

文章编号:1004-4213(2010)05-0815-5

# 基于受激布里渊散射的波长间隔可变 多波长光纤激光器\*

张祖兴,戴国星,况庆强,桑明煌,叶志清

(江西师范大学 物理与通信电子学院 江西省光电子与通信重点实验室,南昌 330022)

**摘 要:**提出了一个基于自激发受激布里渊散射的波长间隔可变多波长光纤激光器.利用单模光纤中自激发产生的非线性布里渊增益和掺铒光纤的线性增益组成混合增益光纤激光器,从而使光纤激光器在室温下产生稳定的多波长输出.改变双折射光纤环镜滤波器中保偏光纤的长度,可以实现波长间隔可变多波长激光产生,提高了多波长光纤激光器操作的灵活性和实用性.实验实现了波长间隔从 0.8 nm 至 0.076 nm 可变的的多波长激光产生,波长数随波长间隔减小而增加,间隔为 0.08 nm 的激光波长数达 86.

**关键词:**多波长光纤激光器;受激布里渊散射

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103905.0815

## 0 引言

多波长激光源在光传感、光谱光学、微波光子信号处理,以及大容量波分复用通信系统等方面都具有很重要的应用价值<sup>[1-3]</sup>.光纤激光器在产生多波长方面已显示出其独有的优势,包括大增益、高饱和能量、和相对较低的噪音系数.然而,由于均匀加宽介质掺铒光纤中的强模式竞争,抑制了常温下掺铒光纤激光器中稳定多波长激光的产生.已经有各种不同的方法来克服此问题,使光纤激光器在室温下多波长产生成为可能,包括将掺铒光纤浸入液氮中<sup>[4-5]</sup>,采用插入了频移器的激光腔<sup>[6]</sup>,加入一个半导体光放大器利用它的非均匀加宽增益<sup>[7-9]</sup>,在重叠光纤激光腔中使用偏振烧孔效应<sup>[10-11]</sup>,在非线性光纤环内采用四波混频<sup>[12-13]</sup>,在激光器中使布里渊增益和掺铒光纤增益相结合的办法<sup>[14-15]</sup>等.其中,布里渊-掺铒光纤激光器是一种能产生较大数量激光波长的有效途径,其波长间隔由光纤布里渊频移而决定的.复合结构布里渊掺铒光纤激光器首先是由 Cowle 等人提出的<sup>[14]</sup>,其增益是由掺铒光纤的线性增益以及光纤中受激布里渊散射非线性增益的综合,利用低阈值的受激布里渊散射非线性增益可以有效地抑制掺铒光纤的均匀加宽机制,通过多级布

里渊散射级联,能够实现有着固有波长间隔的布里渊多波长激光输出.在前期的这些研究中,外界布里渊抽运对于多波长产生是不可或缺的.此后,在双折射光纤环镜前插入一段长单模光纤,利用双向 Rayleigh 散射形成的动态分布反馈产生自激发布里渊抽运,通过反射级联实现了自启动的布里渊多波长产生<sup>[15]</sup>.通过调节双折射光纤环镜的滤波特性,还可以调谐布里渊多波长激光波长,但波长间隔还是等于光纤布里渊频移.虽然确切的频移取决于光纤中声波的速度,而声波速度又取决于光纤材料和光纤结构,大部分光纤在 1 550 nm 波长区域内布里渊频移约为 9~12 GHz,这就大大限制了布里渊-掺铒多波长光纤激光器的实际应用.

为了提高多波长光纤激光器操作的灵活性和实用性,必须实现波长间隔可变多波长激光源.本文研究了一个基于单模光纤中自激发受激布里渊散射的波长间隔可变多波长光纤激光器,无需外界布里渊抽运,布里渊散射可以在腔内自激发产生.改变双折射光纤环镜滤波器中保偏光纤的长度,实验实现了波长间隔从 0.8~0.076 nm 可变的的多波长激光产生,波长个数随波长间隔减小而增加,间隔为 0.08 nm 的激光波长数达 86.分析了波长间隔可变多波长产生的机理,波长间隔由滤波器滤波间隔决定.还研究了抽运功率对多波长输出特性的影响,发现抽运功率对多波长产生的个数有很大影响,抽运功率越小,产生的波长个数越少.

