

doi:10.3788/gzxb20154403.0306005

双向反馈布里渊-喇曼光纤激光器输出特性

马万卓^{1,2}, 王天枢^{1,3}, 张鹏¹, 赵春英^{1,3}, 张靓^{1,3}, 刘鑫³, 孔梅³, 姜会林^{1,2}

(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 光电工程学院, 长春 130022)

(3 长春理工大学 理学院, 长春 130022)

摘 要:设计了一种双向反馈布里渊-喇曼光纤激光器,研究了布里渊泵浦对输出特性的影响.布里渊-喇曼光纤激光器由一段 7 km 色散补偿光纤、1 455 nm 喇曼泵浦、可调谐激光器及双反馈环组成.喇曼泵浦功率固定在 250 mW,布里渊泵浦工作波段在喇曼峰值增益处附近,可得到较多波长数输出.随着布里渊泵浦功率增加,相邻的布里渊斯托克斯光和经背向瑞利散射的斯托克斯光之间功率差减小,同时各阶斯托克斯光平均强度增加并达到饱和.受色散补偿光纤中喇曼交叉增益影响,布里渊泵浦功率由 1.8 dBm 增加到 6.9 dBm,输出多波长数先增后减.当布里渊泵浦功率为 4.4 dBm 时,对应输出波长数最多,为 37 个,波长间隔 0.078 nm.

关键词: 受激布里渊散射;受激喇曼散射;瑞利散射;色散补偿光纤;反馈环

中图分类号:TN248

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0306005-5

Output Characteristics of Bidirectional Feedback Brillouin-Raman Fiber Laser

MA Wan-zhuo^{1,2}, WANG Tian-shu^{1,3}, ZHANG Peng¹, ZHAO Chun-ying^{1,3}, ZHANG Jing^{1,3},
LIU Xin³, KONG Mei³, JIANG Hui-lin^{1,2}

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

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

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

Abstract: The output characteristic of a new-designed bidirectional feedback Brillouin-Raman fiber with Brillouin pump variation was studied. The Brillouin-Raman fiber laser consists of a segment of 7 km long dispersion compensating fiber, 1455 nm Raman pump, tunable laser and double feedback loops. The BP wavelength must be closer to Raman peak gain to obtain more Stokes lines when RP is fixed at 250 mW. The power difference between the neighbouring Brillouin components and Rayleigh components was reduced by enhancing the BP power, the average intensity of Stokes lines was improved to the saturation value, simultaneously. Affected by the cross-gain in DCF, firstly the number of output lasing lines increase and then decrease when the BP power was adjusted from 1.8 dBm to 6.9 dBm. Maximum 37 output channels was obtained when BP power fixed at 4.4 dBm, the channel spacing is 0.078 nm.

Key words: Stimulated Brillouin scattering; Stimulated Raman scattering; Rayleigh scattering; Dispersion compensation fiber; Feedback loop

OCIS Codes: 060.3510; 140.3460; 060.3510; 140.3550

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

第一作者:马万卓(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤激光器技术. Email: wanzhuoma@126.com

导师:王天枢(1975-),男,教授,博士,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:2014-09-05;录用日期:2014-11-10

