

间隔 0.256 nm 的多波长布里渊光纤激光器的实验研究

樊冰,葛超群,周雪芳,李曾阳,周豫
(杭州电子科技大学通信工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要:使用一个四端口环行器和两个三端口环形器,设计了一种波长间隔为 0.256 nm 的多波长布里渊掺铒光纤激光器。该激光器中使用的两个三端口环行器组成的环腔产生一阶 Stokes 光,四端口环行器组成的环腔产生与入射进腔内的 BP 光相隔双倍布里渊频移的 Stokes 光。实验测试得到:当 BP 为 3 dBm、980 nm 泵浦功率为 27.78 dBm 时,可得到波长间隔为 0.256 nm 的 6 个波长的激光输出,同时也讨论了 Stokes 光的数量与 BP 光功率和 980 nm 泵浦光功率之间的变化关系。

关键词:多波长光纤激光器;可调谐;三倍布里渊频移;受激布里渊散射

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.11.009

Experimental research on the multi-wavelength Brillouin Er-doped fiber laser with 0.256 nm spacing

FAN Bing, GE Chao-qun, ZHOU Xue-fang, Li Zeng-yang, ZHOU Yu
(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 31008, China)

Abstract: A tunable multi-wavelength Brillouin erbium fiber laser (MWBEFL) with 0.256 nm spacing based on a four-port circulator and two three-port circulators was experimentally proposed. The fiber laser configuration formed by two ring cavities. One cavity consisting of two three-port circulators generated 1st Stokes, and the other cavity consisting of a four-port circulator produced a double Brillouin frequency spacing Stokes signal separated from the injected BP light. The experimental results show that: when BP is 3 dBm and 980 nm pump power is 27.78 dBm, 6 output channels with 0.256 nm spacing can be obtained. And the relationship between the number of the Stokes signal and BP power and the 980 nm pump power is discussed.

Key words: multi-wavelength fiber laser; tunable; triple-Brillouin frequency spacing; stimulated Brillouin Scattering

1 引言

多波长布里渊激光器(MWBL)具有抽运功率低、效率高、容易实现、容易与光纤耦合等优点,被广泛用于光通信器件、微波光子学、精密光学和 DWDM 系统等领域中^[1-3]。Cowle 等在 1996 年就提出利用布里渊效应来进行 MWBL 的研究^[4],在此基础上,多波长布里渊掺铒光纤激光器(MWBEFL)得到了广泛的研究和发展^[5-10],多种不同结构和不

同调谐范围的 MWBEFL 被提出。如文献[3]提出了使用四端口环行器及可调谐滤波器间隔为双倍布里渊频移的可调谐 MWBEFL 结构,实现了波长间隔为 0.173 nm 的多波长输出;文献[11]提出了一种将有源掺铒光纤放大器至于无源振荡腔外的短腔结构,得到了 7 阶波长间隔为 0.088 nm 的激光信号。文献[12]报道了一种具有可调谐特性的半开放腔多波长随机光纤激光器,利用单模光纤和环形结构

基金项目:浙江省公益技术应用研究计划项目(No. 2017C31067);校研究生核心课程项目(No. HXK2016018)资助。

作者简介:樊冰(1979-),女,工学硕士,讲师,主要研究方向为实验室建设管理。E-mail:fanbing@hdu.edu.cn

通讯作者:葛超群(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤激光器。

收稿日期:2018-02-12;**修订日期:**2018-06-08

组成半开放腔结构,通过改变布里渊抽运激光波长实现输出随机激光的可调谐性,多波长激光信号间隔 0.088 nm。文献[13]设计了一种基于环形腔的双倍布里渊频移间隔的可调谐光纤激光器,多波长激光信号相邻间隔为 20 GHz(0.16 nm)。

为进一步提高多波长光纤激光器的波长间隔,本文设计了一种基于四端口环行器和三端口环行器组成的三倍布里渊频移的可调谐多波长布里渊光纤激光器结构。该结构中使用两个三端口环行器构成的环形腔 1 产生一阶 Stokes 光,一个四端口环行器构成环形腔 2,在环形腔 2 中可产生与入射的 BP 光相隔两倍 Brillouin 频移的 Stokes 光,从而得到波长间隔为三倍 Brillouin 频移即 0.256 nm 的多波长激光信号输出。