\*国家自然科学基金(60807014、60967002)、江西省自然科学基金(2008GQS0050)和江西省教育厅科技项目(GJJ09152)资助

Tel:0791-8120370

Email:stellarz@hotmai.com

收稿日期:2009-08-31

修回日期:2009-02-13

## 1 实验结构及原理

图 1 是基于自激发受激布里渊散射的波长间隔可变多波长光纤激光器实验结构示意图. 激光器结构相当简单, 包括一个掺铒光纤放大器 (Erdium-Doped Fiber Amplifier, EDFA), 一个光环行器 (Optical Circulator, OC), 一卷 4 km 长单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF), 一个双折射光纤环镜滤波器 (Doped BFLMF). OC 的端口 3 经过 EDFA 后连接到端口 1, 端口 2 连接着 SMF 的一端, SMF 的另一端接到构成双折射光纤环镜滤波器的 3 dB 耦合器, 激光直接从 3 dB 耦合器未接入激光腔的端口输出. 在图 1 中, 虚线框内的是双折射光纤环镜滤波器, 由一个 3 dB 耦合器、两个偏振控制器 (PC) 和一段保偏光纤 (PMF) 组成, 它作为一个波长选择元件, 以确定输出的波长. 双折射光纤环镜滤波器的反射传输函数是一个关于波长的周期性函数, 并且它的梳状间隔由  $\Delta\lambda = \lambda^2 / (\Delta n \cdot L)$  给出, 这里  $\Delta n = 3.8 \times 10^{-4}$  是保偏光纤的双折射,  $L$  是保偏光纤的长度. 此多波长光纤激光器的工作机理解释为, 处于双折射光纤环镜滤波器反射带宽内的激光波长在激光腔中经历较小的损耗, 从放大的自发辐射形成振荡模, 并来回经过 4 km 长的单模光纤产生布里渊散射. 因此, 整个激光腔内存在线性的掺铒光纤增益和非线性的布里渊增益, 形成混合增益光纤激光器, 有利于稳定多波长激光产生. 通过改变双折射光纤环镜滤波器中保偏光纤的长度, 调整滤波器的梳状谱间隔, 可以从掺铒光纤激光器中得到波长间隔可变的输出. 在这种方法中, 实现多波长的机制是 4 km 单模光纤中的受激布里渊散射, 而双折射光纤环镜滤波器决定输出波长.

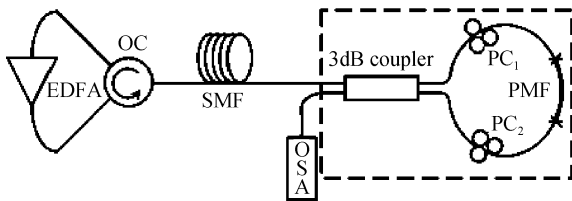


图 1 基于自激发受激布里渊散射的波长间隔可变多波长光纤激光器实验

Fig. 1 Experimental setup of spacing-adjustable multiwavelength fiber laser based on self-excited stimulated Brillouin scattering

## 2 实验结果与分析

实验中使用一卷单模光纤长 4 km, 抽运功率开始固定在 160 mW. 首先, 双折射光纤环镜滤波器接入很短的保偏光纤 (16 cm), 调节两个偏振控制器, 可以在滤波器较宽的反射带内得到级联的布里渊多

波长. 如图 2, 共有 70 个布里渊波长, 波长间隔是 0.088 nm. 它的产生机理为滤波器反射带内的级联布里渊散射, 即滤波器反射带内具有最大增益的激光波长作为布里渊抽运, 它在单模光纤中双向传输, 并产生反向的第一阶布里渊斯托克斯波. 第一阶布里渊斯托克斯波又产生第二阶布里渊斯托克斯波. 以上的过程不断重复, 直至激光能量太小, 以至于在单模光纤中不能产生下级布里渊斯托克斯波, 这种增长将会停止, 最终产生布里渊波长梳.

