

文章编号: 0253-2239(2010)s100207

1550 nm 波段多波长拉曼光纤激光器实验研究

秦祖军¹ 周晓军² 伍浩成³

¹桂林电子科技大学电子工程学院, 广西 桂林 541004
²电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054
³桂林激光通信研究所, 广西 桂林 541004

摘要 实验研究了由宽带啁啾光纤布拉格光栅和 Sagnac 梳状滤波器构成谐振腔的多波长拉曼光纤激光器, 分析了在激光器谐振腔内熔接一段积分拉曼增益小的色散位移光纤(引入光波间的四波混频作用)对激光器输出谱的影响。结果表明, 同等抽运功率条件下, 四波混频的引入起到了光波间的能量传递作用, 使具有较平坦功率谱的输出波长从未加入色散位移光纤时的 3 个增加至 6 个。

关键词 光纤光学; 受激拉曼散射; 多波长光纤激光器; 四波混频

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201030.s100207

Experimental Investigation on Multiwavelength Raman Fiber Laser at 1550 nm

Qin Zujun¹ Zhou Xiaojun² Wu Haocheng³

¹School of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China
²School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China
³Guilin Institute of Optical Communications, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract A stimulated Raman scattering (SRS)-based multiwavelength fiber laser comprising of broadband chirped fiber Bragg grating and Sagnac interleaver is investigated experimentally. Four-wave mixing processes among channels are introduced into the cavity through a length of dispersion-shifted fiber (DSF) with small integrating Raman gain. Results show that four-wave mixing plays a role of transferring energy from higher power channels to lower ones, and the quantity of output wavelength increases from three without DSF to six at the same pump level.

Key words fiber optics; stimulated Raman scattering(SRS); multiwavelength fiber lasers; four-wave mixing

OCIS codes 140.3510; 190.4370; 230.2285; 290.5860

1 引 言

随着大容量光纤通信网的发展, 光波分复用(WDM)技术得以广泛的应用, 它要求多波长光源具有线宽窄、波长间隔小、功率谱平坦、各信道波长及其间隔稳定等特点。当前 WDM 系统中使用的激光光源, 基本是分布反馈激光器。随着通信系统的信道数越来越多, 若仅仅通过单纯增加分立的单波长激光器数量, 势必增加系统成本与复杂程度。性能稳定的多波长光纤激光器具有结构简单、效率高以及与光纤系统具有良好兼容性等优点, 是近年

来研究 WDM 光源的热点^[1~10]。基于掺铒光纤为增益媒质的多波长激光器输出波长间隔比掺铒光纤均匀加宽线宽小时, 将出现严重的模式竞争和模式跳变, 导致激光器系统工作不稳定; 为获得室温稳定的多波长掺铒光纤激光器, 必须采用辅助措施抑制铒光纤的均匀加宽效应^[8]。基于半导体光放大器的多波长光纤激光器具有非均匀加宽性质, 可以在室温下获得稳定多波长激光输出, 但是它为非全光纤结构, 具有较大的偏振相关增益、噪声大以及对环境温度变化敏感等诸多不足^[8,9]。

收稿日期: 2010-07-01; **收到修改稿日期:** 2010-09-11

作者简介: 秦祖军(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤激光器、光纤放大器、非线性光纤光学和光信号处理等方面的研究。E-mail: qinzj@guet.edu.cn

基于光纤中受激拉曼散射效应的多波长拉曼光纤激光器近些年来得到广泛关注。拉曼光纤激光器最重要的优点之一就是作为增益媒质的光纤拉曼增益谱极宽,可以同时输出多个波长,波长间距宽可达数十纳米,窄可满足国际电信联盟(ITU)标准的零点几纳米;与掺稀土离子(如 Er^{3+})光纤相比较,它具有非均匀加宽性质,可以在室温下稳定工作。因此,多波长拉曼光纤激光器被认为是一种具有很强的竞争力的 WDM 光源^[1]。2005年, Wang 等^[7]报道了一种工作在 C 波段、波长间距为 100 GHz 的 50 波长输出环形腔拉曼光纤激光器;2008年, Luo^[6]报道了基于磷硅光纤的 O 波段 8 波长和 15 波长输出拉曼光纤激光器,波长间距分别为 0.8 nm 和 0.44 nm。然而,多波长拉曼光纤激光器不足之处是如果输出波长个数较多、所占谱宽较宽时,由于光纤本身拉曼增益谱的不平坦以及短波长对长波长的受激拉曼散射(SRS)放大,激光器的输出功率谱将不平坦、波动较大。在上述两公开报道的多波长拉曼光纤激光器文献中,激光器的输出功率谱波动分别达到 2.1 dB^[7]和 4 dB^[6]。

