

文章编号: 0258-7025(2007)01-0055-06

# 偏振选择互注入半导体激光器的混沌同步

张伟利, 潘 炜, 罗 斌, 李孝峰, 邹喜华, 王梦遥

(西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

**摘要** 研究了偏振选择互注入条件下半导体激光器的同步和混沌滤波效应。将单模互注入速率方程扩展为包含两个偏振态的理论模型, 并选择 X 偏振态作为互注入形式, 不仅为激光器产生混沌和实现同步提供了条件, 还可以完全抑制 Y 偏振光, 实现了纯偏振模式同步。通过频率失调的引入, 保持了激光器主从地位的稳定。研究结果表明, 主从激光器实现了时差等于注入延时的混沌同步, 输出功率表现出高频振荡并伴随有对称性破坏现象。对主激光器进行调制时, 同步系统表现出与单向注入相似的混沌滤波效应; 对从激光器进行调制时, 系统的混沌滤波效应并不明显。

**关键词** 激光技术; 半导体激光器; 混沌滤波; 互注入; 同步

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## Chaos Synchronization in Polarization Selective Mutually Coupled Semiconductor Lasers

ZHANG Wei-li, PAN Wei, LUO Bin, LI Xiao-feng, ZOU Xi-hua, WANG Meng-yao  
(School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract** Systems of mutually coupled semiconductor lasers are widely used in optical chaos communication, spread spectrum communications and high power emissions. The chaos pass filtering effect and synchronization behaviors of mutually coupled semiconductor lasers are studied numerically in this paper. Single-mode rate equations are extended to two polarization modes. By selecting X-polarized mode for mutually coupling, not only chaotic dynamics and synchronization are obtained, but also Y-polarized modes are totally restrained, so pure polarization mode synchronization is realized. A frequency detuning is introduced to keep the first laser as a leader. Simulation results show that outputs of the leader and laggard lasers exhibit high frequency fluctuations in company with symmetry breaking and they are synchronous with a lag equal to the external delay. The system shows similar chaos pass filtering effect to unidirectionally coupled semiconductor lasers when the leader is modulated, while chaos pass filtering is bad when the laggard is modulated.

**Key words** laser technique; semiconductor laser; chaos pass filtering; mutually coupled; synchronization

### 1 引 言

自 Colet 和 Roy<sup>[1]</sup> 提出光混沌同步通信思想以来, 半导体激光器混沌同步因其在保密通信、扩频通信以及脉冲整形等领域具有广泛的应用前景, 受到众多研究者的关注<sup>[1~4]</sup>。通常使激光器产生混沌的方法有光反馈、光注入和光电反馈等<sup>[5~7]</sup>。同步系统的构建方式可分为互注入和单向注入两种。互注

入系统是非线性振荡器的一个典型实例, 它性能优良, 实验可行性强, 在降低系统噪声、高功率输出和光混沌通信等应用中发挥着重要作用<sup>[8, 9]</sup>。因此, 半导体互注入系统是当前的研究热点之一。Hohl 等最早对弱耦合互注入半导体激光器系统中周期振荡信号的局部同步进行了研究<sup>[10]</sup>。Rogister 和 Heil 等对互注入条件下全同激光器输出波形的对

收稿日期: 2006-05-24; 收到修改稿日期: 2006-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(10174057, 90201011)和国家教育部科学技术研究重点项目(105148)资助课题。

作者简介: 张伟利(1980—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事半导体激光器和光通信研究。E-mail: daduocer@126.com

导师简介: 潘 炜(1959—), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 目前主要从事半导体微腔激光器和非线性系统理论、量子通信方面的研究。E-mail: weipan80@sohu.com

称性破坏现象进行了讨论,讨论范围包括低频振荡和低频振荡两种机制<sup>[8, 11]</sup>。通过扩展理论模型,学者们对互注入系统的非线性行为和频谱特性等进行了深入研究<sup>[12, 13]</sup>。文献[14~16]对耦合系统同步方程推导及其在保密通信中的应用等也做了不少有益工作。与此同时,具有偏振输出的垂直腔半导体激光器的互注入同步以及利用互注入两段式半导体激光器系统实现逻辑运算等研究也逐渐兴起<sup>[17, 18]</sup>。