2 实验结构与工作原理

三倍布里渊频移的 MWBEFL 的实验结构如图 1 所示,由两个环形腔组成,环形腔 1 能产生单倍布里渊频移激光信号,环形腔 2 能产生双倍布里渊频移激光信号输出。两个腔内都设计了一段 10 m 长的 EDF 来提供线性增益以补偿腔内损耗,一段 25 km 长的 SMF 来提供非线性增益。WDM 用于耦合 980 nm 泵浦激光和 BP 光进 EDF 中。腔 1 中的环行器 2 作为一个环形镜,将剩余的 BP 光反射回腔内。环行器 1 和环行器 3 用于控制信号光的传输方向。BP 信号后端设置了一个前置放大是为了抑制自激振荡模式。

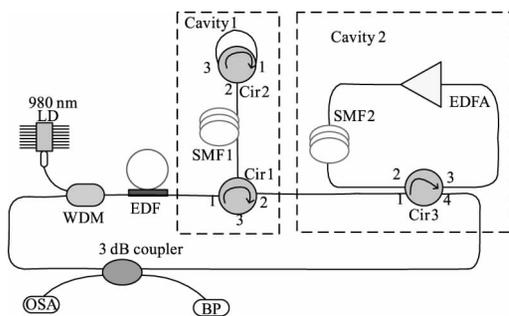


图 1 三倍频移的 MWBEFL 结构

Fig. 1 Triple frequency-shifted MWBEFL structure

经放大后的 BP 光通过环行器 1 的端口 1 至端口 2 进入 SMF1 中,当 BP 功率超过 SMF 的布里渊阈值后则产生与 BP 光方向相反的一阶斯托克斯光 BS1, BS1 与 BP 光相比频率下移大约 10 GHz,即相隔单倍布里渊频移。BS1 经环行器 1 的端口 2 至端口 3 传输至 Cir3 的 1 端口,接着沿着端口 2 顺时针方向进入

Cavity 2 中,此时 BS1 功率超过 SMF 的布里渊阈值,则产生逆时针方向的二阶斯托克斯光 BS2(BS2 相对于 BS1 是单倍频布里渊频移),BS2 通过 Cir3 的 3 端口进入 EDFA 放大后再次进入 SMF2,若放大后的 BS2 功率超过布里渊阈值,则会产生顺时针方向的三阶斯托克斯光 BS3,由于 BS1 在 Cavity 2 中经过两次受激布里渊散射后产生 BS3,所以 BS3 相对于 BS1 是双倍布里渊频移,而相对于最初的 BP 光是三倍布里渊频移。BS3 传输至 Cir3 的 4 端口进入 3dB 耦合器,一部分在 OSA 中显示,一部分进入 Cavity 1 作为泵浦光重复上面的过程,直至两个环腔内的总增益小于腔内的总损耗时,高阶的斯托克斯光不能产生。

3 实验结果与讨论

从图 1 可以看出,三倍频移的激光器由一个单倍频移腔和一个双倍频移腔构成,实验测试中首先分析了两个独立腔的输出特性。

第一步未接入 Cavity 2 即作为单倍布里渊频移激光器,将 Cir1 的端口 3 直接连到 3 dB 耦合器的输入端。实验测试中固定 BP 光,其功率和波长为 3 dBm 和 1560 nm,980 nm 泵浦光功率的扫描范围为 0~27.78 dBm。实验发现当 980 nm 泵浦功率到达 15.1 dBm 时,可观察到 BS1,相对于 BP 光有 0.086 nm 频移。继续增大 980 nm 泵浦功率,BS1 光峰值功率增大,同时产生更高阶的 Stokes 光,结果如图 2 所示,共得到了 15 阶单倍频移 Stokes 光,波长范围为 1560.4725~1561.7625 nm,其峰值功率稳定在 -5.394 dBm。