本文实验研究了基于 Sagnac 梳状滤波器和宽带啁啾光纤布拉格光栅的 1550 nm 多波长拉曼光纤激光器输出特性;分析了拉曼光纤激光器谐振腔内通过熔接一段积分拉曼增益小的色散位移光纤引入光波间的四波混频作用后对激光器输出功率谱的影响。

2 多波长拉曼光纤激光器实验系统与理论分析

2.1 多波长拉曼光纤激光器实验系统

多波长拉曼光纤激光器的结构如图 1 所示。斯

托克斯光谐振腔由宽谱啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)和 Sagnac 梳状滤波器构成;CFBG 的中心波长为 1548.723 nm,3 dB 带宽为 25.73 nm,峰值反射率高于 90%;Sagnac 滤波器由 2×2 的 3 dB 耦合器、偏振控制器(polarization controller)和保偏光纤(PMF)组成,它通过环内正、反方向传输的光在 3 dB 耦合器内发生干涉实现,其中 PMF 长度约为 $l=13$ m,双折射 $B=|n_x - n_y| = 3.1 \times 10^{-4}$ (1550 nm), n_x, n_y 分别表示 PMF 的慢、快轴折射率大小。抽运源为最大输出功率可达 2.5 W 的拉曼光纤激光器,其工作波长为 1455 nm,它通过 1455/1550 WDM 后向注入增益光纤中。激光器的振荡波长主要由 Sagnac 滤波器的反射峰位置和增益光纤的拉曼增益系数峰值决定。拉曼增益光纤的选择主要考虑以下几个因素:1)与峰值拉曼增益系数对应的拉曼频移(峰值拉曼频移)约为 440 cm^{-1} ;2)为分析色散位移光纤(DSF)引入的四波混频非线性作用对激光器输出功率谱的影响,而忽略其对斯托克斯光的拉曼增益,增益光纤的积分拉曼增益要远大于色散位移光纤的积分拉曼增益;3)实验室条件等。为此,选用约 50 km 的普通单模光纤作为拉曼增益媒质,根据谐振腔内有、无色散位移光纤分两种情况来分别探讨多波长拉曼光纤激光器的输出特性。实验所选用的色散位移光纤长度约为 3 km、零色散波长为 1552 nm(与斯托克斯光波长相近)、色散斜率为 $0.082 \text{ ps}^2/(\text{nm} \cdot \text{km})$ (色散位移光纤的色散数据由武汉长飞光纤光缆有限公司提供)。最后,腔内 1550 nm 波段的斯托克斯光由 9:1 光纤耦合器(带宽: $\pm 20 \text{ nm}$; 插入损耗: $\leq 0.08 \text{ dB}$)的 10% 端口输出。

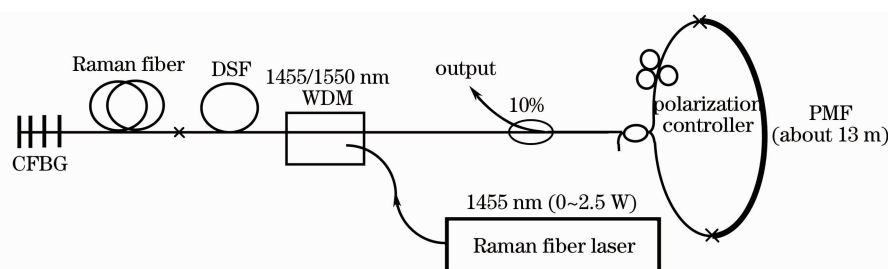


图 1 多波长拉曼光纤激光器

Fig. 1 Experimental setup of the multiwavelength Raman fiber laser

2.2 理论分析

为定性分析腔内由色散位移光纤诱导的四波混频作用,可将稳态条件下多波长拉曼光纤激光器谐振腔中抽运光、斯托克斯光功率满足的一阶微分耦合方程组写成

$$(P_0^\pm)' / P_0^\pm = \mp \alpha_0 \mp \sum_k g_k \lambda_k (P_k^+ + P_k^-) / \lambda_0, \quad (1)$$

