

doi:10.3788/gzxb20154409.0906003

全开腔双倍间隔布里渊-喇曼多波长光纤激光器

许磊^{1,2}, 马万卓^{1,3}, 王天枢^{1,2}, 张鹏¹, 孔梅², 张靓²

(1 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 长春 130022)

(2 长春理工大学 理学院, 长春 130022)

(3 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要:设计了一种无反馈全开腔双倍间隔布里渊-喇曼光纤激光器. 采用 C+L 波段可调谐激光器作为布里渊泵浦, 中心波长为 1 455 nm 的激光二极管作为喇曼泵浦, 7 km 色散补偿光纤作为增益介质. 受激布里渊散射和喇曼放大在色散补偿光纤中同时产生, 奇数阶和偶数阶斯托克斯光分别从色散补偿光纤两端输出. 该结构减少了多个器件造成的插入损耗. 最多可得到 186 个波长数, 调谐范围为 28.6 nm, 波长间隔为 0.154 nm. 加入一段 4 m 掺铒光纤优化后可将边模抑制比从 14 dB 提高至 20 dB.

关键词: 光纤激光器; 受激布里渊散射; 受激喇曼散射; 多波长

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)09-0906003-5

All-opened Double-spacing Brillouin-Raman Multi-wavelength Fiber Laser

XU Lei^{1,2}, MA Wan-zhuo^{1,3}, WANG Tian-shu^{1,2}, ZHANG Peng¹, KONG Mei², ZHANG Jing²

(1 National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(3 College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: An all-opened double-spacing Brillouin-Raman fiber laser was investigated. A C+L band tunable laser was used as Brillouin pump, a laser diode with 1 455 nm center wavelength was used as Raman pump and 7 km dispersion compensation fiber was used as gain medium. Stimulated Brillouin scattering and Raman amplification were generated in the dispersion compensation fiber simultaneously and the odd-order and even-order Stokes light were obtained at the two ends of the dispersion compensation fiber respectively. The proposed configuration can reduce the insertion loss caused by multiple devices. The largest number of output channels is 186, the tuning range is 28.6 nm and the channel spacing is 0.154 nm. The side mode suppression ratio is enhanced from 14 dB to 20 dB by joining a segment of 4 m Erbium-doped fiber.

Key words: Fiber laser; Stimulated Brillouin scattering; Stimulated Raman scattering; Multi-wavelength

OCIS Codes: 140.3460; 060.3510; 140.3550

0 引言

多波长光纤激光器在光通信、光传感和光测试仪器领域具有重要的研究前景和应用价值^[1-6]. 基于受激布里渊散射的多波长光纤激光器具有线宽窄、波长间隔稳定、波长数多、边模抑制比高等特点, 已得到广泛的关注^[7-9]. 但光纤介质中受激布里渊散射阈值较高,

为降低布里渊阈值增加波长数, 通常采用结合掺铒光纤放大器增益的布里渊掺铒光纤激光器 (Brillouin Erbium-doped Fiber Laser, BEFL) 或结合光纤喇曼放大器的布里渊喇曼光纤激光器 (Brillouin-Raman Fiber Laser, BRFL). 喇曼增益的增益带宽及光谱平坦度均优于掺铒光纤, 其非线性增益能有效的抑制模式竞争, 窄化线宽^[10-12], 并提高输出斯托克斯光数量. 此外, 相

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 60907020, 61007046, 61275080) 资助

第一作者: 许磊 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤激光器技术. Email: xuleicust@163.com

导师: 王天枢, (1975-) 博士, 教授, 主要研究方向为光纤激光器及空间激光通信技术. Email: wangts@cust.edu.cn

收稿日期: 2015-04-14; 录用日期: 2015-07-02

<http://www.photon.ac.cn>

较于布里渊-掺铒光纤激光器, BRFL 具有输出波长数多、平坦度高、阈值低等优点^[13-16].