混沌同步通信的质量,不仅由系统的同步品质决定,还受系统的混沌滤波效应影响。对于单向注入同步系统的混沌滤波效应已有广泛的理论和实验研究<sup>[19, 20]</sup>;而关于互注入系统,尤其是考虑了偏振态输出的半导体激光器互注入系统的混沌滤波效应的研究还不多见。本文在作者前期工作的基础上<sup>[21~23]</sup>,对偏振选择互注入半导体激光器同步的理论模型和混沌滤波效应进行了研究。首先将单模互耦合速率方程扩展为包含两个偏振态的理论模型;然后选择 X 偏振光进行互注入,作为产生混沌和实现同步的条件;同时,在速率方程中引入了频率失调,来确保两激光器具有稳定的主从关系。最后,以调制频率为参考变量,对系统的混沌滤波效应进行了分析。

## 2 理论模型

建立的系统模型简图如图 1 所示。选择两个共同的垂直腔面发射激光器,使用合适的偏置电流使得孤立条件下激光器输出为两个功率相等的正交线性偏振光:X 偏振(XP)和 Y 偏振(YP)。两个半导体激光器(SL1 和 SL2)之间放置一 X 模式偏振片(XMP),因此只有 XP 模式被选择并相互注入到两激光器中,图中 BS 为分光器。

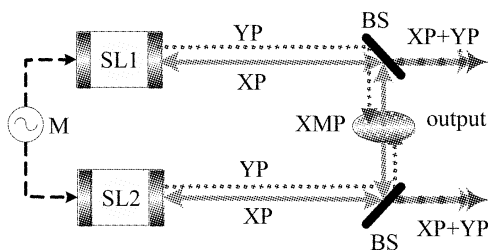


图 1 偏振选择互注入半导体激光器系统示意图

Fig. 1 Schematic of polarization-preserved mutually coupled semiconductor lasers

XMP; X-mode polarizer; BS; beam splitter; SL1; semiconductor laser 1; SL2; semiconductor laser 2; M; modulator

文献[24]通过直接扩展经典 Long-Kobayashi 方程<sup>[25]</sup>,成功模拟了外光反馈下激光器的偏振特性,该思想同样可以用于包含两个偏振模式的互注入系统的推导。同时,为了分别讨论功率和相位的作用,将复数光场  $E_X$  和  $E_Y$  分解为振幅和相位两项,令  $E_{X,Y} = A_{X,Y} \exp(i\phi_{X,Y})$  及功率  $P_{X,Y} = |E_{X,Y}|^2$ <sup>[14, 15]</sup>,则  $P_{X,Y}$  和  $\phi_{X,Y}$  的速率方程可表示为<sup>[24, 25]</sup>

$$\frac{dP_{X1,X2}}{dt} = (G_{X1,X2} - \gamma)P_{X1,X2} + k \sqrt{P_{X2,X1}(t-\tau)P_{X1,X2}} \cos\theta_{X1,X2} + F_{PX}, \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_{X1,X2}}{dt} = \frac{\alpha}{2}(G_{X1,X2} - \gamma) + k \sqrt{\frac{P_{X2,X1}(t-\tau)}{P_{X1,X2}}} \sin\theta_{X1,X2} + F_{\phi X}, \quad (2)$$

$$\frac{dP_{Y1,Y2}}{dt} = (G_{Y1,Y2} - \gamma)P_{Y1,Y2} + F_{PY}, \quad (3)$$

$$\frac{d\phi_{Y1,Y2}}{dt} = \frac{\alpha}{2}(G_{Y1,Y2} - \gamma) + F_{\phi Y}, \quad (4)$$

下标“1”和“2”分别表示 SL1 和 SL2;“X”和“Y”分别表示 XP 和 YP 模式。 $\alpha$  为线宽增长因子, $\gamma$  为腔内损耗, $F_P$  和  $F_\phi$  分别为光子和相位的自发辐射噪声项。式(1)和(2)中等式右边第二项代表互注入的贡献,通过微扰理论引入<sup>[25]</sup>;其中, $k$  为耦合速率, $\tau$  为注入延时;若  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$  定义为频率失调,则相位  $\theta$  可表示为

$$\theta_{X1,X2} = \phi_{X1,X2} - \phi_{X2,X1}(t-\tau) + \omega_{1,2}\tau \pm \Delta\omega t, \quad (5)$$

