

# 可调谐多倍布里渊频移间隔多波长 光纤激光器

邓宇翔, 张祖兴

南京邮电大学电子与光学工程学院先进光子技术实验室, 江苏 南京 210023

**摘要** 实验研究了波长间隔为双倍和三倍布里渊频移的多波长布里渊掺铒光纤激光器,通过改变布里渊抽运波长实现了多波长激光器的调谐。实验得到了波长间隔为双倍布里渊频移即 0.17 nm 的 8 个布里渊多波长激光产生,输出波长可以在 110 nm(1528~1638 nm)范围内调谐;还得到了波长间隔为三倍布里渊频移即 0.26 nm 的 5 个布里渊多波长激光产生,输出波长可以在 60 nm 范围(1535~1595 nm)内调谐。另外,实验还发现布里渊抽运激光波长在激光器自激发振荡波长范围内时,产生的布里渊波长数达到最大值。该研究在密集波分复用光纤通信系统、微波光子学、光纤传感、光谱测量等领域具有重要的应用前景。

**关键词** 激光器;受激布里渊散射;多波长光纤激光器;可调谐激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0501005

## Multiwavelength Fiber Lasers with Tunable Multiple Brillouin Frequency Shift Interval

Deng Yuxiang, Zhang Zuxing

*College of Electronic and Optical Engineering, Advanced Photonic Technology Laboratory,  
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China*

**Abstract** Multiwavelength Brillouin erbium-doped fiber lasers with wavelength spacing of double and triple Brillouin frequency shifts are reported, and the multiwavelength tunable lasers are realized through changing the Brillouin pump wavelength. The experimental results show that eight Brillouin wavelengths with wavelength spacing 0.17 nm of double Brillouin frequency shifts are generated, and the wavelength can be tuned in a range of 110 nm (1528-1638 nm). Meanwhile, five Brillouin wavelengths with wavelength spacing 0.26 nm of triple Brillouin frequency shifts are obtained, and the wavelength can be tuned in a range of 60 nm (1535-1595 nm). Additionally, the experimental results also indicate that the Brillouin wavelength number can reach the maximum when the wavelength of the Brillouin pump laser is in the range of the self-excited oscillation. This tunable multiwavelength Brillouin fiber laser with multiple Brillouin frequency shift interval has important applications in many fields, including dense wavelength division multiplex optical fiber communication system, microwave signal generation, optical fiber sensing, and spectrum measurement.

**Key words** lasers; stimulated Brillouin scattering; multiwavelength fiber lasers; tunable lasers

**OCIS codes** 140.3510; 060.2410; 190.5890

收稿日期: 2017-10-30; 收到修改稿日期: 2018-01-05

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20161521)、江苏省特聘教授项目(RK002STP14001)、江苏省“六大人才高峰”项目(2015-XCL-023)、南京邮电大学人才引进项目(NY214002, NY215002)

作者简介: 邓宇翔(1991—),男,硕士研究生,主要从事多波长布里渊光纤激光器方面的研究。

E-mail: 350388080@qq.com

导师简介: 张祖兴(1975—),男,博士,教授,主要从事激光技术、光纤传感及光信号处理等方面的研究。

E-mail: zxzhang@njupt.edu.cn(通信联系人)

# 1 引言

近年来,光纤激光器以其稳定的多波长输出<sup>[1]</sup>、结构紧凑<sup>[2]</sup>、光束质量好<sup>[3]</sup>、损耗低、低阈值功率<sup>[4]</sup>、宽的可调谐范围<sup>[5-6]</sup>以及其独特的构造对热负荷效应具有极高的免疫性<sup>[7]</sup>等潜在的优势受到人们广泛关注。多波长光纤激光器在很多领域有巨大的应用前景,包括密集波分复用光纤通信系统、微波信号的产生、光学仪器测试、光纤传感和光谱测量等<sup>[8-14]</sup>。

受激布里渊散射(SBS)是一种非线性光学现象,是光波与声波通过电致伸缩相互作用<sup>[15]</sup>而产生。将受激布里渊散射和掺杂光纤增益相结合的激光器已引起了国内外研究人员极大的兴趣。Cowle等<sup>[16]</sup>最先提出混合布里渊掺铒光纤激光器(BEFL),将掺铒光纤(EDF)中的线性增益与单模光纤(SMF)中的非线性布里渊增益相结合实现了多波长布里渊激光器。通过布里渊散射级联实现多个斯托克斯线的同时产生,即低阶斯托克斯信号由掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,作为新的布里渊抽运信号以激发更高阶的斯托克斯信号。之后,不同研究组对多波长布里渊激光器的不同结构、不同波长及调谐范围等方面进行了广泛研究,也取得了一定发展<sup>[17-22]</sup>。

