

光反馈对光纤光栅外腔半导体激光器特性的影响

江璐芸^{1,2} 王凌华¹ 林中晔¹ 薛正群¹ 苏 辉¹

¹中国科学院福建物质结构研究所激光工程技术研究室, 福建 福州 350002

²福建师范大学材料科学与工程学院, 福建 福州 350002

摘要 主要研究了外加光反馈对光纤布拉格光栅外腔半导体窄线宽激光器特性的影响。在研究温度对光纤光栅外腔半导体激光器发射波长影响的基础上, 设计了强度可调的外加光反馈系统, 并利用延时自外差法测试外腔半导体激光器的线宽, 从实验上分析了不同强度的外加光反馈对外腔半导体激光器线宽和噪声的影响。实验结果表明, 在外加光反馈强度逐渐增强的过程中, 激光器线宽逐渐变窄。当反馈比为 -22 dB 时, 激光器线宽被压窄至原始线宽的 15%。与此同时, 在相同的反馈变化下, 激光器的相对强度噪声开始无明显变化, 直到反馈比达到 -27 dB。再继续增大反馈强度, 相对强度噪声显著增大, 激光器内部发生相干崩塌。

关键词 激光器; 外腔半导体激光器; 线宽; 相对强度噪声; 光反馈; 延时自外差法

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0701008

Effect of Optical Feedback on Characteristic of the Fiber Grating External Cavity Semiconductor Laser

Jiang Luyun^{1,2} Wang Linghua¹ Lin Zhongxi¹ Xue Zhengqun¹ Su Hui¹

¹Laboratory of Laser Engineering and Technology, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China

²College of Materials Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract Influences of external optical feedback effects on characteristic of the fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser are investigated. When the effect of temperature on the wavelength of external cavity semiconductor laser is taken into account, an external optical feedback setup is built, and the optical feedback intensity can be adjusted. The linewidth of the external cavity semiconductor laser is measured by delayed self-homodyne technique, and the changes of linewidth and noise of the laser with different external optical feedback are analyzed. Experimental results show that the linewidth of the laser decreases when the optical feedback intensity increases. The linewidth is narrowed down to 15% of the original one when the feedback ratio reaches -22 dB. Meanwhile, within the same variation of the optical feedback, the relative intensity noise of the laser has no obvious change until the feedback ratio increases to -27 dB. As the feedback further increases, the relative intensity noise of laser increases significantly and the coherent collapse happens inside of lasers.

Key words lasers; external cavity semiconductor laser; linewidth; relative intensity noise; optical feedback; delayed self-homodyne technique

OCIS codes 140.5960; 300.3700; 270.2500

1 引 言

高速相干光通信系统最主要的优点是在较小的接收光功率下获得良好的误码率, 从而减小中继放

收稿日期: 2016-02-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-25

基金项目: 国家 863 计划(2013AA014202)、国家自然科学基金(61405198)

作者简介: 江璐芸(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事外腔半导体激光器制备及性能方面的研究。

E-mail: jiangluyun@fjirsm.ac.cn

导师简介: 苏 辉(1971—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体激光器、光电器件及系统方面的研究,

E-mail: huisu@fjirsm.ac.cn (通信联系人)

大设备的使用,显著降低系统成本^[1-2]。而作为高速相干光通信系统的核心器件——超窄线宽半导体激光光源^[3],对于它本身及在系统应用中的特性研究至关重要。目前的光纤通信系统所使用的外腔激光器一般线宽约为 1 MHz,功率约为 100 mW,但在高速相干光通信系统中,高阶调制格式和相干探测接收机对激光器线宽的要求更为严格,一般要求在 100 kHz 以下,而对接收光功率要求较低,达到 10 mW 量级即可。一般来说,半导体激光器的线宽和噪声等特性除了与芯片材料和器件结构有关之外,激光器在光通信系统中还会受到一定程度的外部光反馈的影响^[4]。Peterman^[5]对半导体激光器受外部光反馈而产生的内部影响进行了研究。Su 等^[6]针对量子点激光器和量子阱激光器对外部光反馈的不同反应进行了研究,发现适当强度的外部光反馈可以有效压窄激光器的线宽,但当激光器中来自外部的反馈光强度达到一定临界值后,半导体激光器内部可能出现相干崩塌^[7],激光器的各项特性均会受到影响。Yu 等^[8]从理论上分析了外部光反馈对半导体激光器内部线宽增强因子的影响。Chuang 等^[9]从实验上对不同反馈腔长及反馈强度对半导体激光器的线宽增强因子影响进行研究。龙睿等^[10]利用数值模拟的方法研究了外腔腔长及折射率对利特罗型外腔半导体激光器的影响。基于以上研究可知,外加光反馈对激光器线宽及噪声有明显影响,利用外部光反馈压窄系统中激光器的线宽,可使其在相干检测中表现出更好的性能。