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

0 引言

多波长光纤激光器在密集波分复用、光通信系统、分布式光纤传感、微波光子学等领域具有很好的应用前景. 在众多实现多波长激光的方法中, 受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) 与非线性增益介质相结合可有效抑制模式竞争并窄化多波长激光线宽. 在布里渊光纤激光器中通常选取一段长度较长的单模光纤作为布里渊增益介质, 但造成腔内功率大量损耗, 一般采用掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 解决这一问题^[1-3], 因而对多波长激光的稳定性提出了更高的要求. 阈值、波长数、平坦度与稳定性是衡量布里渊光纤激光器的重要参数. 2002年, Park 等首次采用色散补偿光纤 (Dispersion Compensation Fiber, DCF) 同时作为布里渊增益介质和喇曼增益介质, 采用窄线宽可调谐激光器作为布里渊泵浦 (Brillouin Pump, BP), 1 450 nm 和 1 480 nm 的半导体激光器作为喇曼泵浦 (Raman Pump, RP), 在 57.2 nm 增益带宽内得到较为平坦, 低阈值, 波长间隔为 0.078 nm 的多波长激光^[4]. 相对于布里渊-铒光纤激光器, 布里渊-喇曼光纤激光器 (Brillouin-Raman Fiber Laser, BRFL) 的工作原理较为复杂, BRFL 是基于受激布里渊散射、受激喇曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS) 和瑞利散射共同作用所产生, 因而对 BRFL 增益特性的研究受到广泛关注. Park 等研究了 BRFL 的阈值特性^[5], A. K. Zamzuri 等研究了 BRFL 中多波长激光信噪比变化特性^[6] 及瑞利散射对输出特性的影响^[7]. 其腔型和结构的优化也取得了进展, A. K. Zamzuri 等构造了一种基于双反射镜的线性腔 BRFL, 有效地解决了文献[4]中多波长激光相邻斯托克斯光之间功率与带宽不均匀现象^[8]. Wang 等构造了一种半开腔 BRFL, 在线性腔一端接入一段提供瑞利反馈的 50 km 单模光纤, 瑞利散射对输出光谱起重塑作用且窄化激光线宽, 采用大功率喇曼泵浦使输出波长数达 500 以上^[9]. 此外, 多种结构的 20 GHz 间隔 BRFL 也已经有文献报道^[10-12]. 可见, 如何优化多波长激光光谱平坦度, 消除由瑞利散射造成的线宽不均匀现象, 及实现更低 SBS 阈值等一直是 BRFL 优化过程中的主要挑战.

本文设计了一种基于双向反馈的线性腔 BRFL. 实验中, 将 RP 功率固定在最大输出功率 250 mW, 主要研究 BP 参数改变对输出特性的影响, BP 工作波段在喇曼峰值增益附近处, 得到斯托克斯光个数较多. 斯托克斯光足以克服腔内自激振荡模后, 通过增加 BP 功率, 输出波长数呈先增后减趋势, 相邻的布里渊与瑞利功率差减小, 且奇数和偶数阶斯托克斯光功率逐渐增加并分别达到饱和.

1 实验结构与工作原理

布里渊-喇曼光纤激光器结构如图 1, 最大输出功率为 14.5 dBm 的可调谐激光器作为 BP, 调谐范围 1 527~1 607 nm, 线宽约 100 kHz, 由环行器 1 的 1 端口入射, 经 2 端口输出后依次经过 80/20 耦合器 (Optical Coupler, OC) 的 20% 端口及 1 455/1 550 nm 波分复用器 (Wavelength Division Multiplexer, WDM) 注入一段色散补偿光纤 (YOF C DCF G. 652 C/250). 1455 nm 喇曼泵浦最大输出功率为 250 mW, 通过 WDM 进入 DCF, DCF 在 1 550 nm 处模场直径为 5 μm , 衰减为 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. OC 的 80% 端口和 DCF 另一端分别连接环行器 2 和环行器 3 构成的两个反射环, 双向反馈布里渊斯托克斯信号 (Brillouin Stokes Lines, BSL), OC 的 20% 端口连接环行器 1 的端口 2, 并通过端口 3 输出. 考虑到环行器、WDM、OC 的 20% 端口插入损耗分别为 0.6 dB、0.1 dB、6.9 dB, 实际入射到 DCF 中的最大 BP 功率为 6.9 dBm, 经环行器 2 反馈的 BSL 再次入射到 DCF 时的功率损耗为 3.4 dB.