2000年,Abd-Rahman等<sup>[23]</sup>利用双腔将斯托克斯光形成级联效应,从而获得了多波长布里渊光纤激光器。由于单布里渊频移0.08 nm的波长间隔对某些应用(例如波分复用)来说太窄,因此为扩大信道间隔,减少复用的难度,需要研究波长间隔为多倍布里渊频移的多波长布里渊光纤激光器。Parvizi等<sup>[24]</sup>利用3 dB耦合器构成8字型结构,在实验中利用光子晶体光纤(100 m)作为非线性效应增益介质,最终获得了3个间隔为20 GHz的多波长输出,输出波长可以在1520~1600 nm范围内实现调谐。此后,张鹏<sup>[25]</sup>等在8字型结构中通过加入掺铒光纤来提高线性增益,获得了间隔为0.173 nm的6个波长输出,输出波长可以在1535~1563 nm内调谐。张旭萍等<sup>[26]</sup>提出了具有三倍布里渊频移间隔的激光器,在高布里渊抽运功率的情况下实现了具有三倍布里渊频移间隔的3个多波长输出。随后Wang等<sup>[27]</sup>在光路中运用两个具有SBS效应的腔,即单倍布里渊频移间隔腔和双倍布里渊频移间隔腔,通过两次掺铒光纤放大器进行信号放大补偿,最终获得了间隔为0.259 nm的7个功率超过-30 dBm的多波长输出。

本文分别研究了具有双倍、三倍布里渊频移间隔的多波长布里渊掺铒光纤激光器。双倍布里渊间隔频移是通过使用一个4端口环形器,使抽运光在单模光纤中连续发生两次布里渊散射,仅通过一次掺铒光纤放大器进行信号放大,在实验中获得了8个波长间隔为0.17 nm的布里渊多波长输出信号。三倍布里渊间隔频移通过组合两个腔来实现,腔1产生单倍布里渊频移,而腔2产生双倍布里渊频移,最后在实验中获得具有0.26 nm波长间隔的5个波长输出信号。

## 2 实验结构及原理

图1(a)是所构造的双倍、三倍布里渊频移多波长光纤激光器实验装置的示意图。该激光器可以看作是两个单独的腔,包含作为非线性增益介质的单模光纤SMF1(长度为25 km)和SMF2(长度为10 km),EDFA由最大输出功率为300 mW的980 nm激光抽运源、980/1550 nm波分复用器(WDM)和长度为6 m的EDF构成,用于在谐振腔中提供线性增益,环形器Cir1与Cir3用于控制信号传播方向。布里渊抽运光源(BP)为具有710 nm(波长970~1680 nm)调谐范围的可调谐激光器(TL),通过3 dB耦合器耦合到腔内,同时实现激光输出,并采用光谱仪(OSA, AQ-6370D, YOKOGAWA, 日本)测量得到的多波长信号。

当如图1(a)所示激光结构中去掉腔1,只保留腔2时,它是一个双倍布里渊频移间隔的多波长激光器。BP激光经3 dB耦合器进入激光腔内,如图1(b)中的箭头方向指示,经EDFA放大后先由Cir3的1端口进入到2端口中,随后进入到10 km长的SMF2中,当BP功率超过受激布里渊散射阈值时产生一阶布里渊斯托克斯信号(BS1)。由于布里渊散射的后向传输性质,BS1由Cir3的端口2进入到3端口,再从另一个方向进入到10 km的SMF2中,当BS1信号功率大于受激布里渊散射阈值时,二阶布里渊斯托克斯信号(BS2)产生。这样,反方向的BS2从Cir3的端口4输出,一部分信号由3 dB耦合器输出,另一部分信号通过EDFA放大后进入四端口环形器作为新的BP信号,如此循环,直到激光腔内的总增益小于工作波长处的腔体损耗为止。由于产生的BS2信号与初始BP信号之间存在两次布里渊频移,因此产生了间隔为0.17 nm的多波长激光器。