同样载流子数  $N$  的速率方程可表示为

$$\frac{dN_{1,2}}{dt} = \frac{J_{1,2}}{q} - \gamma_e N_{1,2} - G_{X1,X2} P_{X1,X2} - G_{Y1,Y2} P_{Y1,Y2}, \quad (6)$$

$J$  为偏置电流, $\gamma_e$  为载流子衰减速率,光增益  $G$  的形式为

$$G_{X,Y} = \frac{g_{X,Y}(N - N_t)}{1 + \epsilon_{X,Y}^S |E_{X,Y}|^2 + \epsilon_{Y,X}^C |E_{Y,X}|^2}, \quad (7)$$

其中  $g_X = g_Y = g$  为增益系数, $N_t$  为透明载流子数, $\epsilon^S$  ( $\epsilon^C$ ) 为自(交叉)增益饱和系数。

事实上,以上分析还可以基于 SFM 模型 (spin-flip model)<sup>[26]</sup> 来推导。根据文献[27]提供的方法,将 SFM 模型中的右(左)旋圆偏振振幅  $E_+$  ( $E_-$ ) 分别替换为  $E_+ = \frac{E_X + iE_Y}{\sqrt{2}}$  和  $E_- = \frac{E_X - iE_Y}{\sqrt{2}}$  即可。

另外,Heil 等曾通过引入自发辐射噪声成功模拟了输出混沌波形的对称性破坏等实验现象<sup>[11]</sup>。但是

噪声具有随机性, SL1 和 SL2 的主从角色可能互换, 这将增加研究复杂性。因此, 本文通过在式(5)中引入频率失调, 来确保 SL1 始终为主激光器。

为了明确偏振选择注入条件下激光器两偏振模式输出功率的关系, 对上述方程的时域平均解问题进行了讨论。讨论中用到两个近似: 1) 两个激光器的平均功率和平均载流子数相等; 2) 忽略增益压缩和噪声影响。式(1), (3)和(5)的平均解可表示为

$$[g(\bar{N} - N_t) - \gamma]\bar{P}_X + k\bar{P}_X = 0, \quad (8)$$

$$[g(\bar{N} - N_t) - \gamma]\bar{P}_Y = 0, \quad (9)$$

$$\frac{J}{q} - \gamma_e \bar{N} - g(\bar{N} - N_t)(\bar{P}_X + \bar{P}_Y) = 0, \quad (10)$$

由于  $k > 0$ , 若  $\bar{P}_X$  和  $\bar{P}_Y$  都不为 0, 则式(8)和(9)分别可得:  $g(\bar{N} - N_t) - \gamma + k = 0$ ,  $g(\bar{N} - N_t) - \gamma = 0$ , 这是相互矛盾的。因此, 式(8)~(10)的解只可能有两种情况

$$\bar{P}_X = 0, \quad \bar{N} = \frac{\gamma}{g} + N_t, \quad \bar{P}_Y = \frac{J/q - \gamma_e \bar{N}}{g(\bar{N} - N_t)}, \quad (11)$$

或者

$$\bar{P}_Y = 0, \quad \bar{N} = \frac{\gamma - k}{g} + N_t, \quad \bar{P}_X = \frac{J/q - \gamma_e \bar{N}}{g(\bar{N} - N_t)}. \quad (12)$$

显然, 式(11)给出的解与耦合系数无关, 即互耦合不会影响激光器的输出功率。这与实际情况不符, 故只有式(12)给出的解是合理的。图 2 对比了理论分析和数值分析两种情况下, 激光器输出平均功率随耦合系数的变化关系。可以看出, 随着  $k$  值的增大两曲线拟合得越来越好。  $k > 0$  时, 激光器实现了纯 XP 模式输出。

