

doi: 10.3788/gzxb20144306.0614002

# 间隔 0.173 nm 的可调谐多波长布里渊掺铒 光纤激光器

张鹏<sup>1,2</sup>, 贾青松<sup>2</sup>, 王天枢<sup>1,2</sup>, 姜会林<sup>1,2</sup>

(1 长春理工大学 教育部光电探测与光电信息传输重点实验室, 长春 130022)

(2 长春理工大学 空间光电技术研究所, 长春 130022)

**摘 要:** 使用四端口环行器和可调谐滤波器, 设计了一种间隔为双倍布里渊频移的多波长布里渊掺铒光纤激光器. 该光纤激光器中使用的四端口环形器可以限制奇次阶斯托克斯光在腔内循环并耦合输出初始泵浦光和偶次阶斯托克斯光, 而可调滤波器抑制环形腔所形成的自激振荡模, 增加了激发多波长激光的功率, 从而增加多波长输出个数及其调谐范围. 在布里渊泵浦功率为 8 dBm、980 nm 泵浦功率为 279 mW 时, 实验获得波长间隔为 0.173 nm 的 6 个波长的激光输出, 输出激光的可调谐范围为 28 nm.

**关键词:** 光纤激光器; 受激布里渊散射; 多波长; 双倍布里渊频移; 可调谐

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0614002-4

## Tunable Multi-wavelength Brillouin Er-doped Fiber Laser with 0.173 nm Spacing

ZHANG Peng, JIA Qing-song, WANG Tian-shu, JIANG Hui-lin

(1 Key Laboratory of Education Ministry Optoelectronics Measurement & Control and Optical Information Transfer Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Institute of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A tunable multiwavelength Brillouin/erbium fiber laser with double-Brillouin-frequency spacing based on a four-port circulator was experimentally demonstrated. The fiber laser configuration formed by four-port circulator isolates the odd-order Brillouin Stokes signal to circulate within the cavity only. In addition, it also allows propagation of the incoming Brillouin pump and even-order Stokes signals from four-port circulator to output coupler. A fiber Fabry-Perot tunable filter was used to manipulate the location of self-lasing cavity and to increase power for multiwavelength oscillation. It can be obtained that a wideband tuning range and more output channels. At the Brillouin pump power of 8 dBm and the 980 nm pump power of 279 mW, 6 output channels with 0.173 nm spacing and tuning range of 28 nm from 1535 nm to 1563 nm were achieved.

**Key words:** Fiber laser; Stimulated Brillouin scattering; Multi-wavelength; Double-Brillouin-frequency spaced; Tunable

**OCIS Codes:** 060.3510; 230.1150; 290.5900

## 0 引言

多波长光纤激光器因具有效率高、阈值低、窄线宽、紧凑小巧、与传输光纤兼容性好等优点, 在高准确度光谱分析、光传感技术、光器件检测、微波光子学等

诸多技术领域中具有潜在的应用前景<sup>[1,2]</sup>.

多波长布里渊激光器如只利用增益较低的布里渊增益, 则激光器将输出较少的波长数. 为此 COWLE G J 等<sup>[3]</sup>提出利用非线性布里渊增益及掺铒光纤线性增益来实现室温下多波长布里渊激光器, 在此基础上, 多

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60907020)资助

第一作者: 张鹏(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为空间光通信及光纤激光器. Email: zhangpeng@cust.edu.cn

收稿日期: 2013-10-12; 录用日期: 2013-12-18

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

波长布里渊激光器在不同结构、不同波长,增加个数及调谐范围方面得到广泛的研究和发展<sup>[4-8]</sup>.