当腔1与腔2同时存在时,便成为了具有三倍布里渊频移间隔的多波长激光器。如图1(c)中的

箭头方向指示, BP 信号通过 3dB 耦合器以顺时针方向由 EDFA 放大后注入腔 1, 由 cir1 的端口 1 到端口 2 后进入 SMF1, 若 BP 的功率超过布里渊散射阈值, 则产生 BS1, 并反向通过端口 2 传输到端口 3 (cir2 作为回路镜, 将残留 BP 信号反射回 cir1)。然后, 产生的 BS1 信号通过 cir3 端口 1 传输到端口 2, 再连续发生两次布里渊散射, 产生沿顺时针方向的三阶

斯托克斯信号(BS3), BS3 信号通过 Cir3 的端口 4 出来, 在 BS1 和 BS3 之间存在两次布里渊频移, 因此它具有从初始 BP 信号的三次布里渊频移。部分 BS3 信号通过 3 dB 耦合器输出, 另一部分作为新的 BP 信号, 并通过与前一次相同的过程, 一直持续到激光腔内的总增益小于工作波长处的腔体损耗为止。这样就产生了间隔为 0.26 nm 的多波长激光器。

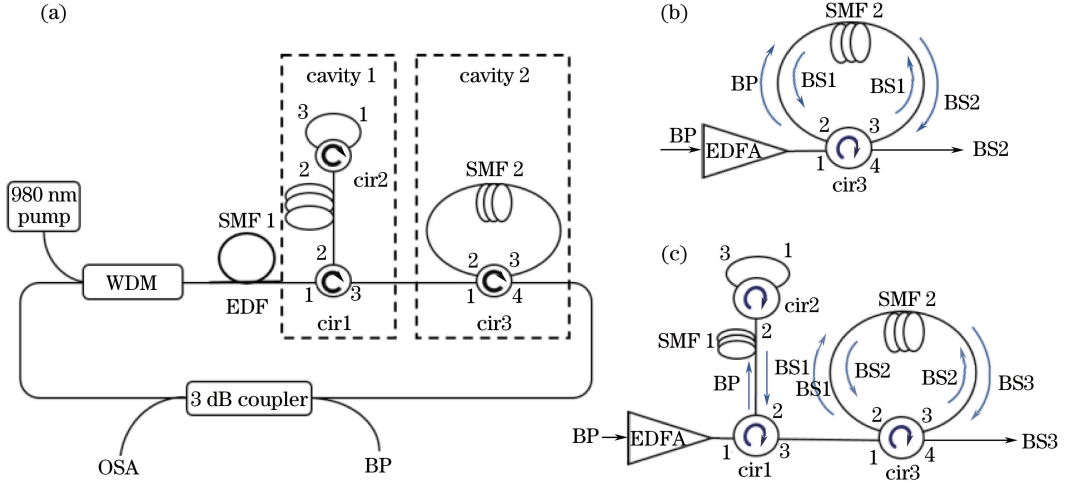


图 1 (a)多波长布里渊激光器实验结构示意图; (b)双倍布里渊频移实现示意图; (c)三倍布里渊频移实现示意图  
Fig. 1 Experimental schematics of (a) multi wavelength Brillouin fiber laser, (b) double Brillouin frequency shift realization and (c) triple Brillouin frequency shift realization

### 3 实验结果与讨论

如图 2 所示, 当未输入 BP 信号时, 实验中增大 980 nm 抽运功率, 发现在 1562.8 nm 附近出现自激振荡模, 这表明此激光器在 1562.8 nm 附近净增益最大。

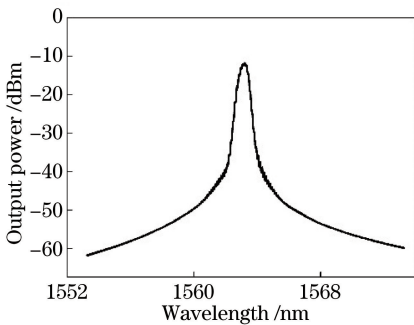


图 2 激光器在 1562.8 nm 处自激振荡模  
Fig. 2 Self-excited oscillation modes at 1562.8 nm

#### 3.1 双倍布里渊频移间隔多波长布里渊激光器

在 BP 波长设定为 1562.8 nm, 功率为 5.56 dBm (3.6 mW) 时, 实验研究了双倍布里渊频移间隔多波长激光器的输出波长数随 980 nm 抽运功率的变化情况, 结果如图 3 所示。实验结果表明随 980 nm 功率增大, 双倍布里渊频移间隔波长数增加。当 980 nm 抽