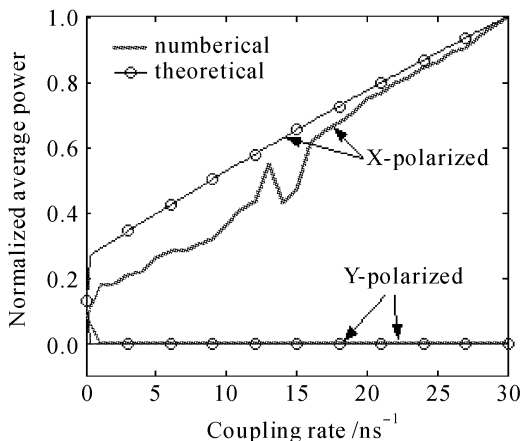


图 2 X 偏振和 Y 偏振模式的平均功率随耦合速率的变化关系

Fig. 2 Average power of X-polarized and Y-polarized modes versus coupling rate

### 3 仿真与分析

本节首先演示系统的同步和对称性破坏等文献实验结果。然后, 针对 SL1 调制和 SL2 调制两种情况, 对互注入系统混沌滤波效应进行重点讨论。数值分析方法采用变步长四阶龙格-库塔法, 并选用垂直腔面发射半导体激光器的典型参数, 见表 1<sup>[11, 24, 28]</sup>。

表 1 仿真中用到的典型参数

Table 1 Typical values of parameters in the simulation

Parameter	Symbol	Value
Linewidth enhancement factor	$\alpha$	3.5
Injection current /mA	$J$	64
Cavity losses /ns <sup>-1</sup>	$\gamma$	282
Differential gain /ns <sup>-1</sup>	$g$	$3.2 \times 10^{-6}$
Coupling rate /ns <sup>-1</sup>	$k$	23
Time delay /ns	$\tau$	4.75
Carrier decay rate /ns <sup>-1</sup>	$\gamma_e$	1.66
Transparency carrier concentration	$N_t$	$1.5 \times 10^8$
Frequency detuning /GHz	$\Delta\omega$	2.5
Self gain saturation parameter	$\epsilon_{X,Y}^S$	$5 \times 10^{-7}$
Cross gain saturation parameter	$\epsilon_{X,Y}^C$	$5 \times 10^{-7}$
Spontaneous emission rate /ns <sup>-1</sup>	$\beta$	$10^{-6}$
Frequency detuning /GHz	$\Delta f$	2.5
Leader lasing frequency /GHz	$f_1$	$3.06 \times 10^5$

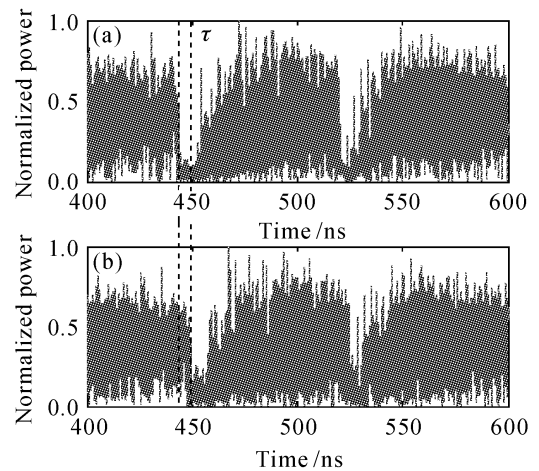


图 3 SL1(a)和 SL2(b)输出归一化功率时域图  
Fig. 3 Waveforms of normalized power in the time domain

图 3 为 SL1 和 SL2 归一化输出功率的时域波形, (a)对应 SL1 输出, (b)对应 SL2 输出。两激光器的输出具有与注入时延对应的高频振荡。同时, 每隔一段较长时间, 输出功率还会出现显著的下陷, 说明此时系统的对称性被破坏。SL1 和 SL2 输出波形只是在对称破坏点不同, 并且前者波形要提前

时间  $\tau$ , 这与单向注入的主从同步结构相似。以上结论很好地吻合了文献[11]的实验结果。

为了研究混沌滤波效应, 对偏置电流增加了小信号调制, 调制信号为  $0.01 \times \sin(2\pi ft)J$ ,  $f$  为调制频率, 该小信号调制不会改变激光器的偏振状态。对 SL1 和 SL2 的调制都做了讨论。

图 4 对比了不同调制频率下两激光器的输出频谱, (a) 和 (b) 中  $f = 0.5 \text{ GHz}$ ; (c) 和 (d) 中  $f = 2.1 \text{ GHz}$ 。(a) 和 (c) 对应 SL1 被调制, 在图 4(a) 中, SL1 的频谱在调制频率处出现一个明显的峰值, SL2 的峰值并不明显。可见, SL2 只对 SL1 输出的混沌载波产生了同步而抑制了载波中的调制信号, 这就是混沌滤波效应。与图 4(a) 相比, 图 4(c) 中两个峰值都比较明显, 这是因为此时的调制频率接近弛豫振荡频率, 混沌滤波作用变弱。文献[19]通过对单向注入半导体激光器系统的实验研究也得到了该结论, 本文与之一致。图 4(b) 和 (d) 给出了 SL2 被调制的情况, 可以看出, 对从激光器进行调制时互注入系统不会表现出明显的混沌滤波效应。