传统多波长布里渊激光器经常使用标准单模光纤(Single Mode Fiber, SMF),所以其斯托克斯频移间隔约为 10 GHz. 为增加激光器输出的频移间隔, PARVIZI R 等<sup>[9]</sup>使用基于 3 dB 耦合器的 8 字型结构,结构中仅使用了 100 m 光子晶体光纤作为增益介质,实现了 3 个波长间隔为双倍布里渊频移的多波长输出,调谐范围为 80 nm(1 520~1 600 nm). 为了增加腔内增益从而提高多波长输出个数,张诚等<sup>[10]</sup>在 8 字环形腔结构中加入掺铒光纤线性增益,实现了间隔为 0.16 nm 的 6 个波长输出,调谐范围为 10 nm(1 555~1 565 nm). SHEE Y G 等<sup>[11]</sup>提出了基于四端口环形器的 8 字型结构,实现了间隔为 0.174 nm 的 10 个波长输出,可调谐范围为 8 nm(1 556~1 564 nm). LI Jun 等<sup>[12]</sup>利用类似 8 字型结构实现了间隔为 0.16 nm 的 12 个波长输出,可调谐范围为 7 nm(1 557.1~1 565.1 nm). 但掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)抽运功率的提高使得腔内自激振荡模与斯托克斯信号模式竞争加剧,会导致调谐范围降低,即调谐范围局限在 1 560 nm 附近. 为了增加激光器的调谐范围, J. F. Zhao, C. Zhang 等<sup>[13-14]</sup>通过改变结构及加入可调谐滤波器等方法实现了间隔为 0.16 nm 的 5 个波长输出,其中 5 个波长输出的调谐范围为 55 nm,多波长输出的调谐范围为 110 nm.

为了进一步提高多波长光纤激光器的波长输出数及其调谐范围,本文设计了一种基于四端口环形器及可调谐滤波器间隔为双倍布里渊频移的可调谐多波长布里渊光纤激光器结构. 该结构利用四端口环形器形成 8 字型环形腔,使奇数阶斯托克斯信号被限制,偶数阶斯托克斯信号耦合输出. 同时利用可调谐滤波器与初始布里渊泵浦光源信号匹配可以抑制腔内所形成的自激振荡模,从而实现间隔为双倍布里渊频移的多波长输出.

## 1 实验结构与工作原理

间隔为双倍布里渊频移的可调谐多波长布里渊掺铒光纤激光器实验结构如图 1. 该光纤激光器包括作为线性增益的掺铒光纤(Erbium-Doped optical Fiber, EDF)及 980 nm 泵浦源,作为非线性增益的 10 km 标准单模光纤(Single Mode Fiber, SMF),一个四端口环形器(Circulator, CIR),一个  $1 \times 2$  的 90%/10% 耦合器(Coupler<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>),一个  $1 \times 2$  的 3 dB 耦合器(Coupler<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>),一个可调谐滤波器. 四端口环形器一对输入/输出端接可调谐滤波器和 SMF,另一对输入/输出端接 EDF 和 C<sub>2</sub> 形成 8 字形腔结构. EDFA 由最大抽运功率为 400 mW 的 980 nm 抽运源、980/1550 nm 波分复用器

(Wavelength Division Multiplexing, WDM)和一段 6 m 长的 EDF 组成. 结构中使用可调谐激光器(Tektronix OM2210)作为布里渊泵浦光源(Brillouin Pump, BP),该激光器具有 78 nm(1 527~1 605 nm)的可调谐范围,所使用的可调谐滤波器(Fiber Fabry-Perot Tunable Filter, FFP-TF)可抑制自激振荡模,其调谐范围为 80 nm(1 510~1 590 nm),其 3 dB 带宽为 1.04 nm.

当 BP 信号通过耦合器 2 进入 8 字形腔的左侧环内,经过 EDFA 放大后从四端口环形器端口 1 至端口 2 进入可调谐滤波器和 10 km SMF,当 BP 信号的功率大于布里渊阈值后产生逆时针方向的第一阶斯托克斯光,第一阶斯托克斯光返回端口 2 并经端口 3 进入 SMF 产生顺时针方向的第二阶斯托克斯光,第二阶斯托克斯光进入端口 3 并经端口 4 进入 8 字形腔的左侧环内,并重复 BP 信号的路径. 这种情况下,四端口环形器将限制奇数阶斯托克斯光在 8 字形腔的右侧环内,而允许初始 BP 光和偶数阶斯托克斯光从端口 1 到端口 4 顺次通过. 通过的光一部分经耦合器 1 部分输出,另一部分循环经过 EDFA 放大进入四端口环形器作为激发下一阶泵浦光,如此循环,当新激发的斯托克斯光不能满足布里渊阈值时,循环结束. 这样就产生了间隔为 0.173 nm 的多波长激光器. 激光器的输出端采用光复谱分析仪(APEX, AP2441B)来观测得到的多波长信号.