运功率为 24.2 dBm (265 mW) 时, 输出端测得多波长光谱如图 4 所示, 实现了 8 个波长的输出。8 个波长的峰值功率分别为 0.15, -1.26, -2.64, -4.21, -5.98, -8.42, -10.86, -17.43 dBm, 单个布里渊激光波长 3 dBm 线宽约为 0.016 nm。从图 4 中还可以看出, 奇数阶斯托克斯光的峰值功率同 8 个偶数阶斯托克斯光相比要低得多, 但依然存在, 原因是实验中存在瑞利散射的影响, 导致奇数阶斯托克斯光在 SMF 中传输时, 在反向会产生散射信号。

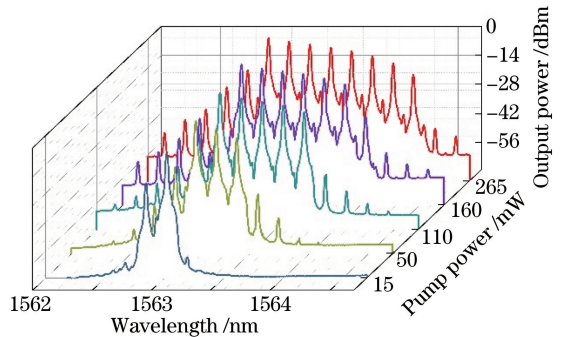


图 3 BP 功率为 5.56 dBm 时, 不同 980 nm 抽运功率下的输出光谱图  
Fig. 3 Output spectra at different 980 nm pump powers when BP power is 5.56 dBm

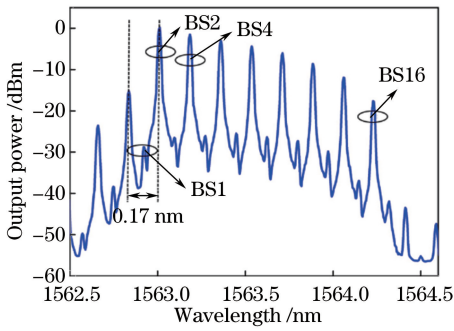


图 4 980 nm 抽运功率为 24.2 dBm 时, 激光器的输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of lasers at 980 nm pump power of 24.2 dBm

实验还研究了在不同 BP 功率下的可调谐范围和多波长的输出个数,如图 5 所示。保持 BP 信号功率为 5.56 dBm 不变,改变 980 nm 抽运功率分别为 50, 110, 160, 265 mW 时,该激光器的输出多波

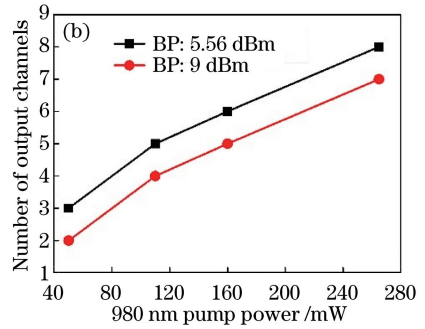
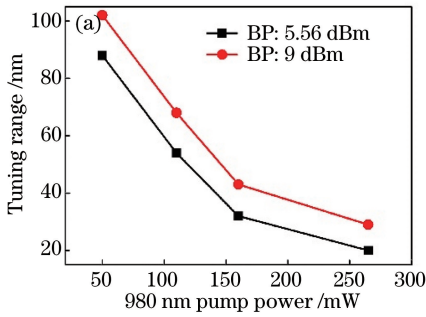


图 5 BP 功率为 5.56 dBm 和 9 dBm 时不同 980 nm 抽运功率下的 (a) 调谐范围和 (b) 多波长个数

Fig. 5 (a) Tuning range and (b) multiwavelength number under different 980 nm pump power with BP power of 5.56 dBm and 9 dBm

