

文章编号: 0253-2239(2005)01-67-5

互注入锁定产生双波长可调谐光脉冲的实验研究*

方晓惠¹ 王东宁² 陈吉武³ 张 敏² 李世忱¹ 靳 伟²

1 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072
2 香港理工大学电机工程系, 香港
3 浙江大学信电系, 杭州 310027

摘要: 报道了两个增益开关调制的法布里-珀罗半导体激光器互注入锁定实验方案,可产生双波长可调谐光脉冲。该装置对两个结构基本相同的法布里-珀罗半导体激光器做增益开关调制,产生多模光脉冲输出;然后利用两个光纤光栅作为滤波元件,通过调节可调谐光延迟线(VODL2),可使得双波长光脉冲在两个法布里-珀罗激光器之间相互注入锁定,从而在输出端得到高边模抑制比的双波长光脉冲输出。然后再通过应力作用在两个光纤光栅上以改变它们的反射波长和适当调整另一个可调谐光延迟线(VODL1)长度,可得到不同的双波长的光脉冲输出,而重复频率保持 524.6 MHz 不变。在 13.2 nm 调谐范围内边模抑制比高于 25 dB,系统稳定且波长调节方便。

关键词: 激光技术; 半导体激光器; 双波长可调谐光脉冲; 互注入锁定

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Tunable Dual-Wavelength Optical Short Pulse Generation in a Mutual Pulse Injection-SEEDING Scheme

Fang Xiaohui¹ Wang Dongning² Chen Jiwu³ Zhang Min² Li Shichen¹ Jin Wei²

1 College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072
2 Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong
3 Department of Information and Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Abstract: A mutual pulse injection-seeding scheme is developed to generate tunable dual-wavelength optical short pulses by the use of two gain-switched Fabry-Pérot (F-P) semiconductor lasers. Multimode optical short output pulse is first generated by gain switching two F-P lasers with the approximate setup; Then by using two fiber Bragg gratings (FBGs) as filters, mutual injection locking of two wavelength optical pulses between two F-P lasers is realized by tuning optical delay line (VODL2), and dual-wavelength optical short pulse with high side mode suppression ratio is obtained at the output end. Wavelength selection and tuning are achieved by adjusting two FBGs and another optical delay line (VODL1), while a constant repetition frequency of 524.6 MHz is maintained. The side mode suppression ratio of the output pulses is better than 25 dB at a wavelength-tuning range of 13.2 nm. The system is stable and convenient for wavelength tuning.

Key words: laser techniques; semiconductor laser; tunable dual-wavelength optical short pulse; mutual pulse injection-locking

1 引 言

多波长窄光脉冲对波分复用(WDM)、时分复用和光纤传感的研究和发展有着非常重要的意义。

光脉冲的产生有几种方法,如激光器阵列主动锁模技术^[1],对超连续光谱滤波^[2],利用多信道光栅激光器^[3]以及对法布里-珀罗半导体激光器进行注入锁定技术。

* 香港理工大学基金(G-YC89)资助课题。

作者简介: 方晓惠(1970~),女,江西人,天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生。主要从事超短脉冲方面的研究工作。E-mail: xhfang402@hotmail.com。

收稿日期:2004-03-31; 收到修改稿日期:2004-07-07

注入锁定技术是获得可调谐多波长窄光脉冲的一种简便的技术,有两种注入锁定的方案:自激注入锁定方案和腔外注入锁定方案^[4~16]。在自激注入锁定方案中,通过滤波元件选出法布里-珀罗激光器的几个纵模并反馈回激光器中,这几个纵模的光脉冲通常经历的光路不同,但同时或相差整数倍周期到达法布里-珀罗半导体激光器中,当几个纵模的光脉冲在半导体激光器的激光介质具有增益期间到达,将注入锁定激光器的对应纵模,输出对应纵模成份的光脉冲,其它模式则被抑制掉了。在自激注入锁定方案中,必须仔细调节增益开关调制激光器的重复频率和外腔长度,以使反馈光脉冲在法布里-珀罗激光器的激光介质具有增益期间到达,从而获得注入锁定光脉冲输出。相比之下,在腔外注入锁定方案可以操作在任意重复频率,仅仅通过调节滤波元件就能得到不同波长成份的光脉冲输出。腔外注入锁定方案中,可采用法布里-珀罗半导体激光器联合一个滤波元件如光纤光栅(FBG)或法布里-珀罗滤波器做外注入光源,这种方法简单且成本低,然而输出光脉冲的边模抑制比相对较低(<20 dB),而且波长调节范围有限(约 10 nm)。另一种用于腔外注入锁定的光源是连续波可调谐激光器,这种外注入光源调谐范围大且边模抑制比也好,但是光源本身价格昂贵。