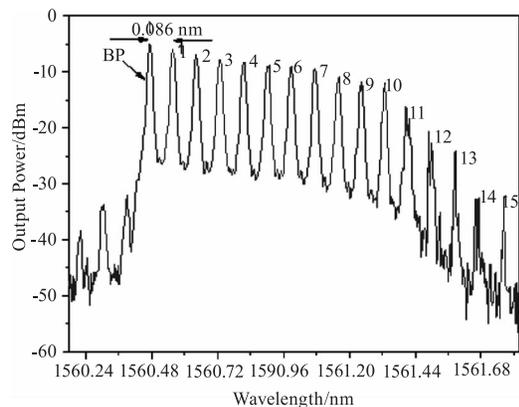


图 2 未接入 Cavity 2,固定 980 nm 泵浦功率为 27.78 dBm 时 Cavity 1 的输出光谱

Fig. 2 Output spectrum of Cavity 1 when Cavity 2 is not connected and the fixed 980 nm pump power is 27.78 dBm

第二步研究双倍频移的环腔 2 输出特性。未接入 Cavity 1,将 Cir3 的 1 端口接到 EDFA 的输出端。同样

设定 BP 功率为 3 dBm,扫描 980 nm 的泵浦光功率,实验过程中发现当 980 nm 泵浦功率为 10 dBm 产生一阶 Stokes 光,与 BP 波长间隔为 0.164 nm,即双倍布里渊频移。继续增大 980 nm 泵浦光功率,当达到 18.75 dBm 时,有最多阶(17 阶)Stokes 光输出,如图 3 所示。其波长范围从 1560.4692 ~ 1563.3962 nm,峰值功率为 -1.901 dBm。

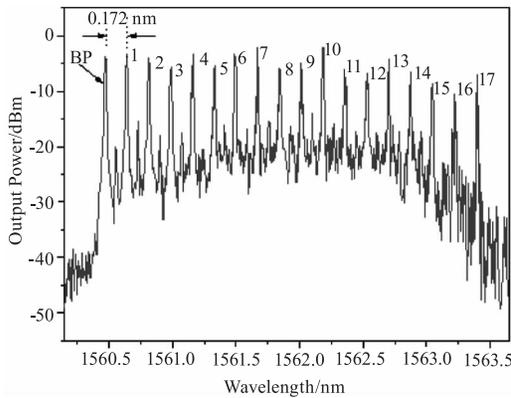


图 3 未接入 Cavity 1,固定 980nm 泵浦功率为 18.75dBm 时 Cavity 2 的输出光谱

Fig. 3 Output spectrum of Cavity 2 when Cavity 1 is not connected and the fixed 980 nm pump power is 18.75 dBm

第三步研究三倍布里渊频移激光器,即将 Cavity1 和 Cavity2 同时接入,如图 1 所示。实验测试得到在 BP 为 3 dBm,980 nm 泵浦功率为 27.78 dBm,有 6 阶三倍 Stokes 光输出,如图 4 所示。图中 BP 的波长为 1560.4200 nm,得到的三倍频 Stokes 光波长依次为 1560.677 nm,1560.931 nm,1561.189 nm,1561.441 nm,1561.703 nm,1561.962 nm,1562.227 nm,其波长间隔约为 0.256 nm。

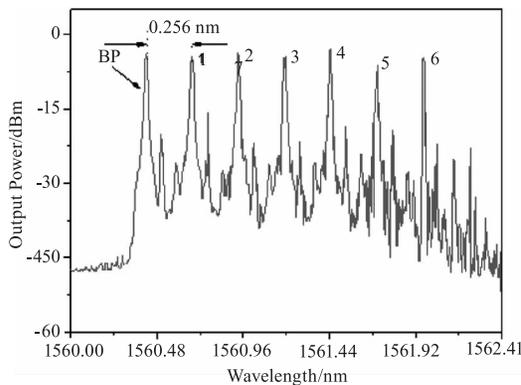


图 4 固定 980nm 泵浦功率为 27.78dBm 时的输出光谱

Fig. 4 Output spectrum with a fixed 980 nm pump power of 27.78 dBm

对比图 2、图 3 和图 4 可以看出,在 BP 功率一定的情况下,三倍布里渊频移的 MWL 需要更高的

980 nm 泵浦光功率来得到一个最高 Stokes 阶数。980 nm 泵浦功率为 27.78 dBm,BP 功率为 3 dBm 时,单倍频移、双倍频移、三倍频移的 MWL 输出光谱如图 5 所示。