为了研究多波长输出的可调谐特性,实验中固定 980 nm 抽运功率为 24.2 dBm (265 mW),BP 信号功率为 5.56 dBm (3.6 mW),以 1 nm 步长改变 BP 波长,来测量该激光器的输出特性。如图 6 所示,实验表明,通过改变 BP 波长,1548~1583 nm 范围内激光器输出的多波长个数能达到 6;而当信号光波长低于 1548 nm,或高于 1598 nm 时,输出的多波长数量迅速减少,这是因为当 BP 波长超出掺铒光纤放大器的增益范围时,对应的斯托克斯信号得不到充分放大,以至于达不到受激布里渊阈值激发下一阶斯托克斯光产生的目的。实验结果表明,该激光器波长可以在 110 nm 范围内(1528~1638 nm)调谐,实现多波长输出。不同的 980 nm 抽运输出功率下在可调谐范围内,多波长输出光谱如图 7 所示。

图 8 所示为在 BP 信号为 5.56 dBm,980 nm 抽运功率为 24.2 dBm 时,时间跨度 60 min 内,每隔 10 min 扫描一次,测出该激光器 8 个信道波长的稳

长个数分别为 3、5、6、8,对应的调谐范围为 88,54,32,20 nm。保持 BP 信号为 9 dBm 不变,改变 980 nm 抽运功率分别为 50,110,160,265 mW 时,该激光器的多波长输出个数为 2、4、5、7,调谐范围分别为 102,68,43,29 nm。

从图 5 中可以看出,当固定 BP 功率不变时,通过增大 980 nm 抽运输出功率,整个掺铒光纤放大器可以为激发高阶斯托克斯光提供更大增益,使得多波长个数有所增加。但是与此同时,较高的抽运功率会导致 EDFA 的增益范围变窄,从而限制了输出信号的可调谐范围,故使得调谐范围有所降低,最终将调谐范围局限在自激发振荡模附近。在同样的 980 nm 抽运输出功率下,BP 功率越大,对腔内自激振荡模的限制作用变得更加有效,这就是为什么增大了 BP 信号功率使得可调谐范围增大的原因。

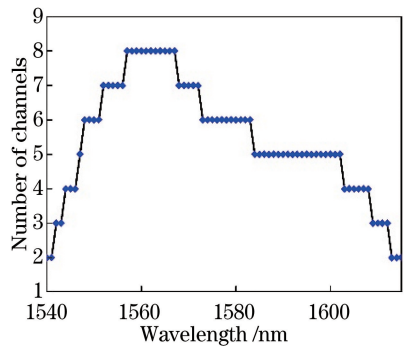


图 6 激光器在调谐范围内可产生的波长数  
Fig. 6 Generated wavelength number of lasers within tuning range

定性。8 个波长的最大波动分别为 0.14,0.26,0.37,0.41,0.37,0.38,0.4,0.93 dBm。除信道 8 的波长抖动为 0.93 dBm 外,其余 7 个信道波长抖动均小于 0.4 dBm。从图 8 可以看出,该激光器具有较好的稳定性。

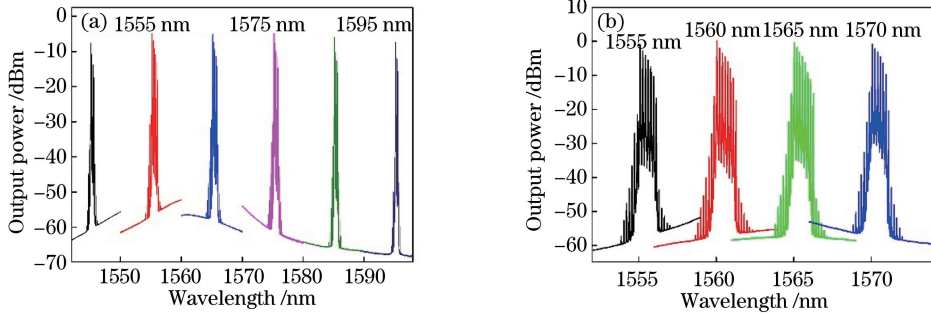


图 7 不同 980 nm 抽运功率下的输出光谱。(a) 20.41 dBm(110 mW);(b) 24.2 dBm(265 mW)

Fig. 7 Output spectra at different 980 nm pump powers. (a) 20.41 dBm (110 mW); (b) 24.2 dBm (265 mW)