本文报道了一种互注入锁定生成双波长光脉冲的实验方案。在实验中对两个法布里-珀罗半导体激光器都做增益开关调制,从一个增益开关调制的法布里-珀罗半导体激光器输出的多纵模光脉冲经过两个串连的具有不同布拉格反射波长的光纤光栅反射滤波,得到对应纵模的光脉冲,这个光脉冲经掺铒光纤放大器放大后注入第二个增益开关调制的法布里-珀罗半导体激光器中,受激产生的光脉冲再反过来注入第一个法布里-珀罗半导体激光器中,实现两个增益开关调制法布里-珀罗半导体激光器之间的光脉冲互注入锁定。该实验在 13.2 nm 波长调节范围内输出双波长光脉冲的边模抑制比均高于 25 dB。

2 实验描述

双波长互注入锁定实验装置如图 1 所示。从射频信号发生器(HP E4422B)发出的强度为 -19.5 dBm 的正弦电信号先经过一个 28 dBm 电功率放大器(ZHL-42W)放大,然后经一个 10:90 的功率分配器分配,10% 的电信号功率用于 20 GHz 光示波器

(Trektronics CAS 8003)的电触发;剩下的约 90% 信号功率再经过另一个 1:1 分配器分成两束,分别经过一个 T 型头耦合器与各自激光器的直流偏置电流耦合,驱动法布里-珀罗半导体激光器产生增益开关,得到多纵模光脉冲输出。两个法布里-珀罗半导体激光器的直流驱动电流分别为 7 mA 和 6 mA,略低于激光器的阈值电流(10 mA)。两个增益开关调制的法布里-珀罗半导体激光器(FP1,FP2)输出光脉冲的光谱峰值波长为 $1.55 \mu\text{m}$,模式间隔 1.1 nm。输出光脉冲的重复频率为 524.6 MHz,在系统操作过程中维持不变。

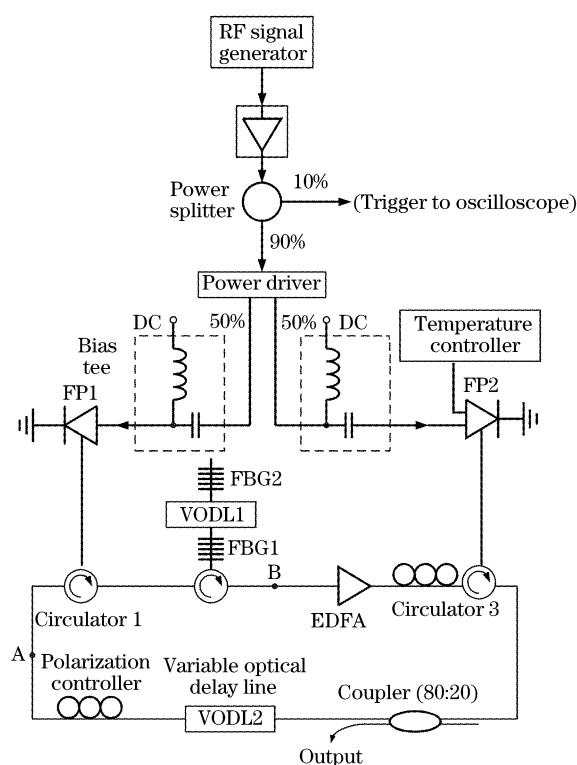


图 1 双波长互注入锁定实验装置

Fig. 1 Experimental arrangement for dual-wavelength mutual pulse injection-locking scheme