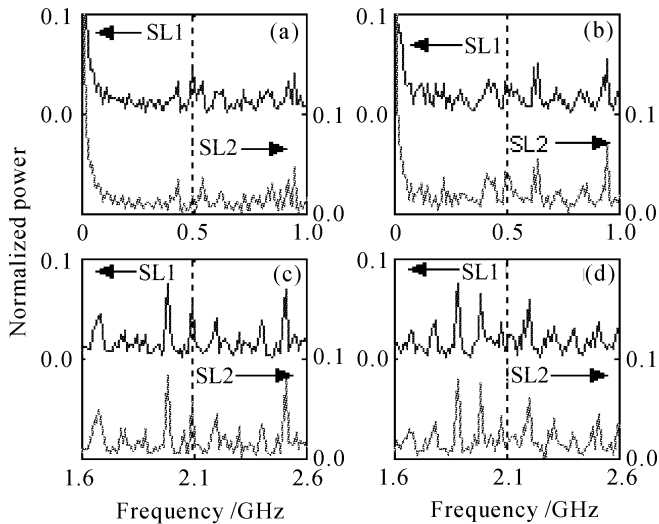


图 4 两激光器的输出频谱

Fig. 4 Spectra of SL1 and SL2

图 5 描述了系统的同步相关性(绘制相关图时对 SL1 输出波形延迟了时间  $\tau$ ), 图 5(a)~(d) 的参数取值与图 4 完全对应, 相关图越接近直线表明系统同步效果越好。因为引入了频率失调和进行了小信号调制, 四幅图都不是理想的直线。图 5(d) 的同步效果最好, 因为此情况下(对 SL2 进行调制,  $f = 2.1 \text{ GHz}$ )调制信号对两激光器的频谱影响最小, 见图 4(d)。图 5(a), (b) 和 (c) 的同步相关性差别不明显, 但都不如图 5(d) 相关性好。

图 6 给出了调制信号在两激光器输出频谱中对

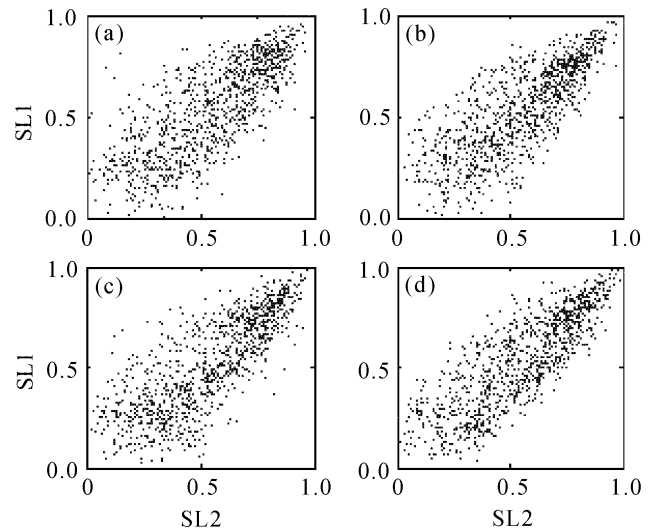


图 5 系统同步相关图

Fig. 5 Correlation plots of the leader and laggard

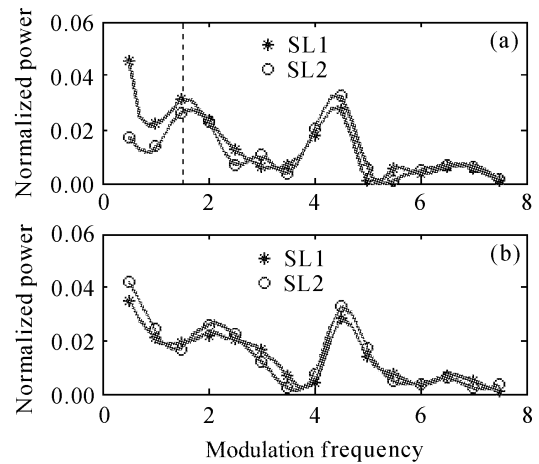


图 6 两激光器频谱中调制信号对应功率随调制频率的变化曲线

Fig. 6 Amplitude of the message in the power spectra of SL1 and SL2 versus modulation frequency