$$(P_k^\pm)' / P_k^\pm = \mp \alpha_k \pm g_k (P_0^+ + P_0^-) \pm g_{\text{FWM}} \pm \Gamma_k, \quad (2)$$

式中符号“'”表示对沿光纤方向纵坐标 z 的微分,

P_0^+ , P_k^+ 分别表示沿光纤前(+)、后(-)向传输的抽运光、第 k 个斯托克斯光信道的功率, $\lambda_0, \lambda_k, \alpha_0, \alpha_k$ 分别表示对应的波长和光纤的吸收损耗, g 表示光纤的拉曼增益系数。 Γ_k 表示斯托克斯光各光波间的受激拉曼散射作用, 可以表示为

$$\Gamma_k = \sum_{i < k} g_{ik} (P_i^+ + P_i^-) \mp \sum_{i > k} g_{ik} \lambda_i (P_i^+ + P_i^-) / \lambda_k, \quad (3)$$

若各光波波长间距很小, Γ_k 可忽略。参数 g_{FWM} 表示由于色散位移光纤引入的光波间的四波混频作用: 若 $g_{\text{FWM}} > 0$, 表示第 k 个斯托克斯光波长从其它高功率光波获得参量增益; 若 $g_{\text{FWM}} < 0$, 则表示第 k 个斯托克斯光波长作为抽运源为其它低功率光波提供参量增益。

通过琼斯矩阵方法^[12,13]可推导出 Sagnac 滤波器的峰值反射波长, 即各斯托克斯光的中心波长 λ_k 。首先给出 Sagnac 滤波器的反射函数

$$r = 1 - t(\psi, \psi_1, \psi_2, \psi_3) \times \cos^2 \left[\frac{\Delta\varphi + \zeta(\psi, \psi_1, \psi_2, \psi_3)}{2} \right], \quad (4)$$

式中 $\Delta\varphi$ 表示 PMF 快慢轴双折射引入的相差, 可表示为 $\Delta\varphi = 2\pi tB/\lambda_k$, ψ 为 PMF 快轴与实验室坐标 y 轴的夹角。构成 Sagnac 滤波器的偏振控制器为常用的偏振控制器, 一般用普通单模光纤按一定半径绕制而成, 由三个光纤圈组成, 即 2 个 $\lambda/4$ 光纤圈和 1 个 $\lambda/2$ 光纤圈, 适当调节各光纤圈转动的角度, 可以获得任意方向的线偏振光。为方便数学分析, 可以将每个光纤圈看成一段展直的、具有独立琼斯矩阵的低双折射光纤, 其折射率快轴与实验室坐标系 y 轴的夹角为 ψ_i ($i = 1, 2, 3$), 任一组合 (ψ_1, ψ_2, ψ_3) 均确定一特定的偏振控制器(PC)偏振方向。 t, ζ 均与 PMF 和偏振控制器光纤圈双折射轴与实验室坐标夹角有关, 当实验系统调试好时, $\psi, \psi_1, \psi_2, \psi_3$ 就已知。从物理意义上, t 可以理解为 Sagnac 滤波器的透射系数, ζ 为偏振控制器光纤圈引入的附加相位。在 PMF 和偏振控制器的正常工作波长范围内, t, ζ 均为波长的缓变函数, 即 $\partial t/\partial \lambda \approx 0, \partial \zeta/\partial \lambda \approx 0$ 。从(4)式可知, Sagnac 滤波器的反射谱是波长 λ_k 的周期函数, 各个反射峰中心波长满足: $\Delta\varphi + \zeta(\psi, \psi_i) = (2m+1)\pi$, m 为整数, 即