FP2 带有温控(HTC5000)装置。调节温控,可以整体红移或兰移 FP2 输出光谱,使得 FP2 输出光脉冲的光谱的各纵模与 FP1 输出光脉冲的光谱的各纵模对应重叠,这样当系统调节好后,仅需改变两个光纤光栅的反射波长,就可方便地得到不同的双波长光脉冲输出。

两个增益开关调制的法布里-珀罗半导体激光器互注入锁定产生双波长可调谐窄光脉冲过程如下:从增益开关调制的法布里-珀罗半导体激光器 FP1 输出的多纵模光脉冲先送入波长选择元件——两个经可变光延迟线(VODL1)串连在一起的光纤

光栅,其布拉格波长分别为 1555 nm 和 1544 nm。两个光纤光栅反射谱线宽都约为 0.2 nm,FBG1 反射率约 80%,由于经过光延迟线 VODL1 后有约 1 dB 的光延迟线自身的损耗及接入损耗,为了尽量使两个单模反射谱强度接近,FBG2 反射率须选得更高,约 90%。FBG2 一端与光延迟线相连,另一端用手折断,产生一个粗糙不平的端面,以去除 4% 的端面反射。被滤波后的光脉冲具有两个波长成份,通过调节 VODL1 的长度,可使从两个光纤光栅中输出的这两个波长成份的光脉冲之间的延时间隔为输出脉冲周期的整数倍,这样可使经第二个光纤光栅 FBG2 反射的第 N 个单模光脉冲与第一个光纤光栅 FBG1 反射的第 $N+n$ 个单模光脉冲重叠,这两个重叠的单模光脉冲通过掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后经一个光环行器注入到法布里-珀罗半导体激光器 FP2 中。FP2 中受激的双波长光脉冲再经一个 VODL2 反向注入 FP1 中。通过调节 VODL2,可使受激的双波长光脉冲在 FP1 的某个光脉冲建立的时间窗口到达。结果,从 FP1 输出的也是双波长光脉冲。这样,双波长互注入锁定实验方案就被建立起来。光纤环路中的两个偏振控制器

用来分别调节注入光的偏振态以优化输出光脉冲的边模抑制比。实验中采用一个 80:20 的光耦合器分出 20% 的输出光用于光示波器和光谱仪 (HP70952B) 分别观察输出双波长光脉冲列以及相应的光谱。

3 实验结果及讨论

为了研究光脉冲互注入锁定过程,首先在图 1 的 A 点位置断开。从 FP1 输出的多纵模光脉冲光谱图示于图 2(a),当从 FP1 输出的多纵模光脉冲经两个光纤光栅分别反射后,在 B 点获得双波长光脉冲光谱[图 2(b)],从光谱图中可看到,通过光纤光栅滤波得到两个光强相对较大的纵模。由于采用的光栅反射谱线宽较大,约 0.2 nm,且底座很宽,造成滤波效果不是很好。增益开关调制的法布里-珀罗半导体激光器 FP2 的多纵模输出光脉冲光谱示于图 2(c)。当光纤环路连上后,可以得到稳定的双波长互注入锁定光脉冲输出,图 2(d)即为在 80:20 光纤耦合器的 20% 输出端得到的双波长互注入锁定光脉冲光谱。从图 2 中可以看到,用这种注入锁定方法可以得到较高的边模抑制比。