对此,本文设计并搭建了一套可变光反馈系统,通过固定反馈腔长度,调节激光器输出光的反射比例,对光纤光栅外腔激光器在不同强度反馈光注入下的线宽及相对强度噪声变化进行实验研究。实验结果表明,线宽随光反馈增强而逐渐变窄,反馈比达到 -22 dB 时,可压窄至原始线宽的 15%,再继续增强光反馈,线宽又重新开始展宽。当激光器处于 -27 dB ~ -21.5 dB 的反馈比时,其噪声显著变大,发生相干崩塌^[11]。

2 实验装置

2.1 外腔半导体激光器的输出特性

采用课题组自主设计和制备的中心波长为 1550 nm 的光纤光栅外腔半导体激光器^[12]作为实验对象,具体性能参数可参见文献^[13]。由于外腔半导体激光器使用光纤光栅作为外腔,在输入电流不变条件下,半导体介质和光纤折射率会随着温度变化而发生变化,从而使纵模发生移动,在某些温度附近还会出现模式跳变现象^[14]。因此,实验首先针对温度对激光器中心波长的影响进行研究。保持 130 mA 注入电流不变,在 20 °C ~ 45 °C 的温度范围对激光器中心波长进行测试,测试结果如图 1 所示。两条曲线分别对应温度持续上升和温度持续下降时激光器中心波长的变化。可以看出,温度上升时,激光器的中心波长往长波方向移动,并且在 27 °C, 35 °C, 42 °C 附近发生模式跳变,在跳变点附近,温度上升和下降时,相同温度点对应的中心波长略有不同,由图 1 的曲线可以看出有“窗口”出现。在这几个温度点附近,激光器的工作状态较不稳定。因此,在光反馈实验中必须注意选择中心波长相对稳定的状态进行实验。

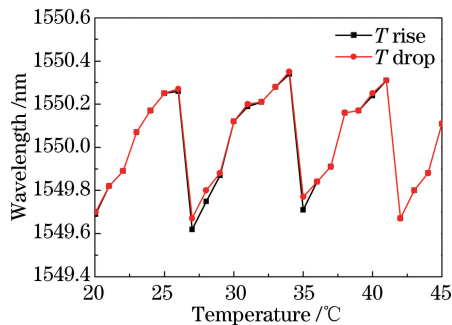


图 1 激光器中心波长随温度持续上升或下降发生的变化

Fig. 1 Change of laser wavelength with temperature continuing rise or drop

根据激光器的温度-波长测试结果,将工作温度调整为 23 °C,激光器的功率-电流曲线如图 2(a)所示。功率-电流曲线中扭折点对应模式跳变点,源于半导体增益芯片腔内的残余法布里-珀罗(FP)腔模式与光纤光栅外腔模式之间竞争导致的非线性作用^[15],这是外腔 FBG 半导体激光器普遍存在的现象。当工作温度为 23 °C,半导体激光器输入电流固定在 130 mA 时,激光器的输出光谱图如图 2(b)所示,为稳定的单模激

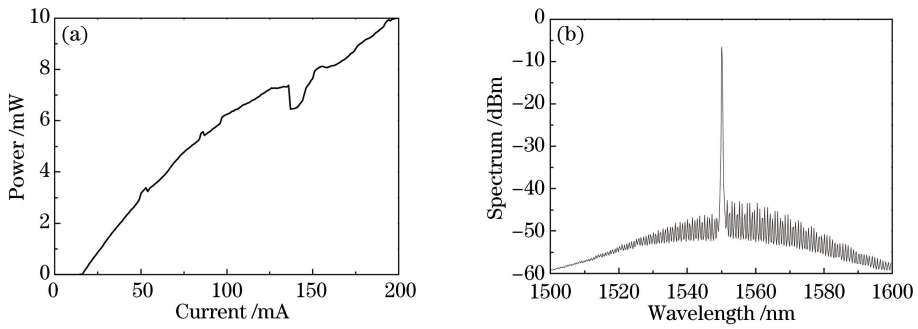


图 2 (a) 激光器的功率-电流曲线; (b) 注入电流 130 mA 的光谱图

Fig. 2 (a) Output power versus pump current of the laser; (b) spectrum with 130 mA current injection