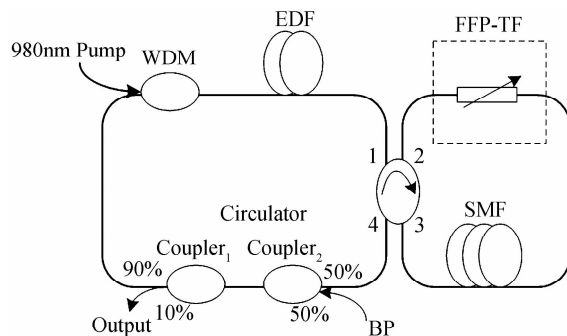


图 1 多波长布里渊激光器结构

Fig. 1 Configuration of multi-wavelength Brillouin fiber laser

## 2 实验结果与讨论

在未加入可调谐滤波器情况下,实验中增加 EDFA 的功率时,该激光器在 1 560 nm 附近容易出现自激振荡模,如图 2,自激模的存在严重影响波长输出数和调谐范围<sup>[10]</sup>,EDFA 的线性增益都被钳制在 1 560 nm,要实现多波长输出 BP 信号只能在 1 560 nm 附近的小范围内,调谐范围受到很大限制. 为了有效限制自激振荡模,在环形腔内加入可调谐滤波器,实验过程中跟随 BP 信号波长一起变化,使腔内振荡集中在滤波器透过谱期间内,增加激光器调谐范围. 可调谐滤波器透过图谱如图 3.

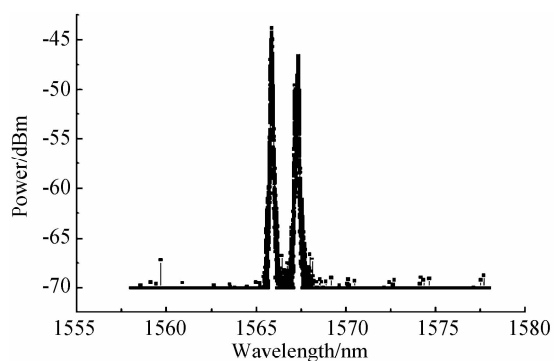


图2 没有可调谐滤波器下在 1560nm 处自激发振荡模  
Fig. 2 Self-lasing cavity modes at 1560nm without FFP-TF

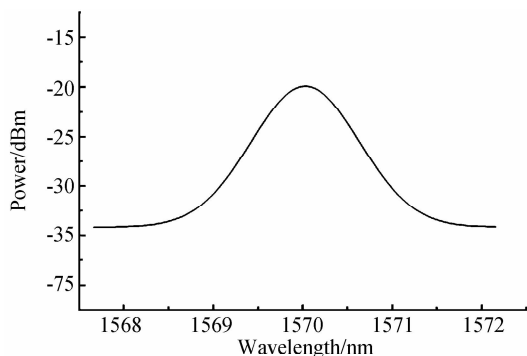


图3 可调谐滤波器在 1570 nm 透过图谱  
Fig. 3 Transmission spectrum of FFP-TF at 1570 nm

BP 功率为 8 dBm, 波长为 1546.5 nm, 980 nm 泵浦功率 279 mW 时, 输出端观测到的多波长光谱如图 4. 图中第一阶斯托克斯光和 BP 波长对比, 得到波长间隔为 0.173 nm. 由图 4 可知实现了 6 个波长输出. 由于可调谐滤波器的 3 dB 滤波范围不理想, 且滤波形状为高斯形, 所以限制了多波长的个数, 其最大值为 6 个, 与此同时输出的 6 个波长功率值受滤波形状影响, 呈现如图 4 所示的形状.

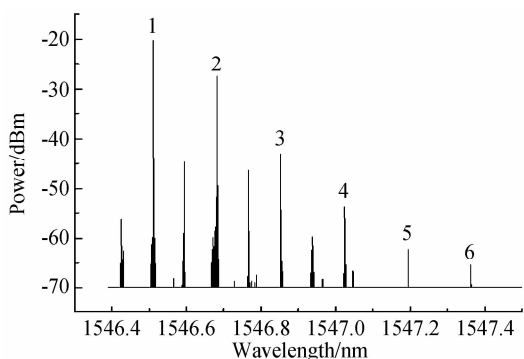


图4 光纤激光器的输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of generated fiber laser

当 980 nm 泵浦光功率为 279 mW, BP 信号光功率为 8 dBm 时, 可调谐范围为 1535~1563 nm, 其中多波长输出的个数为 6 个, 见图 5. 通过改变 BP 波长从 1527 到 1607 nm. C 波段范围(1527~1565 nm)激光器输出的个数能达到 5 个, 而当 BP 信号光波长大于

1565 nm 时, 多波长个数迅速减少直到没有. 这是由于所使用 EDFA 在 C 波段有较高的增益能够使斯托克斯光克服腔内损耗达到布里渊阈值而激发下一阶光. 另外所使用的无源器件多为 C 波段器件, 器件在其他波段损耗有所增加, 使得光纤激光器在其他波段无多波长输出.