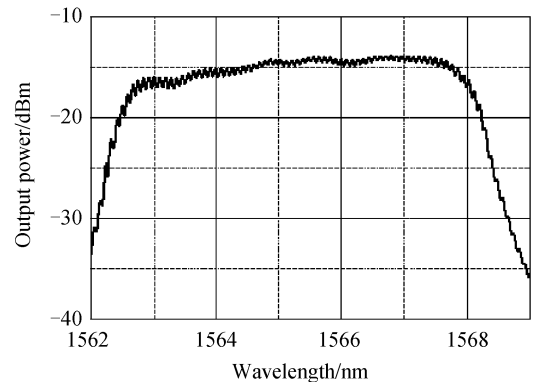


图 2 滤波器中有 16 cm 保偏光纤时的多波长输出光谱  
Fig. 2 Output multiwavelength spectrum with 16 cm PMF incorporated in the birefringence fiber loop mirror filter

为了产生不同波长间隔的多波长激光, 分别在双折射光纤环镜滤波器接入不同长度 7.9, 15.8 和 79 m 的保偏光纤. 实验结果如图 3, 产生了对应于滤波器梳状间隔 0.8, 0.4 和 0.08 nm 的多波长激光谱, 波长个数分别为 9, 22 和 86. 对比图 2 和图 3

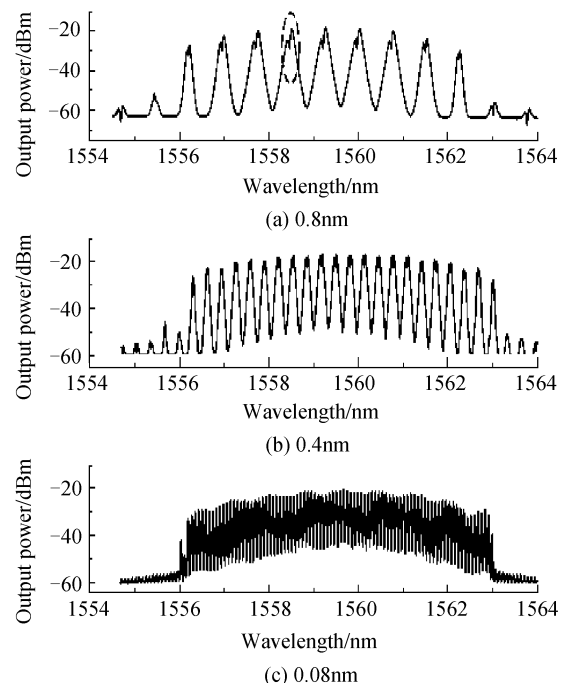


图 3 波长间隔可变多波长输出光谱  
Fig. 3 Output multiwavelength spectra with adjustable wavelength spacing

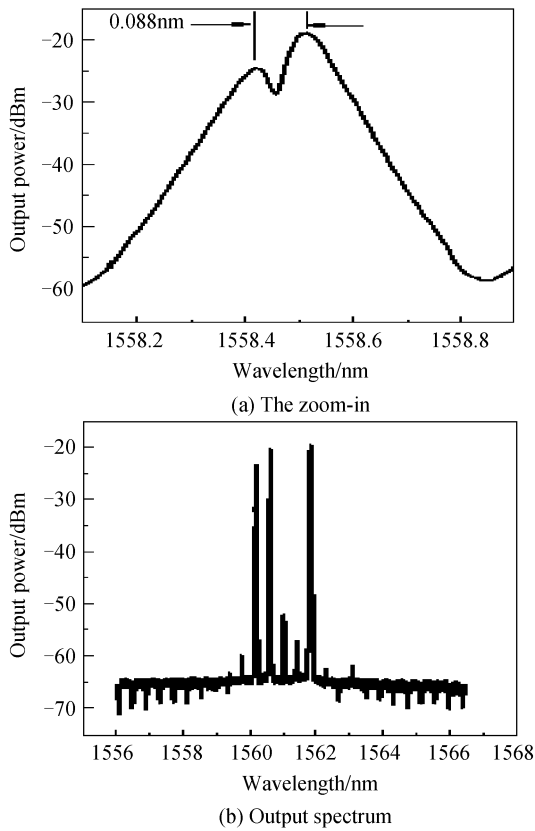


图 4 图 3(a)中虚线框所围单个波长的放大图和激光腔内单模光纤去掉时产生的不稳定多波长输出光谱  
 Fig. 4 The zoom-in of an individual component of multiwavelength spectrum with wavelength spacing of 0.8 nm in Fig. 3(a) and output spectrum without SMF while the used PMF is 15.8 m