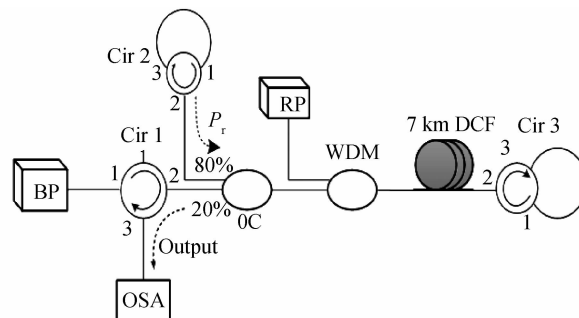


图 1 双向反馈布里渊-喇曼光纤激光器结构

Fig. 1 Experimental setup for bidirectional feedback BRFL

DCF 同时作为布里渊增益介质与喇曼增益介质, BP 光在 DCF 中被喇曼放大并达到 SBS 阈值, 激发与 BP 光传播方向相反的第一阶 BSL, 第一阶 BSL 在 DCF 中被喇曼放大, 并作为二次泵浦激发出与 BP 光传播方向相同的第二阶 BSL, 第二阶 BSL 再次被放大, 此级联效应一直持续到某一阶被放大的 BSL 低于下一阶 SBS 阈值为止.

在连续光泵浦的 SRS 过程中, 考虑到泵浦光沿非线性光纤的传输损耗及泵浦光和斯托克斯光之间的非线性作用, 喇曼增益可用两个耦合方程描述为^[13]

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_P I_s - \alpha_s I_s \quad (1)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R I_P I_s - \alpha_p I_p \quad (2)$$

式中 I_s 为斯托克斯光强, I_p 为泵浦光强, g_R 为喇曼增益系数, ω_s 和 ω_p 分别为斯托克斯光和泵浦光频率, α_s

和 α_p 分别为斯托克斯频率和泵浦频率处的光纤损耗. 由式(1)、(2)知,在一定的 RP 条件下,优化增益光纤长度可增加斯托克斯光强与光纤内斯托克斯光损耗差值,有效提高喇曼增益,图 2 是 RP 功率为最大输出功率 250 mW 时不同长度 DCF 的喇曼增益谱,DCF 长度为 7 km 时对应最高的喇曼增益谱,因此 DCF 长度优化为 7 km.

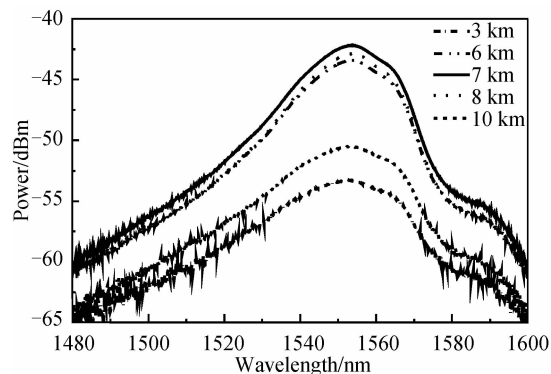
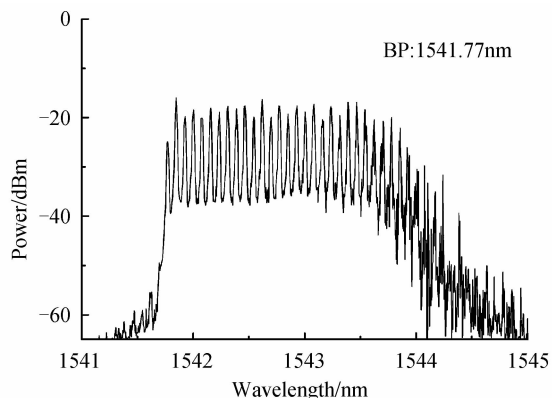


图 2 RP 功率 250 mW 时不同 DCF 长度的喇曼增益谱
Fig. 2 Raman gain spectrum with different length of DCF at 250 mW RP power