应功率随调制频率的变化曲线。图 6(a) 是对 SL1 调制, 图 6(b) 是对 SL2 调制。图 6(a) 中, 当  $f < 1.5 \text{ GHz}$  时两曲线差别明显, 即系统表现出较好的混沌滤波效应。增大调制频率后两曲线几乎重合, 因为当调制频率与弛豫振荡频率接近时系统的混沌滤波效应会变差, 这与文献[4]的小信号分析结果得到的频率响应特性是一致的。图 6(b) 中, 两曲线几乎全部重合。可见, 对 SL1 调制(图 6(a))和对 SL2 进行调制(图 6(b))时系统表现出了不对称的混沌滤波特性。由于互注入系统 SL1 和 SL2 的主从地位会随频率失调或初始条件的改变而交换, 主从激光器混沌滤波不对称的这一特点还可以应用到光逻辑运算或光控制等领域。

## 4 结 论

针对输出同时存在两个偏振模式的两全同半导体激光器, 本文构建了它们的互注入同步模型, 并对经典的理论模型进行了扩展。通过选择 X 偏振光进行互注入, Y 偏振光被完全抑制, 系统实现了偏振选择混沌同步。引入频率失调可使两激光器的主从地位保持稳定, 降低系统分析的复杂性。同步时, 两激光器输出高频振荡波形的同时还伴随有对称破坏(功率下降)现象。对主激光器进行调制时, 从激光器对频率较低的调制信号有明显抑制; 调制频率接近弛豫振荡频率时, 混沌滤波效应变弱, 这与单向注入同步系统的情况相似。对从激光器进行调制时, 主激光器并不能表现出很好的混沌滤波效应。本文在模型建立和参数选择上都是基于垂直腔面发射半导体激光器, 但如果令某一偏振模式的增益为零, 并选择合适的参数, 以上讨论也可用于边发射器件。