2002 年 Kap-dong park 首次提出了 BRFL 的概念^[17], 采用色散补偿光纤 (Dispersion Compensation Fiber, DCF) 做非线性增益介质, 在 57.2 nm 的喇曼增益带宽内实现了单倍布里渊间隔的多波长激光输出. 2006 A. k Zamzuri 等研究了瑞利散射对输出特性的影响^[18], 构造了一种基于双反射镜的线性腔结构的 BRFL, 解决了多波长激光功率与带宽不均匀的问题, 证实了瑞利散射能提高产生斯托克斯光的波长数. 2013 年 Wu Han 等人设计了一种半开腔 BRFL^[19], 研究了 BP 功率对输出特性的影响, 得到 16.8 nm 范围内峰值功率平坦输出. 目前为止, 关于 BRFL 的报道多集中在其腔形的优化与输出特性的研究. 但光纤中的布里渊频移约为 10 GHz, 过窄的信道间隔为布里渊光纤激光器在波分复用系统中的应用带来了诸多困难, 通常为增加布里渊光纤激光器的信道间隔, “8”字形结构、环形器结构和耦合器结构被较多采用^[20-22], 而过多的光纤器件的引入增加了整个系统的插入损耗, 限制了多波长激光的输出波长数.

本文设计了一种全开腔结构, 降低了由多个器件造成的插入损耗. 获得最多输出波长 186 个, 可调谐范围 28.6 nm, 研究了 BP 波长对多波长输出个数的影响. 在输出端加入一段掺铒光纤 (Erbium-Doped Fiber, EDF) 做吸收体, 使输出多波长激光边模抑制比提高至 20 dB.

1 实验结构与工作原理

全开腔布里渊喇曼激光器结构如图 1 所示, C+L 波段可调谐的激光器作为布里渊泵浦 (Brillouin Pump, BP), 中心波长为 1 455 nm 的半导体激光器作为喇曼泵浦 (Raman Pump, RP), 7 km 色散补偿光纤同时作为布里渊增益介质和喇曼增益介质. BP 光入射到环形器的 1 端口再由环形器的 2 端口输出, 再经 1 455/1 550 nm WDM 入射到 DCF 中, BP 光在 DCF

中被喇曼放大, 达到受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) 阈值后激发出与 BP 方向相反的第一阶布里渊斯托克斯光 (Brillouin Stokes Light, BSL), 第一阶 BSL 在 DCF 中被喇曼放大同时激发出与第一阶传播方向相反的第二阶 BSL, 从而低阶 BSL 就作为高阶 BSL 的泵浦, 产生更高阶 BSL, 直到某阶 BSL 受限于喇曼放大效率, 达不到下阶 SBS 阈值时, SBS 效应停止. 受激布里渊散射与喇曼放大过程同时在 DCF 中产生, 从而 BP 光和偶数阶 BSL 经 DCF 右端输出, 奇数阶 BSL 经环形器端口 3 输出, 采用光谱分析仪 (OSA, AQ6370C, 分辨率 0.02 nm) 观测, 在 DCF 末端接入一段掺铒光纤 (EDF), 作为吸收体提高边模抑制比, EDF 右端接入 WDM, 分离 BSL 与剩余的泵浦光.