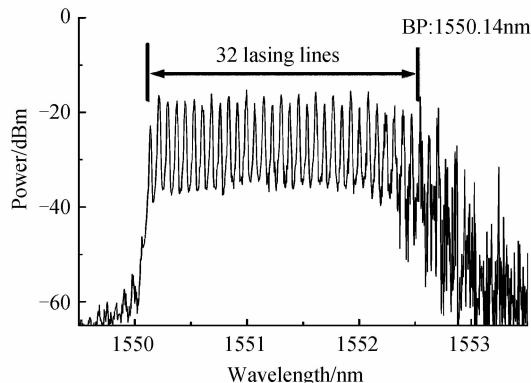
2 结果与讨论

将 RP 固定在最大输出功率 250mW, BP 功率固定在 2.9 dBm, 调节 BP 工作波长, 输出光谱主要表现为波长数的变化, 图 3(a)、(b) 是 BP 在 1 541.77 nm、1 550.14 nm 处多波长激光的输出光谱, 分别对应输出波长数为 27、32. 大范围调谐 BP 工作波长, BP 工作波长与输出波长数关系如图 3(c) 所示, BP 在 1535.26 nm 处时, 得到 9 个波长输出, BP 调节到 1 539.10 nm, 输出波长数增至 23 个; BP 在 1 548~1 558 nm 范围内时对应较高的喇曼增益, 输出波长数持续在 30 个以上, 波长间隔为 0.078 nm, BP 在 1 550.14 nm 处(即略短于 1 553.32 nm 增益峰值)得到充分放大, 输出波长数为 32 个. 由图 2 可知喇曼增益谱在 1 535~1 575 nm 范围内光谱平坦度为 4.7 dB, 因此喇曼放大器对在增益带宽范围内不同波段的信号光放大效率也存在差异, 信号光在喇曼峰值 1 553.32 nm 附近具有较高放大效率, BP 和各阶 BSL 在 DCF 中被喇曼放大同时持续激发出下一阶 BSL, 当某一阶 BSL 受限于对应波段处的喇曼放大效率, 该阶被放大的 BSL 未达到布里渊阈值, 级联 SBS 效应终止, 波长数不再增加. 实验证明, RP 参数固定, 将 BP 波段选取在略短于喇曼峰值处, 是在低功率 RP 条件下实现更多波长输出的一种有效方法.

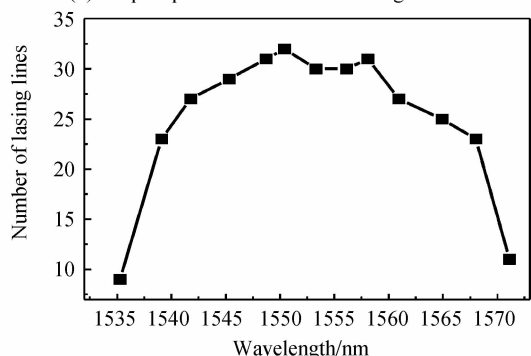
将 BP 固定在喇曼增益峰值 1 553.32 nm 处, 采用光谱分析仪(OSA, APEX AP2441B, 分辨率 0.04 pm) 观测 BP 功率对输出波长数的影响. 图 4(a) 为 BP 功率为 1 dBm 时输出光谱, 由于环形器 2 和环形器 3 的双



(a) Output spectrum with BP wavelength of 1541.77nm



(b) Output spectrum with BP wavelength of 1550.14nm



(c) Relation between number of Stokes lines and BP wavelength

图 3 BP 波长对输出特性影响

向反馈, 线性腔内存在杂乱的自激振荡, 信号光功率较小, 被放大的 BSL 不足以克服自激模, 输出光谱为斯托克斯光与自激模的混合. BP 功率为 1.8 dBm 时光谱如图 4(b), BP 功率增加抑制了自激模, 得到的 BSL 数量为 9, BP 功率增加至 4.4 dBm, 输出波长数为 37 个, 如图 4(c). BP 功率为 6.9 dBm 时, 输出波长数减少至 25 个, 如图 4(d). 由于各阶斯托克斯光在 DCF 中存在喇曼交叉增益^[14-15], 在未达到增益饱和情况下, BP 功率增加, 各阶 BSL 功率增加, 导致更高阶 BSL 放大效率降低, 输出波长数减少. 总之, 随着 BP 功率增加, 输出波长数先增后减, 如图 5. 因此, 在 RP 参数和 BP 波长固定的 BRFL 系统中, 波长数受被放大的 BSL 功率