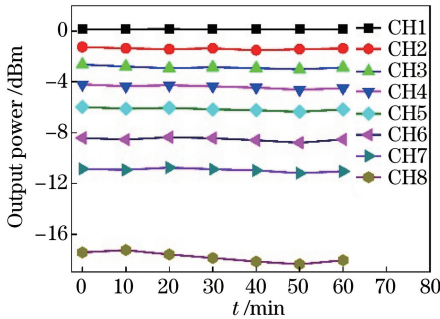


图 8 BP 功率为 5.56 dBm、抽运功率为 24.2 dBm 时的多波长输出稳定性

Fig. 8 Output stability of multiwavelength lasers with BP power of 5.56 dBm and pump power of 24.2 dBm

### 3.2 三倍布里渊频移间隔多波长布里渊激光器

实验研究了三倍布里渊频移间隔多波长激光器的输出波长数目随 980 nm 抽运功率的变化情况,如图 9 所示。

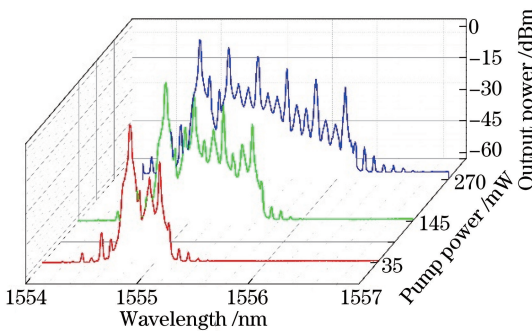


图 9 BP 功率为 3.2 dBm 时,不同 980 nm 抽运功率下的输出光谱图

Fig. 9 Output spectra at different 980 nm pump powers with BP power of 3.2 dBm

具有三倍布里渊频移间隔的多波长输出光谱如图 10 所示,当 BP 功率为 3.2 dBm,980 nm 抽运功率为 24.3 dBm 时,有 5 个多波长输出。图中 BS3 信号的光谱与 BP 波长对比,得到波长间隔为 0.26 nm 的多波长输出,峰值功率分别为 -0.224,

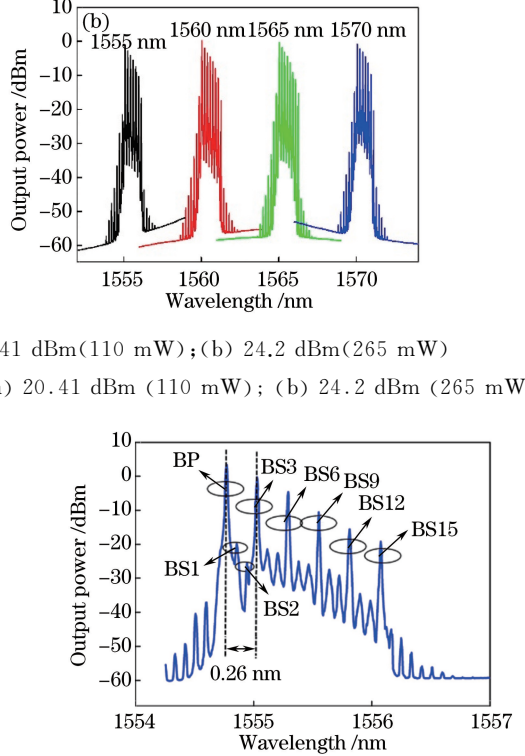


图 10 980 nm 抽运功率为 24.3 dBm 时,激光器的输出光谱

Fig. 10 Output spectra of lasers at 980 nm pump power of 24.3 dBm

-4.448, -10.469, -15.596, -19.631 dBm,单个布里渊波长 3 dB 线宽约为 0.016 nm。从图中可以看出,BS15 的光谱之后依然有许多信号产生,但是这些波长的峰值功率以及信噪比同中心 5 个波长的光相比要低很多。从图 10 还可以看出,相邻三倍布里渊频移波长间隔信号之间的斯托克斯光峰值功率虽然很小,但依然存在。这也是因为受实验中存在瑞利散射的效应的影响,当信号在 SMF 中传输时,在反方向会产生散射信号。

980 nm 抽运功率为 24.3 dBm(270 mW),BP 信号功率为 3.2 dBm(2.1 mW)时,以 1 nm 步长改变 BP 波长,可调谐的范围为 1548~1563 nm,其中多波长输出个数最多为 5,如图 11 所示。实验结果表明,输出波长可以在 60 nm 内(1535~1595 nm)调谐,实现多波长输出。不同 BP 波长情况下的激光器在调谐范围内输出光谱如图 12 所示。