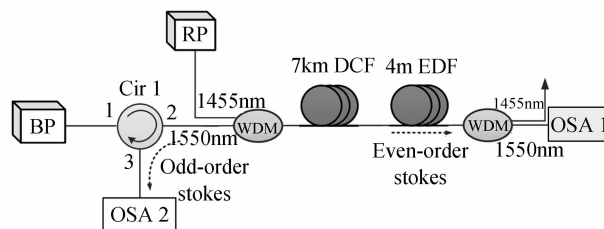


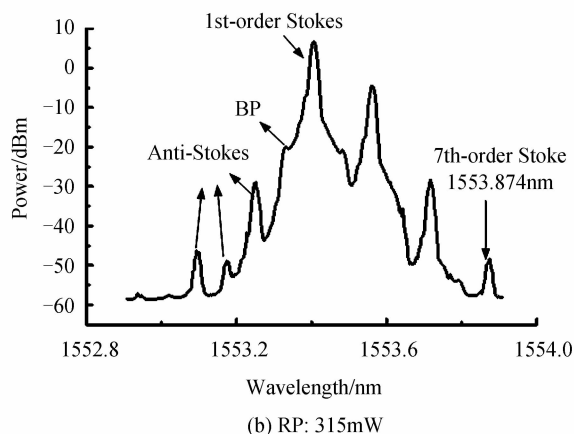
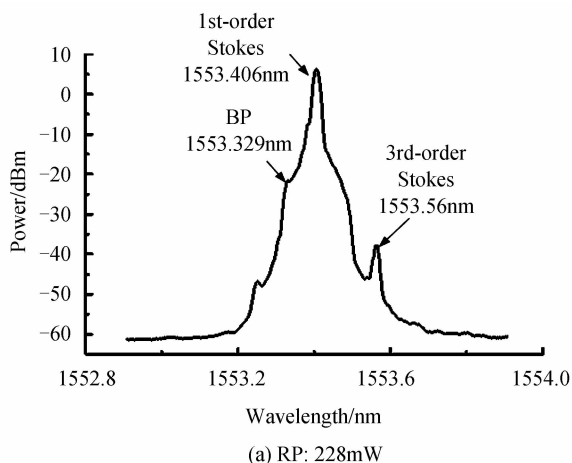
图 1 全开腔布里渊喇曼激光器结构原理图

Fig. 1 Schematic of all-opened Brillouin-Raman fiber laser

实验中, BP 采用 Tektronix 公司的可调谐半导体激光器 (OM2210), 其调谐范围为 1 527.6~1 608.7 nm, 最大输出功率 13.5 dBm, 线宽 100 kHz. RP 最大输出功率为 800 mW. DCF 在 1 550 nm 处模场直径为 5 μm , 衰减 0.55 dB/km, 色散系数和色散斜率分别为 -130 ps/nm \cdot km 和 -0.504 ps/nm² \cdot km.

2 结果与讨论

将 BP 波长固定在 1 553.329 nm, 功率为 7.9 dBm, RP 功率为 228 mW 时, BP 放大后达到第三阶受激布里渊散射阈值, 此时 OSA2 观测的输出光谱如图 2(a) 所示, BP 与第三阶 BSL (1 553.56 nm) 波长



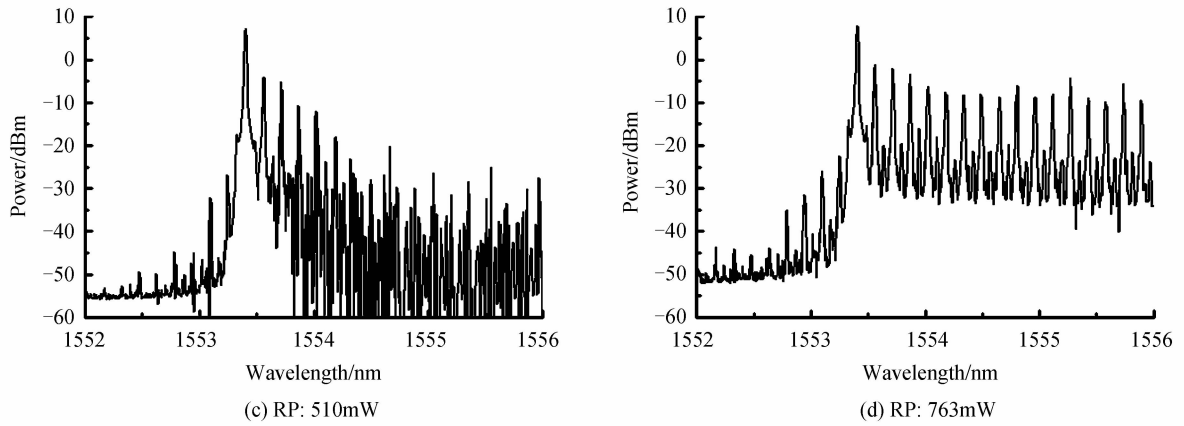


图2 RP功率对输出特性影响 BP:1553.329 nm,7.9 dBm

Fig.2 Output characteristics variations affected by RP power, BP: 1553.329 nm, 7.9 dBm

间隔为 0.231 nm, 对应 DCF 的三倍布里渊频移(约 29.1 GHz). 泵浦功率为 315 mW 时, 得到第 7 阶 BSL (1553.874 nm), 与 BP 波长间隔为 0.545 nm, 对应七倍布里渊频移. 随着 RP 功率提高, 由于同向传输的泵浦光与 BSL 之间的四波混频效应增强, 产生明显的反斯托克斯光, 如图 2(b) 所示. RP 功率为 510 mW 时, 被放大的 BLS 不足以克服自激模, BSL 与自激模相混合, 输出杂乱无章^[5], 如图 2(c) 所示. RP 功率为 763 mW 时, BP 功率增加, 克服了自激震荡, 得到稳定的多波长激光输出, 如图 2(d) 所示.