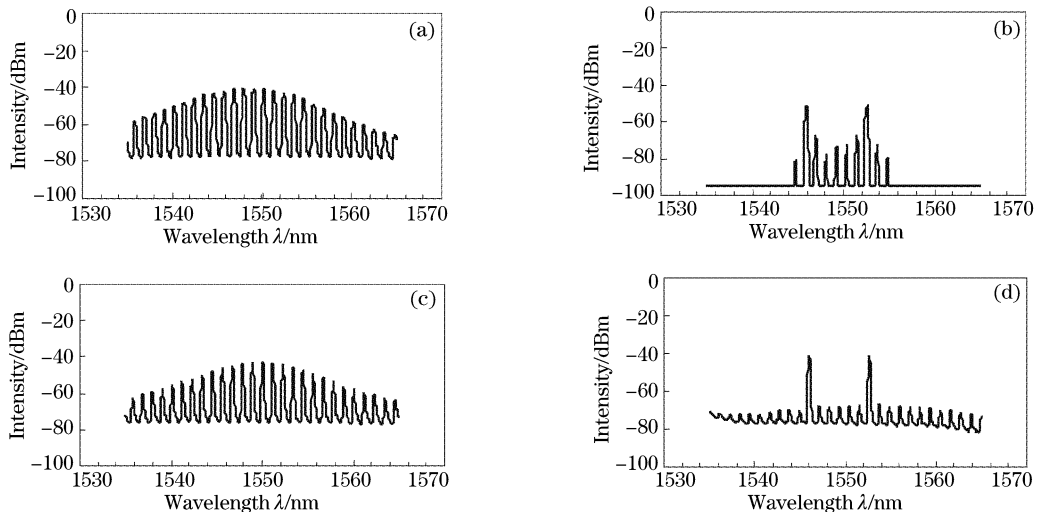


图 2 (a)增益开关调制法布里-珀罗半导体激光器 FP1 输出光脉冲光谱,(b) 由光纤光栅反射的双波长光脉冲光谱;
(c) 增益开关调制法布里-珀罗半导体激光器 FP2 输出光脉冲光谱,(d) 互注入锁定输出光脉冲光谱

Fig. 2 (a) Output pulse spectrum of the gain-switched F-P laser diode FP1, (b) dual-wavelength pulse spectrum reflected by the FBGs, (c) output pulse spectrum of the gain-switched F-P laser diode FP2, (d) mutual pulse injection-locked output spectrum

图 3 显示了从 80:20 光纤耦合器的 20% 功率输出端得到的双波长光脉冲光谱。通过应力调节两个光纤光栅的布拉格反射波长,得到不同波长的双波长光脉冲输出,而光脉冲重复频率保持在 524.6 MHz 不变。在图 3(a) 中峰值波长分别位于

1543.9 nm 和 1556.1 nm,间距为 13.2 nm。通过应力调节光纤光栅反射的布拉格波长,得到图 3(b) 所示峰值波长分别位于 1546.0 nm 和 1553.8 nm 的双波长光脉冲输出光谱,进一步调节两个光纤光栅,得到峰值波长分别位于 1549.2 nm 和 1551.6 nm 的双波长光

脉冲,峰值波长间距为 2.4 nm。利用一个法布里-珀罗滤波器对双波长光脉冲滤波,可分别得到两个对应的单波长光脉冲,经掺铒光纤放大器放大器放大后输入光示波器中观察。图 3(b)中两个波长对应的单波长光脉冲列示于图 4。仔细调节两个光延迟线和偏振控制器,可以优化输出光脉冲的边模抑制比。

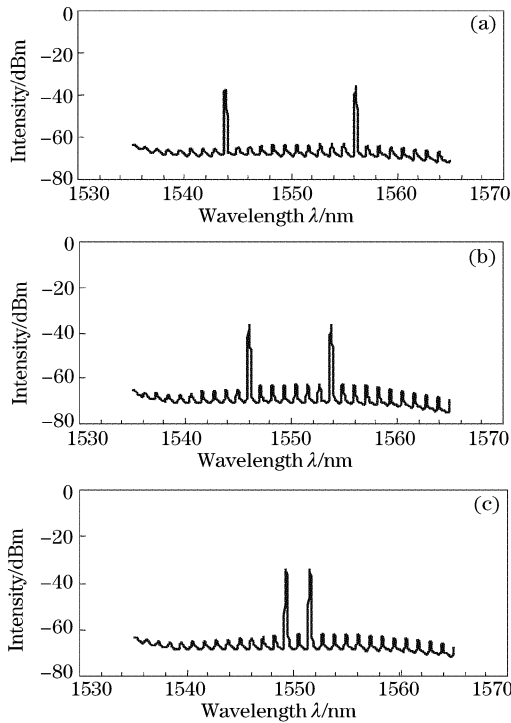


图 3 可调谐双波长互注入锁定输出光脉冲光谱。(a) 在 1543.9 nm 和 1556.1 nm 输出光脉冲光谱, (b) 在 1546.0 nm 和 1553.8 nm 输出光脉冲光谱, (c) 在 1549.2 nm 和 1551.6 nm 输出光脉冲光谱