$$\lambda_k = Bt / [m + 0.5 - \zeta(\psi, \psi_i) / (2\pi)]. \quad (5)$$

同时, 根据 ζ 波长不敏感性质, 相邻振荡光波的波长间距可写为

$$\Delta\lambda \approx \lambda^2 / Bt. \quad (6)$$

由以上两式可知, 调整偏振控制器光纤圈, 可调整 Sagnac 梳状滤波器的中心波长 λ_k , 但相邻波长间距将基本保持不变。在实验中, 根据 PMF 的长度和双折射, 可知 Sagnac 梳状滤波器的相邻反射峰波长间距 $\Delta\lambda$ 约为 0.596 nm(通过调整 PMF 长度可获得满足 ITU 规定的波长间距)。

根据(2)式, 为分析拉曼光纤激光器谐振腔内熔接色散位移光纤后腔内各斯托克斯光波长间的相互作用, 结合腔两端由啁啾光纤布拉格光栅[反射谱为 $r_{\text{CFBG}}(\lambda_k)$]和 Sagnac 梳状滤波器[反射谱为 $r(\lambda_k)$]反射构成的边界条件, 将各振荡波长满足的谐振条件写为

$$\sqrt{r_{\text{CFBG}}(\lambda_k) r(\lambda_k)} \cdot \exp \left\{ [g_{\text{FWM}}(\lambda_k) - \alpha(\lambda_k)] L + \int_0^L g(\lambda_k, z) P_0(z) dz \right\} = 1, \quad (7)$$

式中, 鉴于振荡波长间距 $\Delta\lambda$ 远远小于增益光纤的峰值拉曼频移(约 13.2 THz), 忽略了光波间的受激拉曼散射作用; $P_0(z) = P_0^+(z) + P_0^-(z)$ 表示抽运光前、后向传输功率之和。由(7)式可知, 在一定抽运功率条件下, 一些波长由于具有较高的净增益而达到受激拉曼散射阈值并振荡, 而另一些光波由于具有相对较高的谐振腔损耗而无法振荡。若光波间除了受激喇嘛散射作用外而无其余能量耦合作用, 振荡波长输出功率将单调增加至最大值; 若光波间能有效的产生四波混频非线性作用, 则振荡波长将通过参数 g_{FWM} 转移部分能量而饱和, 而部分未达到受激拉曼散射阈值的斯托克斯光波长也因获得参量增益而振荡, 从而在给定抽运功率下增加输出波长个数。在实验中, 色散位移光纤的零色散点基本与振荡的斯托克斯光波长一致, 因此可以有效的降低光波间的相位失配量, 使光波间的四波混频作用有效的产生。

3 实验结果与讨论

为研究色散位移光纤对多波长拉曼光纤激光器输出功率谱的影响, 首先分析谐振腔内无色散位移光纤时的情况。逐渐增加抽运功率至大于 1 W, 斯托克斯线首先出现在约 1555 nm, 与抽运波长对应的拉曼频移约为 442 nm^{-1} 。可看出, 要获得明显的 1550 nm 斯托克斯光输出, 抽运阈值功率要求较高, 这除了与拉曼光纤激光器的物理机制有关外, 还与实验所选取的拉曼增益光纤类型(普通单模光纤的拉曼增益系数低)、腔内器件之间的联接所引入的附

加损耗、保偏光纤与普通光纤模场不匹配等因素密切相关。在实际多波长拉曼光纤激光器设计过程中,通过选择具有高品质因子的拉曼光纤(即具有高的拉曼增益系数和低的吸收损耗)及优化其长度、改善实验工艺等措施来尽可能减小激光器损耗,提高抽运效率,可大大降低抽运阈值。

拉曼光纤激光器的消光比测量值不是很高,一方面与实验所用 Sagnac 光纤环中的 3 dB 耦合器耦合比偏离程度有关;另一方面与 Sagnac 光纤环内保偏光纤与偏振控制器、3 dB 耦合器之间的熔接/联接损耗有关。这两方面原因均降低了 3 dB 耦合器的峰值反射率(实验测量值小于 50%),减小了 Sagnac 滤波器的消光比,设法提高 Sagnac 梳状滤波器的峰值反射率,则可以使激光器的消光比达到几十 dB。实验中,也测量了多波长拉曼光纤激光器相邻波长的波长间距及振荡波长的线宽:相邻波长间距为 0.54 nm,与(6)式计算结果(0.596 nm)基本吻合;3 dB 线宽测量值约为 0.18 nm,谱线宽度较宽,原因可以归纳为:

1) Sagnac 光纤环类型的滤波器具有正/余弦函数平方反射/透射谱,通常其光谱精细度较低;

2) 实验采用的拉曼增益媒质较长,纵模间距小,纵模数量众多,虽然斯托克斯光波长远离增益光纤的零色散点(约 1310 nm),但如此小的纵模间距,仍然使得各纵模在拉曼光纤中发生四波混频的相位达到准匹配状态,从而使得纵模间的四波混频作用展宽振荡波长的谱线宽度。

将抽运功率增加至 2.3 W,调节偏振控制器的偏振态,此时具有最大输出波长个数的激光器输出

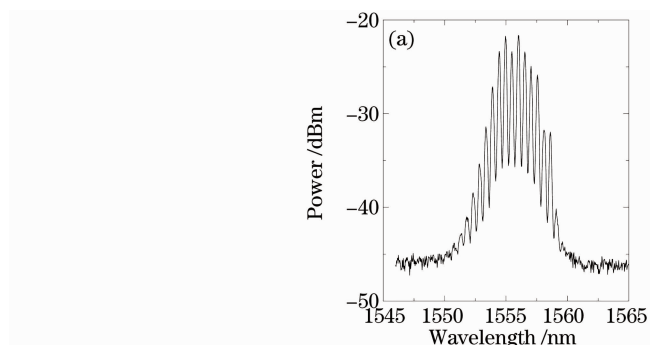


图 3 腔内有色散位移光纤时,拉曼光纤激光器的两个典型输出谱,抽运功率为 2.3 W

Fig. 3 Two output spectra of multiwavelength Raman fiber laser with DSF at 2.3 W pump level

从上面实验可知,熔接色散位移光纤后,输出波长个数增加,这并非是色散位移光纤提供的拉曼增益所致,原因为:1)色散位移光纤的积分拉曼增益远

谱如图 2 所示,其中 3 个功率最大的波长功率平坦度较好,功率差异为 0.19 dB。提高抽运功率,输出波长将更多,但实验所用的抽运源的最大输出功率仅为 2.5 W,考虑到设备安全因素,需留下 200 mW 的功率余量。

在多波长拉曼光纤激光器谐振腔内将一段色散位移光纤与增益光纤熔接,利用其零色散点靠近斯托克斯光波长的特点减小腔内光波间的相位失配量,光波间的四波混频作用将可以有效产生并影响激光器的输出功率谱。图 3 给出了抽运功率为 2.3 W 时,拉曼光纤激光器的两个典型输出谱,其中图 3(b)为通过调整偏振控制器获得的各个波长功率分布较均匀的输出谱。与腔内无色散位移光纤时的激光器的输出谱(见图 2)相比较,可以发现具有较平坦输出功率谱的波长个数从 3 个增加至 6 个,功率波动小于 0.5 dB(若通过精心调节偏振控制器的偏振态,改善光波间的四波混频发生效率,功率波动值将更小^[14])。

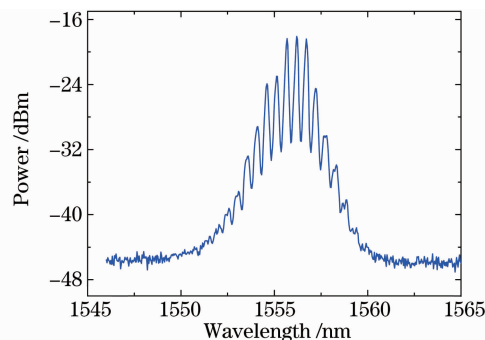


图 2 腔内无色散位移光纤时,拉曼光纤激光器的输出谱,抽运功率为 2.3 W

Fig. 2 Output spectrum of multiwavelength Raman fiber laser without DSF at 2.3 W pump level