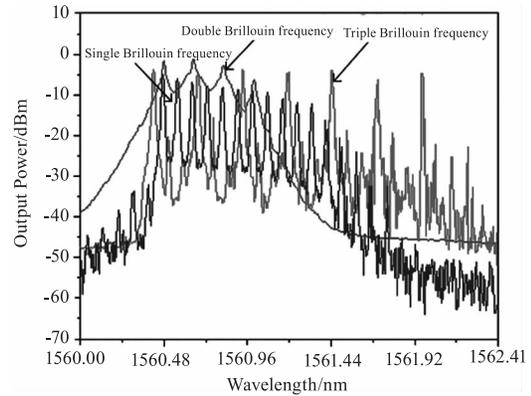
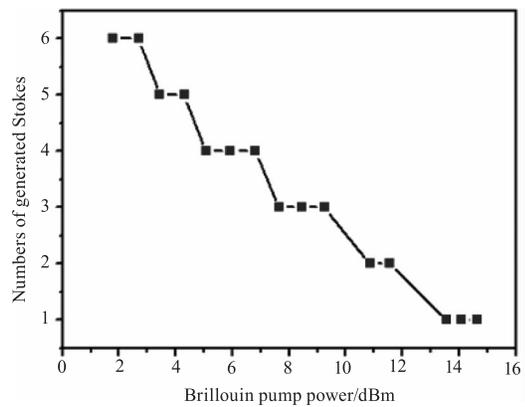


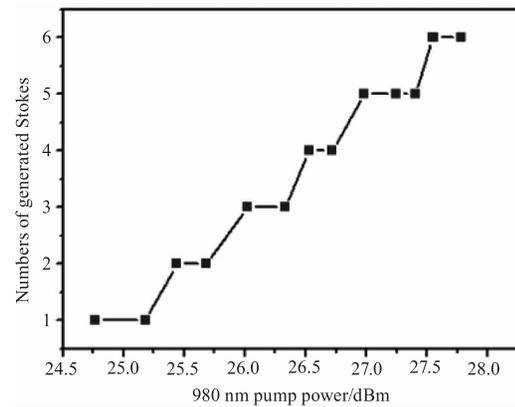
图 5 980nm 泵浦功率 27.78 dBm,BP 功率 3 dBm 时的输出光谱

Fig. 5 Output spectrum with 980 nm pump power of 27.78 dBm and BP power of 3 dBm

实验测试中发现 BP 功率和 980 nm 泵浦光功率均影响斯托克斯光个数,结果如图 6 所示。从图 6 可知,输出的阶数主要是由增益介质决定,在本实验中,激光腔中的线性增益和非线性增益。图 6(a) 讨论的



(a) 不同 BP 功率



(b) 不同 98nm 泵浦功率

图 6 不同 BP 功率和 980 nm 泵浦功率对斯托克斯光个数的影响

Fig. 6 Effect of different BP power and 980nm pump power on the number of Stokes light

是在 980 nm 光功率为 27.78 dBm 时, BP 功率与输出的 Stokes 光个数之间的变化关系, BP 功率在 $-0.56 \sim 14.65$ dBm 间变化。从图 6(a) 中可以看出: 当 BP 功率增大时, 输出的 Stokes 光个数却逐渐减少。因为 BP 功率太大时会使 EDFA 工作在深度饱和区, 即 EDFA 的增益降低了, 从而导致输出的 Stokes 光阶数减少。图 6(b) 讨论的是 BP 功率 3 dBm 时, 980 nm 泵浦功率与输出的 Stokes 光之间的变化关系。980 nm 泵浦功率在 24.77 ~ 27.78 dBm 间变化, 当 980 nm 泵浦功率增大时, 输出的 Stokes 光个数却在逐渐增加, 这是由于 EDFA 增益扩大导致了高的腔内循环功率, 提高了布里渊增益效率。

3 结 论

基于单倍布里渊频移和双倍布里渊频移的两个环腔设计了一个波长间隔为 0.256 nm 的多波长布里渊掺铒光纤激光器, 设计中有效利用 EDFA 增益来抑制自激发振荡模的影响。实验结果表明: 当 BP 功率为 3 dBm, 980 nm 泵浦光功率为 27.78 dBm 时, 实现激光间隔为 0.256 nm 即 30 GHz 的 6 个波长输出。该激光器具有结构简单, 实现方便等优点。若在此激光器的结构中设置滤波器, 则可实现 $30n$ GHz ($n = 1, 2, \dots, 6$) 的双波长光信号输出, 通过高频 PD 拍频得到高频的微波信号。