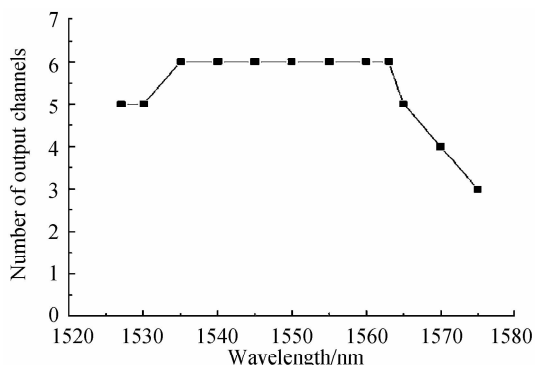


图5 光纤激光器的可调谐范围

Fig. 5 Tuning range spectrum of generated fiber laser

### 3 结论

设计了基于四端口环行器及可调谐滤波器的多波长布里渊光纤激光器, 减少了自激发振荡模的影响, 有效利用 EDFA 增益, 增加了多波长输出的个数和调谐范围. 实验结果表明, 当 BP 功率为 8 dBm, 980 nm 泵浦功率 279 mW 时, 实现激光间隔为 0.173 nm 的 6 个波长输出, 其调谐范围为 28 nm(1535~1563nm). 大于 3 个波长输出的调谐范围为 48 nm(1527~1575 nm).

#### 参考文献

- [1] SUN Hong, WEI Kai-hua, QIAN Kai, *et al.* Gain switched all-fiberized pulse Yb fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1):43-47.  
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.
- [2] ZHANG Zu-xing, DAI Guo-xing, KUANG Qing-qiang, *et al.* Spacing-adjustable multiwavelength fiber laser Based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Acta Photonica Sinica* 2010, **39**(5), 815-819  
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.
- [3] COWLE G J, STEPANOV D Y. Hybrid Brillouin/erbium fiber laser [J]. *Optical Letter*, 1996, **21**(16):1250-1252.
- [4] SONG Y J, ZHAN L, JI J H, *et al.* Self-seeded multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Optical Letter*, 2005, **30**(5):486-488.
- [5] HARUN S W, CHENG X S, SAAT N K, *et al.* S-band Brillouin erbium fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 2005, **41**(4):174-176.
- [6] AL-MANSOORI M H, MAHDI M A. Multiwavelength L-Band Brillouin - Erbium comb fiber laser utilizing nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Journal of Light Wave Technology*, 2009, **27**(22):5038-5044.
- [7] KUANG Fen, YE Zhi-qing. Self-seeded multi-wavelength 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.
- [8] MIAO Xue-feng, WANG Tian-shu, ZHOU Xue-fang, *et al.* Multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(6):0602010.  
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): 0602010-1-0602010-4.
- [9] PARVIZI R, AROF H, Ali N M, *et al.* 0.16nm spaced multi-wavelength Brillouin fiber laser in a figure-of-eight configuration [J]. *Optics&Laser Technology*, 2011, **43**(4): 866-869.
- [10] ZHANG Cheng, MIAO Chang-yun, TONG Zheng-rong, *et al.* Tunable multiwavelength Brillouin/Erbium fiber laser with double-Brillouin-shift spacing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(11): 1102005.  
张诚,苗长云,赵军发,等. 间隔双倍频移的可调谐多波长布里渊/铒光纤激光器[J], 中国激光, 2012, **39**(11):1102005.
- [11] SHEE Y G, AI-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.
- [12] LI Jun, CHEN Tao, SUN Jun-qiang, *et al.* Double-Brillouin-frequency spaced multiwavelength generation in a ring Brillouin-Erbium fiber laser [J], *Chinese Physics Letters*, 2013, **30**(2):024205.
- [13] ZHAO J F, LIAO T Q, ZHANG C, *et al.* Double-Brillouin-Frequency Spaced multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with 50nm tuning range [J], *Laser Physics*, 2012, **22**(9):1415-1418.
- [14] ZHAO J F, ZHANG C, MIAO C Y, *et al.* A widely tunable double-Brillouin frequency spaced multiwavelength fiber laser with a 110 nm tuning range [J], *Laser Physics*, 2013, **23**(6):065101.