光输出,中心波长为 1550.1 nm,边模抑制比为 48 dB,激光输出光功率为 9.3 mW。

2.2 线宽测试系统

由于激光器的线宽在 100kHz 量级,普通光谱仪无法准确测量其线宽,所以实验中采用精度和分辨率较高的延时自外差方法^[16]对器件进行线宽测量。测量系统如图 3(a)所示。激光器的输出光经由光纤分束器,分成 20:80 的两路光输出。其中光功率为 80% 输出的一路光用 40 km 的单模光纤(SMF)作延时处理,另一路输出光用偏振控制器(PC)调整偏振状态,使两路光到达光纤合束器时的偏振态相互垂直,以免延迟时间不够,造成两路光发生干涉。两臂的干涉光通过光电探测器(PD)进行光电转换后输入频谱分析仪(ESA),进而得到光电流谱线。假设激光器的线型为洛伦兹型,线宽测试结果及拟合曲线如图 3(b)所示。频谱仪测量得到光电流线宽为 146 kHz,由于延时自外差法测得的光电流线宽为激光器线宽的 2 倍^[16],所以可得到激光器线宽为 73 kHz。

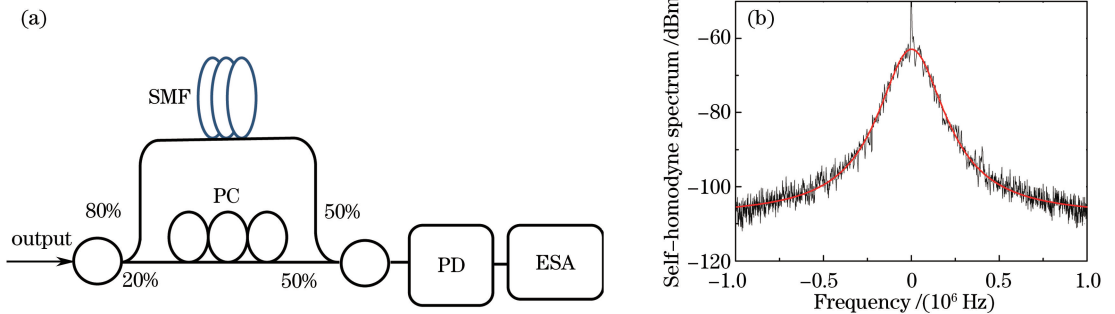


图 3 (a) 延时自外差法激光线宽测试系统; (b) 线宽测试结果及拟合曲线

Fig. 3 (a) Delayed self-heterodyne method for laser linewidth measurement setup; (b) linewidth test results and fitting curve

2.3 可调节光反馈系统

为了进一步研究不同强度的反馈光对光纤光栅外腔半导体激光器的线宽及噪声影响,设计搭建了如图 4 所示的可调节光反馈系统。激光器输出光经过分束比为 50:50 的光耦合器,平分成两路输出,一路定义为反馈端,另一路定义为测试端。反馈端光路由可变光衰减器(VOA)和反射率为 90% 的光纤反射镜组成,利用可变光衰减器调节激光器的反馈光强度,并由光功率计(OPM)进行监测。测试端光路则经由光隔离器(ISO)再连接到图 3(a)所示的线宽测试系统中。为尽可能避免或减少系统中光纤连接处的反馈光对激光器造成影响,反馈系统中的光纤连接头均选择 APC 接头。带尾纤的器件尾纤长度均为 1 m,所用光纤跳线长度均为 1 m,反射镜到激光器的总距离为 3 m。