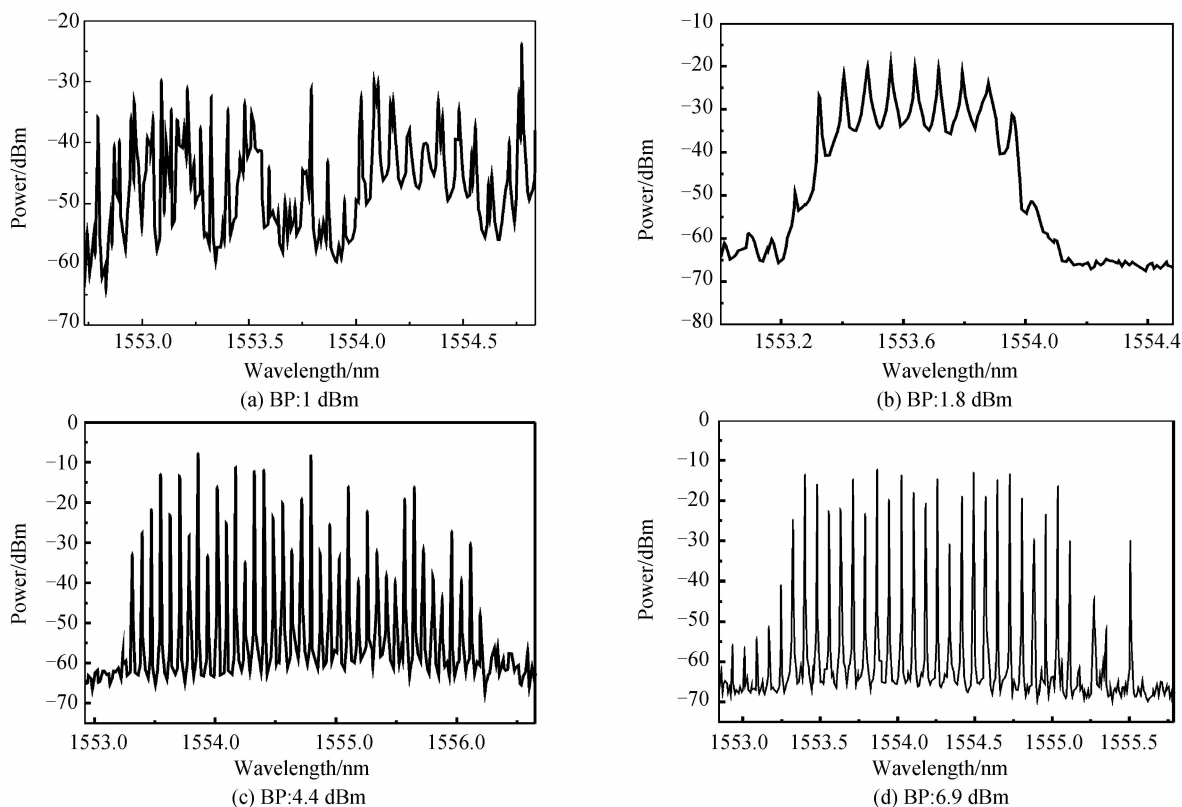


图 4 不同 BP 功率下的输出光谱
Fig. 4 Output spectrum with different BP power

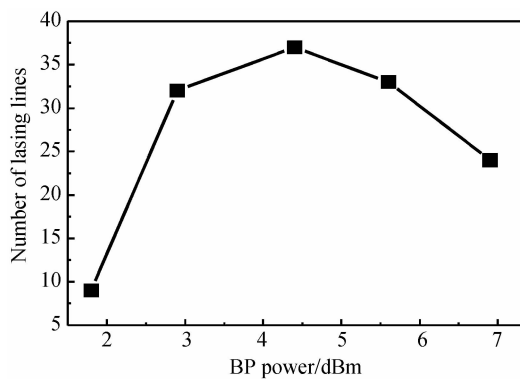


图 5 BP 功率与输出波长数关系

Fig. 5 Relation between BP power and wavelength number and喇曼交叉增益共同影响,选取合适的 BP 功率,可有效增加输出波长数.