## 参 考 文 献

- 1 P. Colet, R. Roy. Digital communication with synchronized chaotic lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24):2056~2058
- 2 J. M. Liu, H. F. Chen, S. Tang. Synchronized chaotic optical communications at high bit rates [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9):1184~1196
- 3 J. Ohtsubo. Chaos synchronization and chaotic signal masking in semiconductor lasers with optical feedback [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9):1141~1154
- 4 Yan Senlin. Small-signal analysis of performance characterization of chaotic masking decoding in injected semiconductor lasers [J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, **22**(10):2504~2507
- 5 Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin *et al.*. Study of parameter for higher order bifurcation and chaos behavior of VCSELs control [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(11):1789~1792  
潘 炜, 张晓霞, 罗 斌 等. VCSELs 高阶分岔及混沌行为的参数控制 [J]. *电子学报*, 2004, **25**(9):1789~1792
- 6 W. L. Zhang, W. Pan, B. Luo *et al.*. Synchronization performance comparison of vertical-cavity surface-emitting lasers with two different feedback chaos schemes [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, **20**(8):979~984
- 7 A. Murakami. Phase locking and chaos synchronization in injection-locked semiconductor laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(3):438~447
- 8 F. Rogister, J. García-Ojalvo. Symmetry breaking and high-frequency periodic oscillations in mutually coupled laser diodes [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14):1176~1178
- 9 C. R. Mirasso, M. Kolesik, M. Matus *et al.*. Synchronization and multimode dynamics of mutually coupled semiconductor lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **65**(1):013805-1~013805-4
- 10 A. Hohl, A. Gavrielides, T. Erneux *et al.*. Localized synchronization in two coupled nonidentical semiconductor lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(25):4745~4748
- 11 T. Heil, I. Fischer, W. Elsässer *et al.*. Chaos synchronization and spontaneous symmetry-breaking in symmetrically delay-coupled semiconductor lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(5):795~798
- 12 J. Javaloyes, P. Mandel, D. Pieroux. Dynamical properties of lasers coupled face to face [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(3):036201-1~036201-11
- 13 H. Erzgräber, D. Lenstra, B. Krauskopf *et al.*. Mutually delay-coupled semiconductor lasers: mode bifurcation scenarios [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **255**(4-6):286~296
- 14 Yan Senlin, Chi Zeying, Chen Wenjian *et al.*. Synchronization of lasers coupling system and its application in optical fiber chaotic secure communication [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(11):1663~1667  
颜森林, 迟泽英, 陈文建 等. 激光耦合同步及其在光纤混沌保密通信中的应用 [J]. *电子学报*, 2002, **30**(11):1663~1667
- 15 Yan Senlin, Chi Zeying, Chen Wenjian *et al.*. Chaotic synchronization with coupling lasers and its application for secure communications [J]. *J. China Institute of Communications*, 2004, **25**(1):78~86  
颜森林, 迟泽英, 陈文建 等. 激光混沌耦合同步及其在保密通信中的应用 [J]. *通信学报*, 2004, **25**(1):78~86
- 16 Zhu Shiqun, Lü Xiang, Zhou Jianlan. Chaotic synchronization in two non-identical lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):343~346  
朱士群, 吕 翔, 周建兰. 两台非全同激光器的混沌同步 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):343~346
- 17 N. Fujiwara, Y. Takiguchi, J. Ohtsubo. Observation of the synchronization of chaos in mutually injected vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(18):1677~1679
- 18 K. E. Chlouverakis, M. J. Adams. Optoelectronic realization of NOR logic gate using chaotic two-section lasers [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(6):359~360
- 19 J. Paul, M. W. Lee, K. A. Shore. Effect of chaos pass filtering on message decoding quality using chaotic external-cavity laser diodes [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(21):2497~2499
- 20 A. Uchida, Y. Liu, P. Davis. Characteristics of chaotic masking in synchronized semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(8):963~970
- 21 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. The influence of non-instantaneous phase conjugate optical feedback on the dynamics of semiconductor laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1219~1224  
张伟利, 潘 炜, 罗 斌 等. 非即变相位共轭反馈对半导体激光器动态特性的影响 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1219~1224
- 22 Xiaofeng Li, Wei Pan, Bin Luo *et al.*. Theoretical study on controlling nonlinear behaviors of a coupled-cavity VCSEL by external optical injection [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(5):278~281
- 23 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical analysis of odd and even phase conjugate cavity vertical-cavity surface emitting laser nonlinear system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):179~184  
张伟利, 潘 炜, 罗 斌 等. 奇偶反馈相位共轭腔垂直腔面发射激光器非线性系统的理论研究 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):179~184
- 24 M. Sciamanna, K. Panajotov, H. Thienpont *et al.*. Optical feedback induces polarization mode hopping in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17):1543~1545
- 25 R. Lang, K. Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(3):347~355
- 26 J. Martin-Regalado, F. Prati, M. S. Miguel *et al.*. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(5):765~783
- 27 Zhu Shiqun, Lü Xiang, Zhou Jianlan. Coupling and chaotic synchronization in two single mode lasers [J]. *J. Suzhou University (Natural Science)*, 2000, **16**(1):51~58

朱士群,吕翔,周建兰. 两台单模激光的耦合和混沌同步[J]. 苏州大学学报, 2000, 16(1):51~58

28 Y. Hong, R. Ju, P. S. Spencer et al.. Investigation of

polarization bistability in vertical-cavity surface-emitting lasers subjected to optical feedback [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2005, 41(5):619~624

### 国产 Yb:YAG 透明陶瓷实现激光输出

YAG 单晶是高功率激光的重要材料,近年来高透明度多晶陶瓷作为激光介质引起人们广泛的注意。YAG 陶瓷相对单晶具有易制造大尺寸、掺杂浓度高、易批量生产等优点。在 Nd:YAG 陶瓷获得长足发展的同时,Yb 掺杂的陶瓷也得到了越来越多的关注。Yb:YAG 陶瓷与 Nd:YAG 陶瓷相比具有许多优点:Yb 掺杂的激光介质无交叉弛豫振荡和激发态吸收,有较宽的吸收带,较长的荧光寿命及较高的量子效率等。因此,高质量的 Yb:YAG 陶瓷将是非常理想的高功率激光材料。