小于作为增益媒质的普通单模光纤的积分拉曼增益, $g_{SMF} L_{SMF} \approx 8.5 g_{DSF} L_{DSF}$, 其中色散位移光纤的峰值拉曼增益约为普通单模光纤的 2 倍,即 $g_{DSF} \approx$

$2g_{\text{SMF}}$, 但普通单模光纤长度约为色散位移光纤的 17 倍, 即 $L_{\text{SMF}} \approx 17L_{\text{DSF}}$; 2) 实验系统中若去除单模光纤, 仅以色散位移光纤构成拉曼增益媒质, 并未观察到任何斯托克斯光波长达到受激拉曼散射振荡阈值而输出。因此, 与理论所预测的一致, 是由于振荡波长为低于受激拉曼散射阈值的光波提供了参量增益使之振荡并输出, 从而增加输出波长个数。另外, 相信通过提升抽运功率, 可以同时增加输出波长个数和减小各个波长间的输出功率差异, 这是因为色散位移光纤中发生的四波混频作用强烈依赖于参与作用的各个波长功率大小。

4 结 论

在拉曼光纤激光器谐振腔内熔接一段色散位移光纤后发现: 腔内无色散位移光纤时, 在 2.3 W 抽运功率条件下, 激光器输出三个功率谱较平坦的波长; 腔内有色散位移光纤时, 同等抽运功率大小可使激光器输出六个功率谱较平坦的波长。分析结果表明, 输出波长个数的增加并非色散位移光纤的拉曼增益所致, 而是由于色散位移光纤为光波间引入的四波混频非线性效应导致的能量传递作用。这种从高功率波长向低功率(或者低于受激拉曼散射振荡阈值)波长传递能量的作用也可用于平衡多波长拉曼光纤激光器的输出功率谱。

参 考 文 献

- 1 H. Lin. Waveband-tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(14): 2653~2657
- 2 Z. Zhang, Q. Kuang, M. Sang *et al.*. Multiwavelength fiber laser with ultradense wavelength spacing based on inhomogeneous loss with assistance of nonlinear polarization rotation[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(2): 254~257
- 3 Tian Jiajun, Yao Yong, Sun Yunxu *et al.*. Study on generation of the multiwavelength laser using the symmetric nonlinear optical loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 787~792
田佳峻, 姚 勇, 孙云旭 等. 利用对称非线性光纤环形镜产生多波长激光的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 787~792
- 4 Hu Zongfu, Wang Hao. Multi-wavelength laser generated by an active fiber ring resonator incorporating an optical phase modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 833~838
胡宗福, 王 浩. 有源光纤环形腔内相位调制产生多波长激光[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 833~838
- 5 M. Li, X. Chen, T. Fujii *et al.*. Multiwavelength fiber laser based on the utilization of a phase-shifted phase-only sampled fiber Bragg grating[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(11): 1717~1719
- 6 Z. Luo, Z. Cai, J. Huang *et al.*. Stable and spacing-adjustable multiwavelength Raman fiber laser based on mixed-cascaded phosphosilicate fiber Raman linear cavity[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(14): 1602~1604
- 7 Y. Wang, Q. Wang, W. Zhang *et al.*. Multiwavelength Raman fiber ring laser with the spectrum profile broadened by parametric four wave mixing in highly nonlinear dispersion-shifted fibers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(8): 460~462
- 8 Liu Yangge, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 883~894
刘艳格, 冯新焕, 董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 883~894
- 9 H. G. Han, S. B. Lee. Flexibly tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on four-wave mixing effect in dispersion-shifted fibers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10134~10139
- 10 Y. Gao, D. Chen, S. Gao. Stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on dispersion-shifted fiber and sagnac loop filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 519~521
- 11 J. Hecht. Multiple-wavelength sources may be the next generation for WDM[J]. *Laser focus world*, 2003, **39**: 117~120
- 12 D. V. Mortimore. Fiber loop reflection [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1217~1224
- 13 A. Yu, A. S. Siddiqui. Optical modulators using fibre optic Sagnac interferometers[J]. *IEEE Proc. Optoelectron.*, 1994, **141**(1): 1~7
- 14 X. Yang, X. Dong, S. Zhang *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fiber laser with 0.8nm spacing using sampled Bragg grating and photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2538~2540