,抽运电流对相干长度的影响.结果表明,抽运电流的变化对激光器的相干长度无明显影响(变化范围约为 1 cm).模拟结果与实验结果符合.

## 4. 结 论

利用光反馈的方法获得了相干长度连续可调的半导体激光光源,通过改变反馈强度使半导体激光器相干长度由无反馈时的几米连续调至 100  $\mu\text{m}$ .实验分析了反馈强度及抽运电流对半导体激光器相干长度的影响.结果表明,光反馈半导体激光器的相干长度决定于反馈强度的大小,随反馈强度的增大而减小.且当激光器由倍周期进入混沌态时,相干长度变化最为明显.在此过程中,需要精密调节反馈强度来控制相干长度的大小.实验对光反馈半导体激光器输出的低相干光(混沌)的可见度精细结构进行了详细分析.同时利用光反馈半导体激光器的速率方程,数值模拟了反馈强度及抽运电流对半导体激光器相干长度的影响.结果表明,相干长度取决于反馈强度的大小,抽运电流对其无明显影响.模拟结果与实验结果符合.

感谢安捷伦科技有限公司为我们提供频谱仪.

[1] Yamamoto Y, Kimura T 1981 *IEEE J. Quantum Electron* **17** 919  
 [2] Afzali R, Rezakhani A T 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 967  
 [3] Huang D, Swanson E A, Lin C P, Schuman J S, Stinson W G, Chang W, Hee M R, Flotte T, Gregory K, Puliafito C A, Fujimoto J G 1991 *Science* **254** 1178  
 [4] Peil M, Fischer I, Elsässer W, Bakic S, Damaschke N, Tropea C, Stry S, Sacher J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 091106  
 [5] Tziraki M, Jones R, French P M W, Melloch M R, Nolte D D 2000 *Appl. Phys. B* **70** 151  
 [6] Agrawal G P 1984 *IEEE J. Quantum Electron* **20** 468  
 [7] Cohen J S, Wittgreffe F, Hoogerland M D, Woerdman J P 1990

*IEEE J. Quantum Electron* **26** 982  
 [8] Hamel W A, van Exter M P, Woerdman J P 1992 *IEEE J. Quantum Electron* **28** 1459  
 [9] Wyatt R 1985 *Electron. Lett.* **21** 658  
 [10] Lenstra D, Verbeek B H, Den Boef A J 1985 *IEEE J. Quantum Electron.* **21** 674  
 [11] Peil M, Fischer I, Elsässer W 2006 *Phys. Rev. A* **73** 023805  
 [12] Wang Y C, Wang B J, Wang A B 2008 *IEEE Photo. Technol. Lett.* **20** 1636  
 [13] Langley L N, Shore K A 1993 *J. Lightwave Technol.* **11** 434  
 [14] Cartledge J C, Srinivasan R C 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 852

# Coherence length tunable semiconductor laser<sup>\*</sup>

Kong Ling-Qin Fan Lin-Lin Wang An-Bang Wang Yun-Cai<sup>†</sup>

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

( Received 14 January 2009 ; revised manuscript received 18 February 2009 )

## Abstract

We report a technique for continuous tuning the coherence length of semiconductor laser. The coherence length of the semiconductor laser is controlled by using optical feedback scheme. The results show that the coherence length of semiconductor laser can be shortened from several meters of the original solitary laser to 100  $\mu\text{m}$  by the implementation of optical feedback. Experimental results indicate that the coherence length of the laser depends strongly on the feedback strength, but is insensitive to the bias current. The results of numerical simulations using rate equation of semiconductor laser are fully consistent with our experimental results.

**Keywords** : semiconductor laser with optical feedback , coherence length , feedback , chaos

**PACC** : 4255 , 4260D , 4262 , 4265T

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60577019 , 60777041 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : wangyc@tyut.edu.cn