Fig. 3 Tunable dual-wavelength mutual pulse injection-locked output spectrum. (a) at 1543.9 nm and 1556.1 nm, (b) at 1546.0 nm and 1553.8 nm, (c) at 1549.2 nm and 1551.6 nm

不同波长处得到的光脉冲的边模抑制比示于图 5。从图 5 可以看到,从 1540.5 nm 到 1557.2 nm 的 16 nm 的波长调节范围内可以获得输出光脉冲边模抑制比高于 18 dB,而在稍微小一点的 13.2 nm 的波长调节范围内,边模抑制比可高于 25 dB。最大波长调节范围受限于增益开关调制的法布里-珀罗半导体激光器的输出光谱,光谱越宽且越平坦则调节范围也越宽。两个法布里-珀罗半导体激光器输出光谱的重叠程度,光脉冲在两个激光器中的传输时间,注入光脉冲的偏振态以及掺铒光纤放大的增益都将影响输出光脉冲的边模抑制比。

在双波长互注入锁定系统中,由于注入锁定的是两个模式,这两个模式之间存在着模式竞争,为了

保证两个模式的输出强度基本一致,可适当调节偏振控制器,以平衡两个模式的强度。

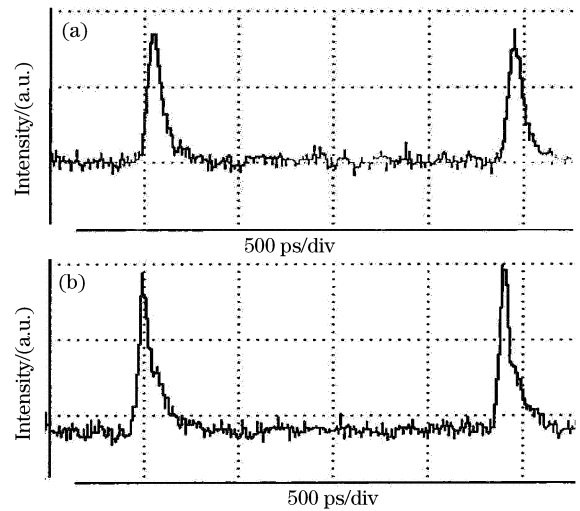


图 4 互注入锁定输出光脉冲。(a) 在 1546.0 nm 波长处输出光脉冲, (b) 在 1553.8 nm 波长处输出光脉冲

Fig. 4 Mutual pulse injection-locked output pulse trains. (a) at wavelength 1546.0 nm, (b) at wavelength 1553.8 nm

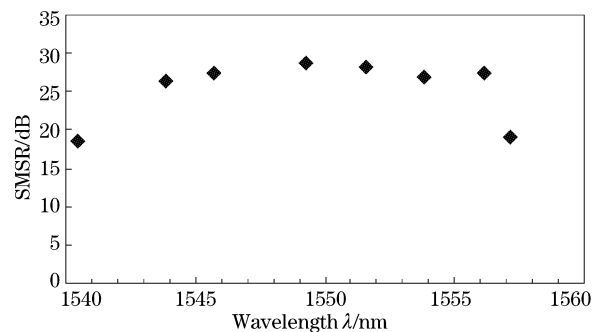


图 5 不同波长处输出光脉冲边模抑制比

Fig. 5 Measured side mode suppression ratio (SMSR) of the output pulses at different wavelengths