参考文献:

- [1] ZOU Hui, XIONG Hui, ZHENG Yaru. Tunable self-Seeded multiwavelength Brillouin erbium-Doped fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 13 - 18. (in Chinese)
邹辉, 熊慧, 郑亚如. 可调谐多波长自激布里渊掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 13 - 18.
- [2] ZHANG Peng, JIA Qingsong, WANG Tianshu, et al. Tunable multi-wavelength Brillouin Er-doped fiber laser with 0.173 nm spacing [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(6): 32 - 35. (in Chinese)
张鹏, 贾青松, 王天枢, 等. 间隔 0.173 nm 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): 32 - 35.
- [3] ZHANG ZuXin, DAI GuoXing, KUANG Qingqiang et al. Spacing-adjustable multiwavelength fiber laser based on stimulated Brillouin scattering [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(5): 815 - 819. (in Chinese)
张祖兴, 戴国星, 况庆强, 等. 基于受激布里渊散射的波长间隔可变多波长光纤激光器[J]. 光子学报, 2010, 39(5): 815 - 819.
- [4] G J Cowle, D Y Stepanov. Multiple wavelength generation with Brillouin/erbium fiber lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(11): 1465 - 1467.
- [5] M H Al-Mansoori, M A Mahdi. Multi-wavelength L-band Brillouin erbium comb fiber laser utilizing nonlinear amplifying loop mirror [J]. Journal of Light Wave Technology, 2009, 27(22): 5038 - 5044.
- [6] KUANG Fen, YE Zhiqing. Self-seeded multi-wavelength switchable erbium-doped fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(12): 1460 - 1463. (in Chinese)
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.
- [7] MIAO Xuefeng, WANG Tianshu, ZHOU Xuefang, et al. A tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 44 - 47. (in Chinese)
缪雪峰, 王天枢, 周雪芳, 等. 一种可调谐的多波长布里渊掺铒光纤激光器 [J]. 中国激光, 2012, 39(6): 44 - 47.
- [8] Song Y J, Zhan L, Ji J H, et al. Self-seeded Multi-wavelength Brillouin erbium fiber laser [J]. Optical Letter, 2005, 30(5): 486 - 488.
- [9] Harun S W, Cheng X S, Saat N K, et al. S-band Brillouin erbium fiber laser [J]. Electronics Letters, 2005, 41(4): 174 - 176.
- [10] SUN Hong, WEI Kaihua, QIAN Kai et al. Gain switched all-fiberized pulse Yb fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 43 - 47. (in Chinese)
孙宏, 魏凯华, 钱凯, 等. 一种基于增益调制技术的全光纤化脉冲 Yb 光纤激光器 [J]. 光子学报, 2013, 42(1): 43 - 47.
- [11] XIAO Pingping, DENG Manlan, HU Hongwu. Multiwavelength and single longitudinal mode Brillouin fiber lasers based on passive cavities [J]. Laser Technology, 2016, 40(5): 727 - 729. (in Chinese)
肖平平, 邓满兰, 胡红武. 基于无源腔多波长单模布里渊光纤激光器 [J]. 激光技术, 2016, 40(5): 727 - 729.
- [12] HUANG Changqing, LIU Mengshi, CHE Tengyun, et al. A tunable multi-wavelength random fiber laser based on half-open cavity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 1 - 6. (in Chinese)
黄昌清, 刘梦诗, 车腾云, 等. 基于半开放腔的可调谐多波长随机光纤激光器研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(3): 1 - 6.
- [13] ZHOU Xuefang, HU Kongwen, WEI Yizhen. Multiwavelength Brillouin fiber laser with wavelength spacing of 20 GHz [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(8): 963 - 966. (in Chinese)
周雪芳, 胡孔文, 魏一振. 波长间隔为 20 GHz 的多波长布里渊光纤激光器 [J]. 激光与红外, 2016, 46(8): 963 - 966.