将 RP 功率固定在 800 mW, BP 功率固定在 7.9 dBm, 调节 BP 的注入波长, 图 3(a) 为 BP 波长在喇曼增益峰值(约 1553.3 nm)左侧 1545.7 nm 处时, 在 1545.8~1574.3 nm 范围内得到平坦的多波长激光光谱, 波长间隔为 0.154 nm, 输出波长数为 186 个. 图 3(b) 为 BP 波长在喇曼增益峰值处 1553.3 nm 时, 得到 1553.4~1574.3 nm(共 20.9 nm)长输出范围, 观测到 136 个输出波长, 斯托克斯光峰值功率趋于平稳. 图 3(c) 为 BP 波长在喇曼增益峰值和喇曼增益末端之间(1560.1 nm)处时得到的输出光谱, 增益范围为

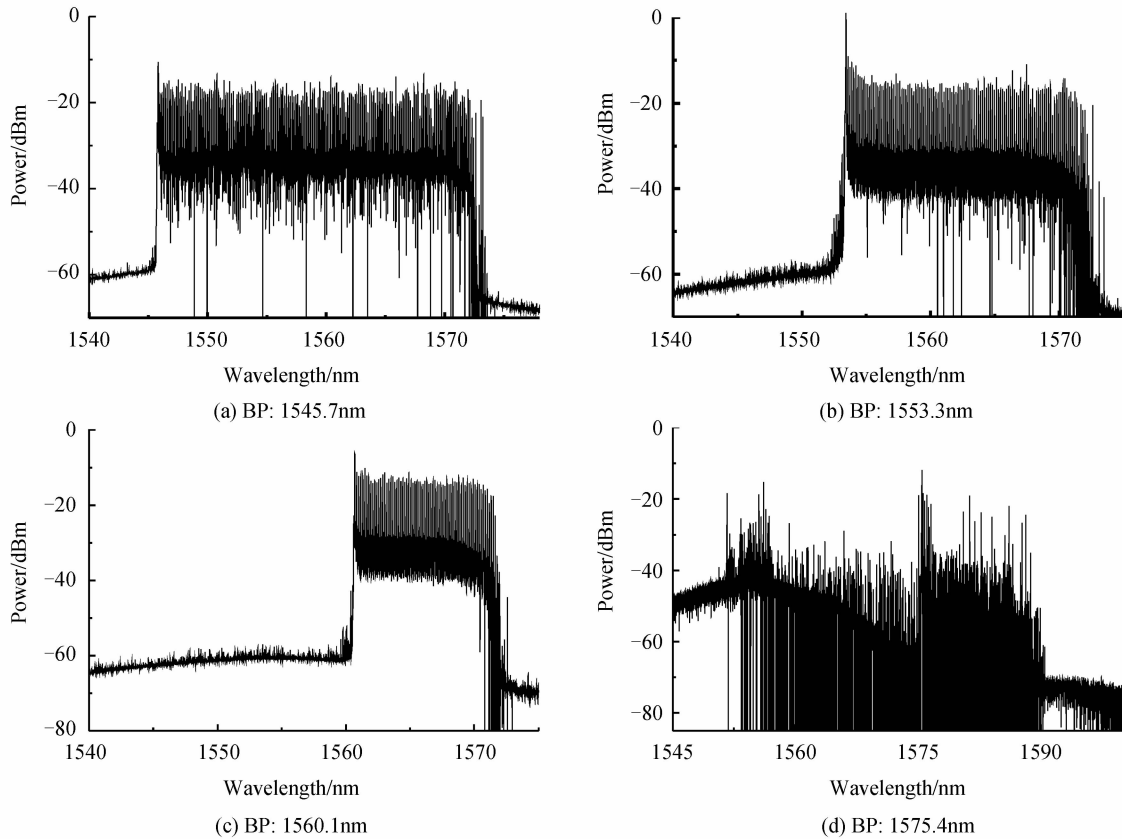


图3 BP波长对输出波长数影响, RP:800mW

Fig.3 Output channels variations affected by BP wavelength