图 13 所示为具有三倍布里渊频移间隔激光器随时间变化的多波长输出稳定性。选择了 5 个信道来讨论,并间隔 5 min 测量一次。如图 13 所示,所产生的信号输出功率相对稳定,峰值功率的最大抖动小于 1.5 dBm。如果采用功率更大的 980 nm 抽运功率,或是在四端口环形腔内增加一个相同的

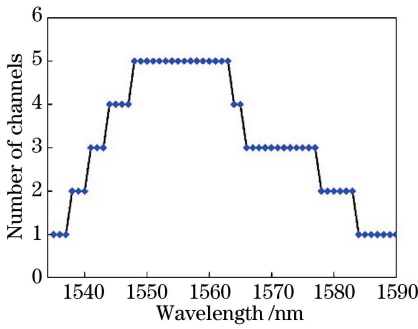


图 11 激光器在调谐范围内可产生的波长数

Fig. 11 Wavelength number of lasers within tuning range

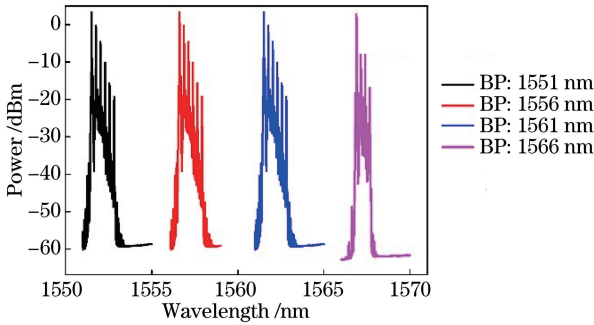


图 12 不同 BP 波长情况下,激光器的输出光谱

Fig. 12 Output spectra of lasers with different BP wavelengths

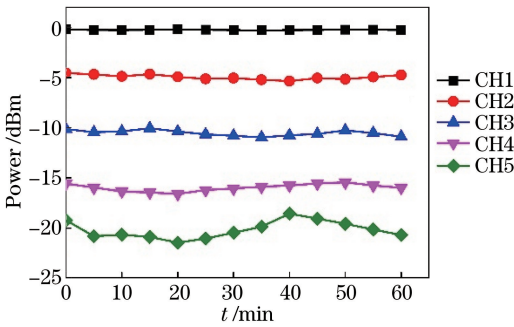


图 13 BP 功率为 3.2 dBm、抽运功率为 24.3 dBm 时的多波长输出稳定性

Fig. 13 Output stability of multiwavelength lasers with BP power of 3.2 dBm and pump power of 24.3 dBm

EDFA 放大器,更多的波长能够得到。

## 4 结 论

实验研究了具有双倍、三倍布里渊频移间隔,即波长间隔分别为 0.17 nm 和 0.26 nm 的多波长布里渊掺铒光纤激光器,详细分析了 980 nm 抽运功率、BP 功率以及波长等参数优化对达到多波长最大数量和最宽调谐范围的影响,实验结果表明,布里渊抽运激光波长在激光器自激发振荡波长范围内时,产生的布里渊波长数量达到最大值。实验得到波长间