图 6(a)是 BP 功率为 4.4 dBm 时部分斯托克斯光,相邻 BSL 间呈现高低交替出现的光谱形态,其中功率较高的为与 BP 方向相反的奇数阶 BSL,功率较低的为与 BP 方向相同的偶数阶 BSL 与 BP 光,背向瑞利散射减弱了偶数阶斯托克斯光的光强^[4]. BP 功率从 2.9 dBm 到最大输出功率 6.9 dBm 逐渐调谐过程中,由于 BP 作为初始信号光功率增加,导致被激发的各阶 BSL 功率增加,奇数阶 BSL 功率增加并在 BP 功率为 4.6 dBm 时达到饱和,在 4.6 dBm 到 6.9 dBm 范围内功率略有下降;偶数阶 BSL 的背向瑞利散射效应随 BP

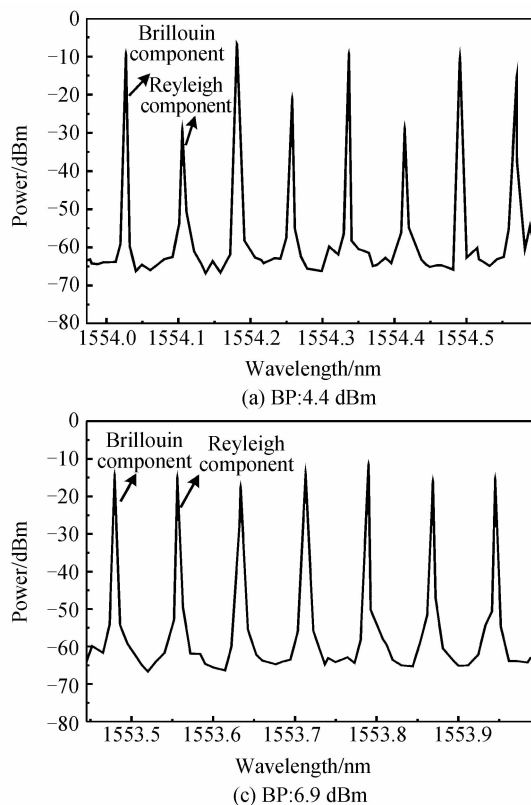


图 6 BP 功率分别为 4.4 dBm,6.9 dBm 时部分斯托克斯光
Fig. 6 Part of Stokes lines at BP power 4.4 dBm,6.9 dBm, respectively

功率增加而基本呈线性趋势增强,在BP为5.6 dBm时偶数阶BSL达到饱和.随着BP功率增加,布里渊部分与瑞利部分间平均强度差减小,如图7所示,BP功率为6.9 dBm时平均强度差仅为0.2 dB,总平均强度呈线性增加并在BP高于5.6 dBm后趋于饱和.背向瑞利散射对输出光谱的另一个影响是窄化BSL线宽,在无反馈结构中,布里渊斯托克斯光线宽明显宽于经背向瑞利散射的斯托克斯光^[4-5],图6(a)、(b)中各阶BSL线宽并无明显差异,这是由于部分未经瑞利散射的偶数阶BSL通过反馈环3反馈后经环形器1输出,很大程度减弱了瑞利部分与布里渊部分线宽分布不均匀的现象.因此,增加BP功率使BSL达到增益饱和是实现功率、线宽均衡的一种有效方法,但波长数会受到限制.