1 560.1~1 574.3 nm(共 14.2 nm),输出波长数为 92 个. 斯托克斯光峰值功率基本平稳. 图 3(d)为 BP 波长在喇曼增益峰值右侧时(1 575.4 nm 处),BP 波长不在喇曼增益范围内,BP 和 BSL 不能被足够的放大,达不到 SBS 阈值,输出主要为自振荡模式. 在喇曼增益的范围内,BP 波长越短,得到的输出波长数越多,但输出的 BSL 稳定性较差.RP 功率为 800 mW 时对应的最大 BP 调谐范围为 28.6 nm,这是由喇曼增益谱的带宽与平坦度所决定,继续增加 RP 功率是增加调谐范围的一种有效方式.

图 4 为 RP 功率为 800 mW 时通过 OSA1 观测输出光谱,输出激光为 BP 光和偶数阶斯托克斯光的混合,波长间隔与奇数阶斯托克斯光相同,与背向观测不同,前向的反斯托克斯光峰值明显低于背向,这是由于反斯托克斯光在 DCF 中同样被喇曼放大,背向抽运的 DCF-喇曼放大器的放大效率高于正向且噪音指数低于正向^[23].

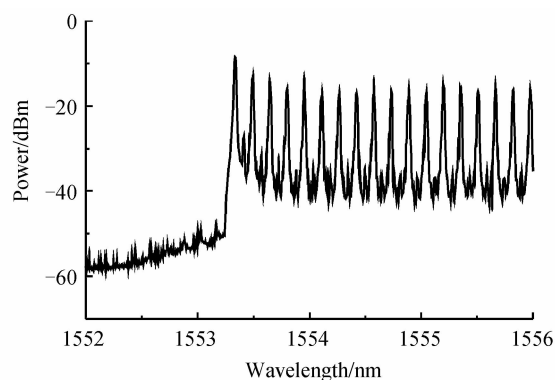
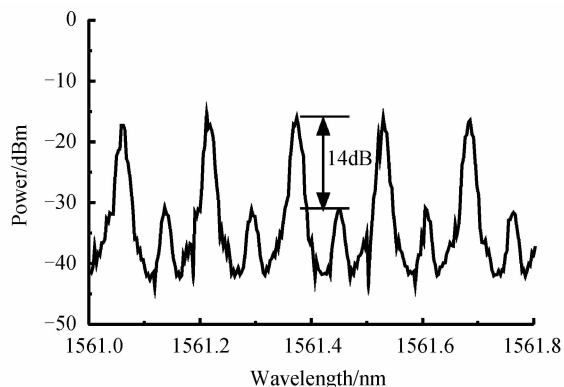