3 实验结果和讨论

3.1 不同光反馈比例下的线宽

将所用激光器置于 130 mA 的驱动电流和 23 °C 的温度条件下,其输出光功率为 9.3 mW 左右。定义反

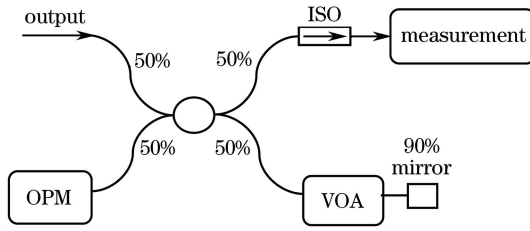


图 4 强度可调的外加光反馈系统

Fig. 4 Intensity modulated setup of external optical feedback system

馈光比例为反馈光功率与激光器输出功率的比值,表达式为

$$\Gamma_{dB} = P_1 - P_2, \quad (1)$$

式中 P_1 为光功率计测量得到的反馈光功率, P_2 为激光器输出光功率。

在可变光衰减器的调节下,控制反馈光比例在 $-60 \text{ dB} \sim -20 \text{ dB}$ 的范围内。从频谱仪所显示线型可以看出,反馈光比例逐渐变大,线宽逐渐变窄,结果如图 5(a)所示。在外加光反馈比例低于 -60 dB 时,激光器的线宽约为 73 kHz 。随着反馈比不断加大,激光器线宽逐渐变窄,当反馈比达到 -22 dB 时,激光器的线宽约为 12 kHz ,线宽被压缩至原始线宽的 15% 。当反馈比继续增强至 -20 dB 时,线宽又重新展宽为 14 kHz ,继续加大光反馈比例,测试谱线出现不稳定。在光反馈比例从 -22 dB 增加至 -20 dB 过程中,激光器线宽重新展宽,这是由于激光器内部开始出现相干崩塌所导致。

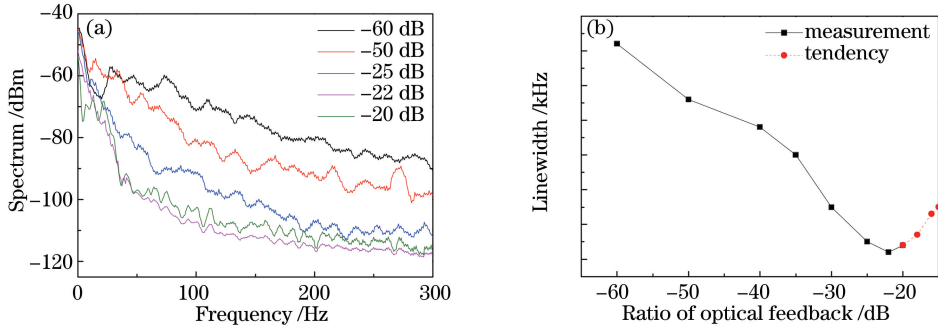


图 5 (a) 不同光反馈下的线宽测试谱线; (b) 线宽随光反馈的变化

Fig. 5 (a) Test spectrum of linewidth under different optical feedbacks; (b) linewidth variation with optical feedback

3.2 不同光反馈比例下的相对强度噪声

弱反馈下,激光器的强度噪声谱不会有明显波动,随着反馈增强至某一范围,原有的激光相干性由于内部的反馈光强度增大而被破坏,激光器将处于相干崩塌状态,导致其线宽展宽,相对强度噪声显著提升^[17]。为进一步验证激光器线宽是否是因为内部出现相干崩塌而展宽,对激光器在不同光反馈比例下的相对强度噪声进行测试。

在相同实验条件下,利用频谱仪对激光器 $0 \sim 20 \text{ GHz}$ 频率范围内的相对强度噪声^[18]进行测试。实验过程中,不同反馈比之下的噪声谱如图 6(a)~(e)所示。光反馈比例从 -60 dB 增加至 -27 dB 前,噪声谱都没有明显变化。当反馈比达到 -27 dB 时,谱线中个别频段的点的噪声功率有所提升,点的位置并不固定。在反馈比从 -27 dB 增加到 -21.5 dB 的过程中,噪声功率提升的频率点逐渐增多。当反馈比达到 -21.5 dB 时,噪声功率整体提升,且再继续增大反馈比,噪声谱也不再变化。图 6(f)为相对强度噪声随外加光反馈比例的变化,其中,为体现反馈对噪声变化的影响,相对强度噪声(N_{RI})表达式为^[18]

$$N_{RI} = \frac{1}{f_1 - f_0} \cdot \frac{\int_{f_0}^{f_1} P_{FB}(f) df - \int_{f_0}^{f_1} P_O(f) df}{\int_{f_0}^{f_1} P_O(f) df}, \quad (2)$$