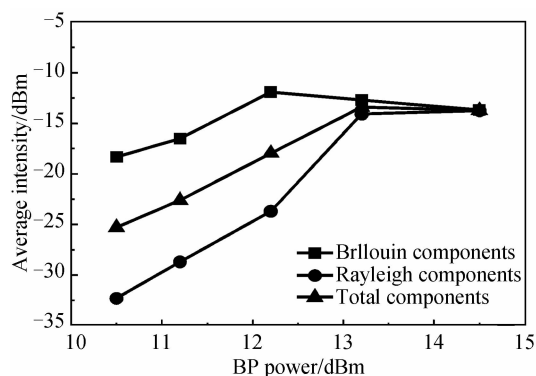


图7 奇数阶BSL与偶数阶BSL平均强度随BP功率变化关系

Fig.7 Variations of odd-order BSL and even-order BSL average intensity with BP power enhancing

3 结论

实验研究了在双向反馈布里渊-喇曼光纤激光器中布里渊泵浦对多波长激光输出特性的影响,BP必须工作在喇曼峰值增益附近以得到较多波长输出,BP功率在1.8 dBm以上,自激振荡受到抑制,BP功率从1.8 dBm增加至6.9 dBm,输出波长数先增后减,同时奇数阶托克斯光与偶数阶斯托克斯光的平均强度增加,奇、偶数阶斯托克斯光分别在BP功率为4.6 dBm、5.6 dBm时达到饱和,两部分强度差减小.分析结果可为优化线性腔BRFL输出特性提供参考.

参考文献

[1] ZHANG Peng, JIA Qing-song, WANG Tian-shu, *et al.* Tunable multi-wavelength Brillouin Er-doped fiber laser with 0.173nm 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.

[2] ZHAO Jun-fa, YANG Xiu-feng, LIU Zhuo-lin, *et al.* Multiwavelength Brillouin/Erbium fiber source with 40nm tuning range [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(10): 2482-2486. 赵军发,杨秀峰,刘卓琳,等.调谐范围40nm的多波长布里渊/铒光纤光源[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10):2482-2486.

[3] LIU Yi, YU Jin-long, WANG Hong-jie, *et al.* Tunable multiwavelength Brillouin-Erbium fiber laser based on feedback fiber loop [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(2): 0202003. 刘毅,于晋龙,王红杰,等.基于反馈光纤环的可调谐多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2014, **41**(2):0202003.

[4] 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.

[5] 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.

[6] ZAMZURI A K, MAHDI M A, AL-MANSOORI M H, *et al.* OSNR variation of multiple laser lines in Brillouin-Raman fiber laser [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(19):16904-16910.

[7] 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.

[8] ZAMZURI A K, MAHDI M A, AHMAD A, *et al.* Flat amplitude multiwavelength Brillouin-Raman comb fiber laser in Rayleigh-scattering-enhanced linear cavity [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(6):300-3005.

[9] WANG Zi-nang, HAN Wu, FAN Meng-qiu, *et al.* Broadband flat-amplitude multiwavelength Brillouin-Raman fiber laser with spectral reshaping by Rayleigh scattering [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(24):29358-29364.

[10] MAMDOOHI G, SARMANI A R, ABAS A F, *et al.* 20GHz spacing multi-wavelength generation of Brillouin-Raman fiber laser in a hybrid linear cavity [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(16):18724-18732.

[11] HAMBALI N, AL-MANSOORI M H, AJIVA M, *et al.* Multi-wavelength Brillouin-Raman ring-cavity fiber laser with 22-GHz spacing [J]. *Laser Physics*, 2011, **21**(9):1656-1660.

[12] AHMAD H, ZULKIFLI M Z, HASSAN N A, *et al.* S-band multiwavelength ring Brillouin/Raman fiber laser with 20GHz channel spacing [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(11):1811-1815.

[13] GOVIND P A. Nonlinear fiber optics [M]. JIA Dong-fang, YU Hong-zhen, transl. 4rd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2010:205-207. GOVIND P A. 非线性光纤光学[M]. 贾东方,余震虹,译. 4版.北京:电子工业出版社,2010:205-207.

[14] KEANG P H. Statistical properties of stimulated Raman crosstalk in WDM systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, **18**(7):915-921.

[15] MENIF M, KARASEK M, RUSCH L A. Cross-gain modulation in Raman fiber amplifier experimentation and modeling [J]. *Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(9):1261-1263.