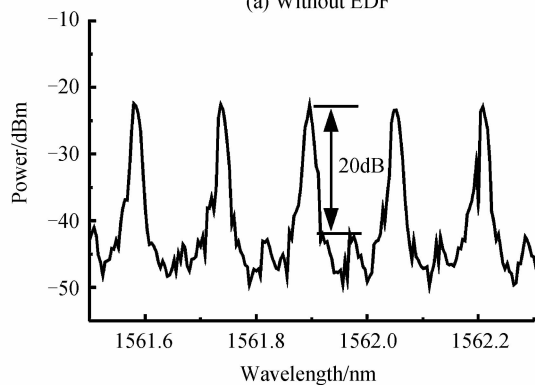
图 4 OSA1 观测输出光谱,RP:800 mW

Fig. 4 Output spectrum observed by OSA1, RP:800 mW

BSL 在 DCF 中经背向瑞利散射,窄化了激光线宽^[10],并可以提高斯托克斯光产生的数量^{[5][14]},但背向瑞利散射使 OSA1 端输出的偶数阶 BSL 中混入了功率较低的奇数阶 BSL,同时 OSA2 端输出的奇数阶 BSL 中混入了功率较低的偶数阶 BSL,从而限制了多波长激光的边模抑制比. EDF 在 C、L 波段吸收能力较强,采用 EDF 对瑞利散射产生的噪音光的吸收,可提高信号边模抑制比. 实验中输出端加入一段长 4 m 长 EDF,BP 波长在喇曼增益峰值处 1 553.3 nm,功率 7.9 dBm,RP 功率 800 mW. 加入 EDF 之前的通过 OSA1 观测的输出光谱如 5(a)所示,边模抑制比为 14 dB. 图 5(b)为加入 EDF 后的输出光谱,边模抑制比提高到 20 dB. 图 6 为加入 EDF 后,BP 波长在 1 553.3 nm 处的输出光谱,与未加 EDF 情况下获得的图 3(b)的结果对比,边模抑制比明显提高.



(a) Without EDF



(b) With EDF

图 5 加入 EDF 前、后边模抑制比变化,OSA1 观测
Fig. 5 Variation of side-mode suppression ratio by using EDF, observed by OSA1

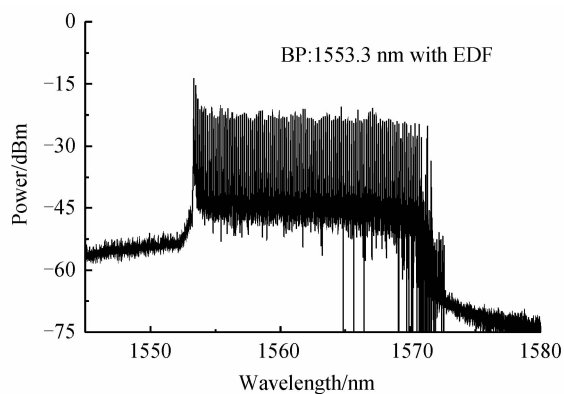


图 6 加入 EDF 后的光谱,OSA1 观测

Fig. 6 Output spectrum with EDF, observed by OSA1

3 结论

本文设计了一种结构简单的线性全开腔结构双倍间隔布里渊喇曼激光器,减少了器件插入损耗. 实验证明,为得到稳定的多波长激光,BP 波长必须在选取喇曼增益的范围内,当 RP 功率固定时,输出波长数随着 BP 波长的增加而减少,同时 BSL 的稳定性得到提高,BP 波长为 1 545.7 nm 时,获得输出波长数最多为 186

个,波长间隔为 0.154 nm, BP 可调谐范围 28.6 nm, 采用 EDF 吸收体优化后边模抑制比 20 dB.