式中 f_1 是频率范围的最高频, f_0 是频率范围的最低频, $P_{FB}(f)$ 是加反馈情况下的噪声谱线, $P_O(f)$ 是原始噪声谱线。

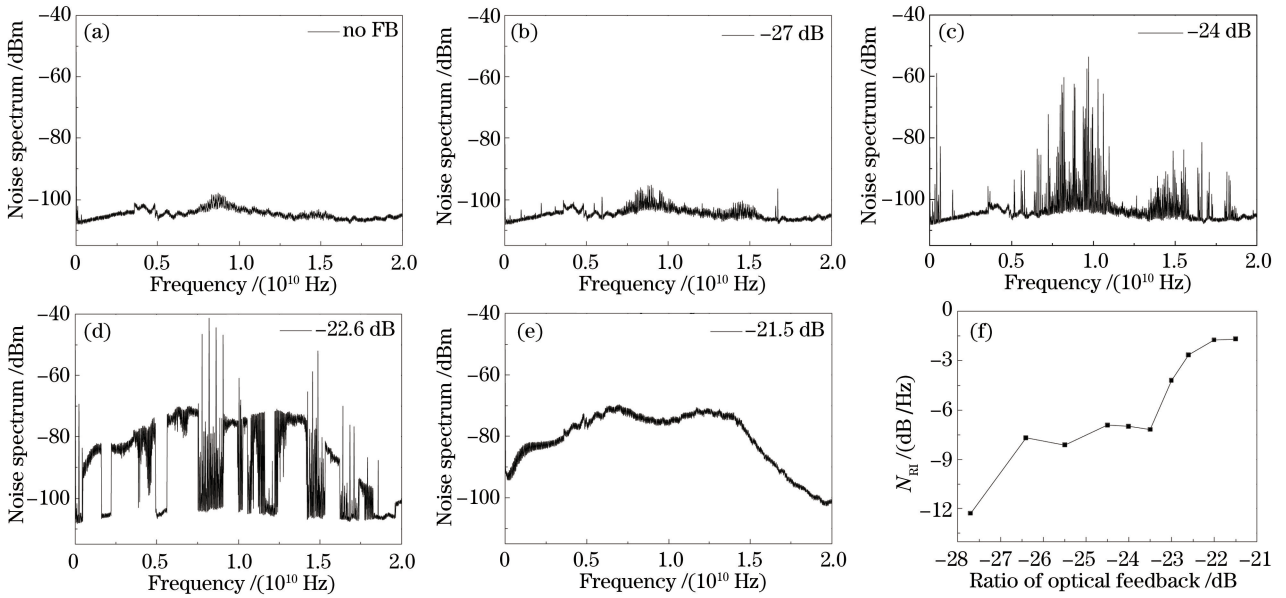


图 6 (a)~(e) 不同光反馈下的噪声谱线; (f) 相对强度噪声随光反馈的变化

Fig. 6 (a)~(e) Noise under different optical feedbacks; (f) relative intensity noise change with optical feedbacks

由噪声谱的变化可以看出,在反馈比为-21.5 dB时,所有频率点的噪声功率都提升,相对强度噪声也显著提升。这与之之前光反馈比由-22 dB增加至-20 dB时,激光器线宽重新展宽的情况相一致,由此可知激光器内部发生相干崩塌的临界反馈比为-21.5 dB。由此证明已被压窄的线宽是由于激光器内部发生相干崩塌而重新展宽。这时的激光器已经不能满足超高速相干光通信系统的光源标准。

以上实验结果表明,光纤光栅外腔半导体激光器在不同强度外加光反馈下,线宽相对于原始线宽会有不同程度的压窄,线宽变化与光反馈比例总体呈线性关系。但是当外加光反馈比达到一定阈值时,激光器噪声发生显著增大,激光器内部会出现相干崩塌,线宽在压窄到极限水平之后,又开始重新展宽。

4 结 论

针对光纤光栅外腔半导体激光器的模式跳变问题,对其温度特性进行了详细表征,确认了其稳定工作点。自行设计并搭建了可变量反馈系统,并采用延时自外差法测试激光器线宽。测试结果表明,在光反馈比例从-60 dB增加至-22 dB时,激光器线宽逐渐压窄至原始线宽的15%,反馈比例继续增大至-20 dB时,线宽又重新展宽。通过进一步对激光器在不同光反馈比例下的相对强度噪声进行测量,发现激光器在较强反馈下会发生相干崩溃,其临界反馈比例为-21.5 dB。由此证明,在使用光纤光栅外腔半导体激光器作为光源的超高速光纤通信系统中,给已封装的激光器加上适当的光反馈可以作为压窄线宽、提升光源质量的一个有效手段。但同时,反馈比例需低于激光器发生相干崩塌的临界反馈比,否则激光器的噪声将显著增大,线宽开始重新变宽,从而导致系统性能降低。