4 结 论

本文报道了互注入锁定系统产生波长可调节窄光脉冲的实验系统。在 13.2 nm 波长调节范围内得到的输出光脉冲边模抑制比高于 25 dB。输出光脉冲重复频率为 524.6 MHz,在整个过程中保持不变。系统稳定,波长调节方便。

参 考 文 献

- 1 Wang C L, Pan C L. Dual-wavelength actively mode-locked laser-diode array with an external grating-loaded cavity[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18): 1456~1458
- 2 Morioka T, Uchiyama K, Kawanishi S *et al.*. Multiwavelength picosecond pulse source with low jitter and high optical frequency

- stability based on 200 nm supercontinuum filtering[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(13): 1064~1066
- 3 Zhu B, White I H. Variable delay dual wavelength picosecond optical pulse generation using an actively mode-locked multichannel grating cavity laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(23): 2928~2930
- 4 Wang D N, Shu C. Tunable dual-wavelength picosecond pulse generation using multiple-optical-path self-seeding approach[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(9): 1211~1213
- 5 Zhao Y, Shu C. Single-mode operation characteristics of a self-injection seeded Fabry-Perot laser diode with distributed feedback from a fiber grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(11): 1436~1438
- 6 Li Shenping, Chiang K S, Gambling W A *et al.*. Self-seeding of Fabry-Perot laser diode for generating wavelength-tunable and chirp-compensated single-mode pulses with high side mode suppression ratio[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(11): 1441~1443
- 7 Anandarajah P, Maguire P J, Clarke A *et al.*. Self-seeding of a gain-switched integrated dual-laser source for the generation of highly wavelength-tunable picosecond optical pulses[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 629~631
- 8 Zhang M, Wang D N, Li H *et al.*. Tunable dual-wavelength picosecond pulse generation by the use of two Fabry-Pérot laser diodes in an external injection seeding scheme[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **14**(1): 92~94
- 9 Wang D N, Fang Xiaohui. Generation of electrically wavelength tunable optical short pulses using a Fabry-Perot laser diode in an external-injection seeding scheme with improved side mode suppression ratio[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(1): 123~125
- 10 Chan K, Shu C. Electrically wavelength-tunable pulse generated by synchronous two-way injection seeding[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(2): 170~172
- 11 Xu Jianhua, Zhang Weizai, Ding Hao *et al.*. Injection locking and far-field distribution of 1.3 μm semiconductor lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(12): 157~160 (in Chinese)
徐建华,张位在,丁浩等. 1.3 μm 注入锁定半导体激光器及其远场特性[J]. *光学学报*, 1995, **15**(2): 157~160
- 12 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Experimental reseraches of injection locking fiber ring resonator laser[J]. *Chin. J. Quant. Eletron.*, 2001, **18**(6): 525~529 (in Chinese)
俞本立,钱景仁,罗家童等. 注入锁定光纤环形腔激光器实验研究[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(6): 525~529
- 13 Tao Hua, Liu Tao, Zhang Jing *et al.*. Generation of tunable amplitude-squeezed light by injection locking a laser diode at Low temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1486~1488 (in Chinese)
陶桦,刘涛,张靖等. 低温下半导体激光器注入锁定产生的可调谐压缩光[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1486~1488
- 14 Zhang M, Wang D N, Li H *et al.*. Dual-wavelength ultra-short pulse generation by use of semiconductor laser diode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(4): 329~332 (in Chinese)
张敏,王东宁,李宏等. 半导体激光器生成双波长超窄脉冲的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(4): 329~332
- 15 Xu Lei, Yao Minyu, Zhang Jianfeng *et al.*. A novel technique of self-seeding of GS-DFB laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(5): 427~430 (in Chinese)
徐磊,姚敏玉,张剑峰等. GS-DFB 半导体激光器的光自注入技术[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(5): 427~430
- 16 Yang Shiquan, Meng Hongyun, Xiang Yang *et al.*. Dual-wavelength picosecond pulses generated from self-seeded gain-switched laser diode with fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1063~1066 (in Chinese)
杨石泉,蒙红云,项阳等. 双波长自注入式光纤光栅外腔脉冲半导体激光器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1063~1066