参考文献

- [1] OH S H, PARK Y J, KIM S B, *et al.* Multiwavelength lasers for WDW-PON optical line terminal source by silica planar light wave circuit hybrid integration[J]. *Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(20): 1622~1624.
- [2] HAN Y G, TRAN T V A, KIM S H, *et al.* Multiwavelength Raman-fiber-laser-based long-distance remote sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(11): 1282~1284.
- [3] WANG Zi-nan, RAO Yun-jiang, WU Han, *et al.* Long-distance fiber-optic point-sensing systems based on random fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(16): 17695 ~ 17700.
- [4] WANG Zhao-ying, HU Zhi-yong, Bao Huan-min, *et al.* Tunable multiwavelength fiber laser based on semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 321-324.
王肇颖,胡志勇,包焕民,等.基于半导体光放大器的可调谐多波长光纤激光器[J].光子学报,2006,**35**(3): 321-324.
- [5] KUANG Fen, YE Zhi-qing. Self-seeded multiwavelength switchable Erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1460-1463.
匡芬,叶志清.自激发多波长可开关掺铒光纤激光器[J].光子学报,2012,**41**(12):1460-1463.
- [6] LI Jia-fang, FENG Ming, CHEN Sheng-ping, *et al.* 48 line linear cavity multiwavelength Er-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 485-488.
李家方,冯鸣,李亿钢,等.48-波长线形腔多波长掺铒光纤激光器[J].光子学报,2005,**34**(4):485-488.
- [7] ZAMZURI A K, MAHDI M A, M. I. AHMID A, *et al.* Flat amplitude Brillouin-Raman comb fiber laser in Rayleigh-scattering-enhanced linear cavity[J]. *Optics Express*, 2007, **15**: 3000~3005.
- [8] ZAMZURI A K, Al-Mansoori M H, SAMSURI N M, *et al.* Contribution of Rayleigh scattering on Brillouin comb line generation in Raman fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(18): 3506~3510.
- [9] PARK K D, RYU H, LEE W K, *et al.* Threshold features of a Brillouin Stokes comb generated in a distributed fiber Raman amplifier[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(15): 1311~1313.
- [10] SHARGH R S, AL-MANSOORI M H, ANAS S B A, *et al.* OSNR enhancement utilizing large effective area fiber in a multiwavelength Brillouin - Raman fiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2011, **8**(2): 139~143 .
- [11] SHARGH R S, AL-MANSOORI M H, ANAS S B A, *et al.* Improvement of comb lines quality employing double-pass architecture in Brillouin-Raman laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2011, **8**(11): 823~827.
- [12] COWLE G J, STEPANOY D Y . Multiple wavelength generation with Brillouin/Erbium fibre lasers[J]. *Photonics Technology Letters*, 1996, **8**(11): 1465~1467.
- [13] FOTIADI A A, KIYAN R V. Cooperative stimulated Brillouin and Rayleigh backscattering process in optical fiber [J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(23): 1805~1807.
- [14] PANG Meng, XIE Shang-ran, BAO Xiao-yi, *et al.* Rayleigh scattering-assisted narrow linewidth Brillouin lasing in cascaded fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(15): 3129 ~ 3131.
- [15] PANG Meng, BAO Xiao-yi, CHEN Liang, *et al.* Observation of narrow linewidth spikes in the coherent Brillouin random fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(11): 1866~1868.
- [16] MA Wan-zhuo, WANG Tian-shu, ZHANG Peng, *et al.* Output characteristics of bidirectional feedback Brillouin-Raman fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0306005.
马万卓,王天枢,张鹏,等.双向反馈布里渊-喇曼光纤激光器输出特性[J].光子学报,2015,**44**(3):0306005.
- [17] PARK K D, MIN B, KIM P, *et al.* Dynamics of cascaded Brillouin-Rayleigh scattering in a distributed fiber Raman amplifier[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(3): 155~157.
- [18] ZAMZURI A K, MDALI M I, AHMAD A, *et al.* Brillouin-Raman comb fiber laser with cooperative Rayleigh scattering in a linear cavity[J]. *Optics Letters*, 2006, **37**(7): 918 ~ 920.
- [19] WU Han, WANG Zi-nang, JIA Xin-hong, *et al.* Flat amplitude multiwavelength Brillouin - Raman random fiber laser with a half-open cavity[J]. *Applied Physics B*, 2013, **112**(4): 467~471.
- [20] ZHANG Peng, JIA Qing-song, WANG Tian-shu, *et al.* Tunable multi-wavelength Brillouin Er-doped fiber laser with 0.173 nm spacing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 0614002.
张鹏,贾青松,王天枢,等.间隔 0.173nm 的可调谐多波长布里渊掺铒光纤激光器[J].光子学报,2014,**43**(6):0614002.
- [21] SHEE Y G, Al-MANSOORI M H, ISMAIL A, *et al.* Multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with double-Brillouin-frequency spacing [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(3): 1699-1706.
- [22] CAO Ye, JI Zhi-hua, ZHAO Jun-fa, *et al.* Widely tunable multi-wavelength Brillouin fiber laser with double Brillouin frequency spacings[J]. *Journal of Optoelectronics Lasers*, 2013, **24**(10): 1868-1872. .
曹晔,冀志华,赵军发,等.宽带可调谐双频移多波长布里渊光纤激光器[J].光电子激光,2013,**24**(10):1868-1872.
- [23] GENG Dan, ZHANG Zai-xuan, LI Lai-xiao. Experimental research of dispersion compensation distributed fiber Raman amplifier[J]. *Optoelectronic Technology and Information*, 2005, **18**(1): 30-33.
耿丹,张在宣,李来晓.色散补偿型光纤喇曼放大器的增益和噪声指数的实验研究[J].光电子技术与信息,2005,**18**(1): 30-33.