参 考 文 献

- Zeng Qiong. Research on the optical receiver in coherent optical communication system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication, 2008: 2-5.
曾 琼. 相干光通信系统中接收机的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008: 2-5.
- Liu Hongyang, Zhang Yangge, Ai Yong, *et al.*. Design and implementation of balance detector used in coherent optical communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 070601.
刘宏阳, 张燕革, 艾 勇, 等. 用于相干光通信的平衡探测器的设计与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 070601.
- Seimetz M. Laser linewidth limitations for optical systems with high-order modulation employing feed forward digital carrier phase estimation[C]. Optical Fiber communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008:

OTuM2.

- 4 Pan Biwei, Lu Dan, Yu Liqiang, *et al.*. Narrow-linewidth laser and photonic microwave generation using a monolithic integrated amplified feedback laser with delayed optical feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s2): s214010.
潘碧玮, 陆 丹, 余力强, 等. 基于光反馈单片集成放大反馈激光器的窄线宽激光和微波信号产生[J]. *光学学报*, 2015, 35(s2): s214010.
- 5 Peterman K. External optical feedback phenomena in semiconductor lasers[J]. *Proceedings of the SPIE*, 1995, 2450: 121-129.
- 6 Su H, Zhang L, Gray A L, *et al.*. High external feedback resistance of laterally loss-coupled distributed feedback quantum dot semiconductor lasers[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2003, 15(11): 1504-1506.
- 7 Grillot F, Thedrez B, Gauthier-Lafaye O, *et al.*. Coherence-collapse threshold of 1.3 μm semiconductor DFB lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(1): 9-11.
- 8 Yu Y, Xi J. Influence of external optical feedback on the alpha factor of semiconductor lasers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1781-1783.
- 9 Chuang C F, Liao Y H, Lin C H, *et al.*. Linewidth enhancement factor in semiconductor lasers subject to various external optical feedback conditions[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5651-5658.
- 10 Long Rui, Wang Hailong, Gong Qian, *et al.*. Optical feedback of semiconductor external cavity laser [J]. *Communications Technology*, 2013(6): 142-144.
龙 睿, 王海龙, 龚 谦, 等. 基于半导体外腔激光器的光反馈研究[J]. *通信技术*, 2013, 46(6): 142-144.
- 11 Lenstra D, Verbeek B, Boef Den A. Coherence collapse in single-mode semiconductor lasers due to optical feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1985, 21(6): 674-679.
- 12 Bird D M, Armitage J R, Kashyap R, *et al.*. Narrow line semiconductor laser using fibre grating [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(13): 1115-1116.
- 13 Pan Biwei, Yu Liqiang, Lu Dan, *et al.*. 20 kHz narrow linewidth fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(5): 0502007.
潘碧玮, 余力强, 陆 丹, 等. 20 kHz 窄线宽光纤光栅外腔半导体激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0502007.
- 14 Zhou Hanqing, Wu Zhengmao, Xia Guangqiong. Influence of the temperature variation on the lasing wavelength of the fiber grating external cavity semiconductor laser[J]. *Laser Journal*, 2003, 24(5): 65-66.
周寒青, 吴正茂, 夏光琼. 温度变化对光纤光栅外腔半导体激光器激光波长的影响[J]. *激光杂志*, 2003, 24(5): 65-66.
- 15 Campbell R J, Armitage J R, Sherlock G, *et al.*. Wavelength stable uncooled fibre grating semiconductor laser for use in an all optical WDM access network[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(2): 119-120.
- 16 Wei Zhipeng. Measurement of the narrow line width laser spectrum based on the delayed self-heterodyne[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(3): 38-40.
魏志鹏. 基于延时自外差法的窄线宽激光谱宽测量[J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(3): 38-40.
- 17 Kallimani K I, O'Mahony M J. Relative intensity noise for laser diodes with arbitrary amounts of optical feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(8): 1438-1446.
- 18 Hui R, O'Sullivan M. *Fiberoptic measurement techniques*[M]. Heidelberg: Academic Press, 2009: 261-266.