距为 0.17 nm 的 8 个布里渊多波长激光输出,输出波长可以在 110 nm 范围(1528~1638 nm)内调谐;波长间距为 0.26 nm 的 5 个布里渊多波长激光输出,输出波长可以在 60 nm 范围(1535~1595 nm)内调谐。可调谐多倍布里渊频移间隔多波长光纤激光器在密集波分复用光纤通信系统、微波光子学、光纤传感、光谱测量等领域有重要的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Shahi S, Harun S W, Shahabuddin N S, *et al.* Multi-wavelength generation using a bismuth-based EDF and Brillouin effect in a linear cavity configuration[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(2): 198-201.
- [2] Xie Y, Meng J Q, Zu J F, *et al.* Conduction cooling and compact, high peak-power, nanoseconds pulse lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0902005.  
谢银, 孟俊清, 祖继峰, 等. 传导冷却结构紧凑型高峰值功率纳秒级激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0902005.
- [3] Niu B, Wang B H, Guo W R, *et al.* Description and evaluation of beam quality of single emitter diode laser based on beam parameter product[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0202004.  
牛奔, 王宝华, 郭渭荣, 等. 基于光参数积的单管半导体激光器光束质量描述与评价[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0202004.
- [4] Al-mansoori M H, Iqbal S J, Abdullah M K, *et al.* Low threshold characteristics of an L-band Brillouin-erbium comb fiber laser in a linear cavity[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006, 23(11): 2281-2284.
- [5] Yuan Y, Yao Y, Yi M, *et al.* Multiwavelength fiber laser employing a nonlinear Brillouin optical loop mirror: experimental and numerical studies [J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15352-15363.
- [6] Chow J, Town G, Eggleton B, *et al.* Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(1): 60-62.
- [7] Feng C, Guo W R, Li Q. Experimental study of thermal effect on large size Nd:YAG side pumped thin disk laser[J]. *Applied Laser*, 2011, 31(5): 414-417.  
冯驰, 郭渭荣, 李强. 大尺寸 Nd:YAG 侧面泵浦薄片激光器热效应实验研究[J]. *应用激光*, 2011, 31(5): 414-417.
- [8] Zhang Z X, Dai G X, Kuang Q Q, *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频多波长光纤激光器[J]. 光子学报, 2010, 39(5): 815-819.
- [9] Sun H, Wei K H, Qian K, *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.
- [10] Zhao J, Liao T, Yang X, *et al.* A simple tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber ring laser with low threshold power[J]. Journal of Optics, 2010, 12(11): 115202.
- [11] Chang C H, Peng P C, Shiu R K, *et al.* Multiwavelength laser with adjustable ultranarrow wavelength spacing [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(4): 1-7.
- [12] Shen Y, Wang R, Pu T. A novel technique to generate high-frequency microwave signal based on high-order stimulated Brillouin scattering [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1571-1575.
- 沈颖, 王荣, 蒲涛. 基于高阶受激布里渊散射的高频微波信号产生技术 [J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1571-1575.
- [13] Luo Y, Tang Y, Yang J, *et al.* High signal-to-noise ratio, single-frequency 2  $\mu\text{m}$  Brillouin fiber laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(9): 2626-2628.
- [14] Gao Y W, Zhang Y J, Chen D, *et al.* Measurement of oxygen concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0330001.
- 高彦伟, 张玉钧, 陈东, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度测量研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0330001.
- [15] Hu K, Kabakova I V, Büttner T F, *et al.* Low-threshold Brillouin laser at 2  $\mu\text{m}$  based on suspended-core chalcogenide fiber. [J]. Optics letters, 2014, 39(16): 4651-4654.
- [16] Cowle G J, Stepanov D Y. Multiple wavelength generation with Brillouin/erbium fiber lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(11): 1465-1467.
- [17] Song Y J, Zhan L, Ji J H, *et al.* Self-seeded multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. Optics Letters, 2005, 30(5): 486-488.
- [18] Huang C Q, Liu M S, Che T Y, *et al.* A Tunable multi-wavelength random fiber laser based on half-open cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0302001.
- 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): 0302001.
- [19] 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.
- [20] Al-mansoori M H, Mahdi M A. Multiwavelength L-band Brillouin-Erbium comb fiber laser utilizing nonlinear amplifying loop mirror [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(22): 5038-5044.
- [21] Kuang F, Ye Z Q. 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.
- [22] 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.
- [23] Abd-Rahman M K, Abdullah M K, Ahmad H. Multiwavelength, bidirectional operation of twin-cavity Brillouin/erbium fiber laser [J]. Optics Communications, 2000, 181(1): 135-139.
- [24] Parvizi R, Arof H, Ali N M, *et al.* 0.16 nm spaced multi-wavelength Brillouin fiber laser in a figure-of-eight configuration[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(4): 866-869.
- [25] Zhang P, Jia Q S, Wang T S, *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 0.173 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): 0614002.
- [26] Zhang X P, Xu R H. Device and method for generating multi-wavelength laser larger than two times of Brillouin frequency shift interval: 104600550A[P]. 2015-05-06[2018-3-28].
- 张旭苹, 徐荣辉. 大于两倍布里渊频移间隔的多波长激光发生装置及方法: 104600550A[P]. 2015-05-06 [2018-3-28].
- [27] Wang Z, Wang T, Jia Q, *et al.* Triple Brillouin frequency spacing multiwavelength fiber laser with double Brillouin cavities and its application in microwave signal generation. [J]. Applied Optics, 2017, 56(26): 7419-7426.