最近,中国科学院上海硅酸盐研究所制备了 Yb:YAG 多晶透明陶瓷并经中国科学院上海光学精密机械研究所加工、测试,实现了280 mW的连续激光输出。

陶瓷材料的制备是一个非常重要的过程。实验中采用高纯商业 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 超微粉作为原料,利用溶胶-凝胶/燃烧合成法技术制备粉体,再通过球磨混合、煅烧干燥,在 1650~1780 °C 真空条件下保温10 h以上,烧结成致密的 Yb:YAG 透明陶瓷。图 1 为 Yb:YAG 多晶陶瓷样品示意图。图 2 为

室温下 Yb:YAG 多晶陶瓷的透射光谱,透射光谱基底基本保持水平,基底透射率大于 80%,没有出现明显的瑞利散射和米氏散射。

实验采用端面抽运,激光器结构如图 3 所示。Yb:YAG 多晶陶瓷块的尺寸为 4 mm × 4 mm × 3 mm, Yb 离子的掺杂原子百分比浓度为 1%,陶瓷块通过铝箔包裹后固定在铜质的水冷热沉上,冷却水温控制在 15 °C,抽运源采用光纤耦合输出的半导体激光器,光纤芯径为 200 μm,输出中心波长在 937 nm,最大输出功率 25 W,采用 1:1 透镜组聚焦在 Yb:YAG 多晶陶瓷表面。谐振腔为平凹腔,其中 M<sub>1</sub> 为平面镜,镀 940 nm 增透和 1045 nm 高反双色膜, M<sub>2</sub> 为曲率半径 R = 200 mm 的球面镜。在实验中测试了当输出透射率 T = 4% 时的激光输出功率,获得最大输出功率为 280 mW,波长为 1031 nm 的激光输出,斜效率约为 7%,如图 4 所示。

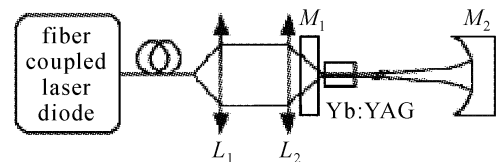


图 3 激光器结构示意图

Fig. 3 Configuration of laser system

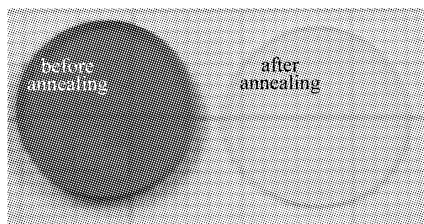


图 1 Yb:YAG 多晶陶瓷样品

Fig. 1 Sample of Yb:YAG ceramic

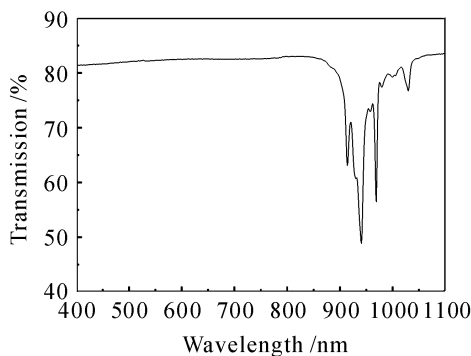


图 2 室温下 Yb:YAG 多晶陶瓷的透射光谱

Fig. 2 Transition spectrum of Yb:YAG ceramic

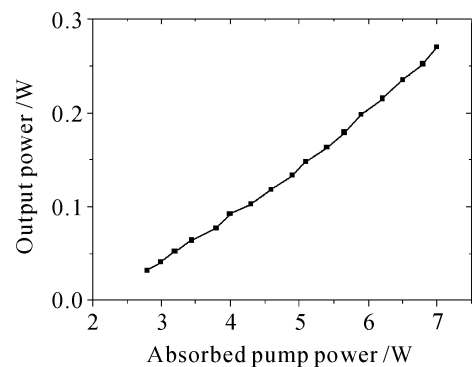


图 4 激光输入、输出关系曲线

Fig. 4 Curve of laser input and output power

中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800  
中国科学院上海硅酸盐研究所,上海 200050  
许毅<sup>1</sup>, 吴玉松<sup>2</sup>, 姜本学<sup>1</sup>, 李江<sup>2</sup>,  
潘裕柏<sup>2</sup>, 梁晓燕<sup>1</sup>, 郭景坤<sup>2</sup>, 徐军<sup>1</sup>  
收稿日期:2006-12-20