可以看出,图 3 中多波长的信噪比更大,这是因为图 3 中波长间隔是由滤波器间隔决定的.此时稳定多波长产生的机理是激光波长经历了非线性的布里渊增益,这可以从图 3 (a) 和 (b) 中单个波长有 0.088 nm 精细小峰得到证实.图 4(a)是图 3(a)中被虚线椭圆框所围的单个波长的放大图,很明显有布里渊散射波长.为了进一步验证单模光纤中布里渊散射在多波长产生中的作用,在双折射光纤环境滤波器接入有 15.8 m 保偏光纤时,将激光腔内的单模光纤去掉,输出光谱如图 4(b),是有强烈模式竞争的极不稳定的多波长输出,这反过来说明单模光纤中的布里渊散射可以有效抑制由掺铒光纤均匀加宽导致的模式竞争,从而产生稳定的多波长输出.

随着双折射光纤环境滤波器中接入保偏光纤的长度增加,得到的输出多波长光谱波长间隔就越小,但是实验发现它不能无限小.实验中能够得到的稳定多波长输出的最小波长间隔是 0.076 nm,如图 5.如果再增加保偏光纤的长度,将产生不稳定的多波长光谱.作为一个反例,图 6 是接入保偏光纤长 500 m 时产生的不稳定多波长输出光谱.多波长光谱波长间隔受到限制可能是由布里渊增益带宽决定的.

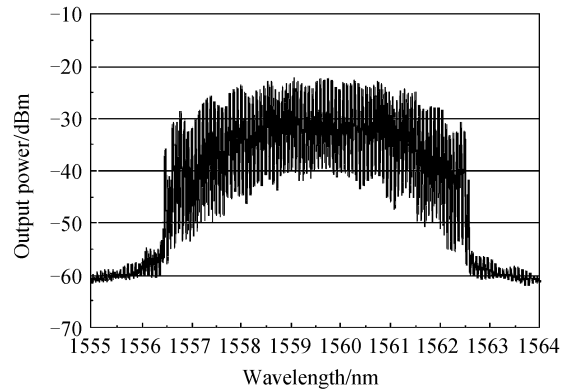


图 5 波长间隔为 0.076 nm 的多波长输出光谱  
 Fig. 5 Output multiwavelength spectrum with wavelength spacing of 0.076 nm

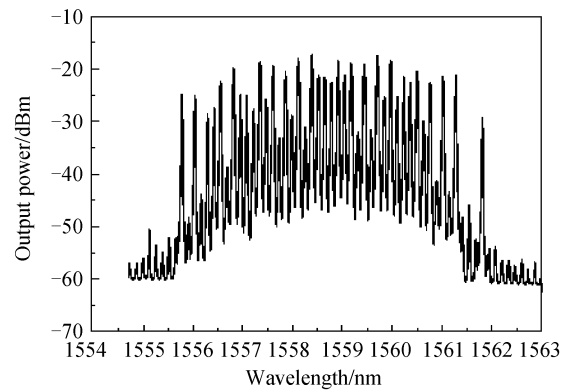


图 6 双折射光纤滤波器中有 500 m 保偏光纤时的不稳定多波长输出光谱  
 Fig. 6 Output multiwavelength spectrum with 500 m PMF incorporated in the birefringence fiber loop mirror filter

实验结果可得,尽管单模光纤中受激布里渊散射的频移固定为 0.088 nm,利用间隔为 0.08 nm 双折射光纤环境滤波器可以产生 0.08 nm 多波长梳状谱,但实验中能得到的多波长光谱的最小间隔是 0.076 nm.图 7(a)是波长间隔为 0.08 nm 多波长产生的原理性示意图,实线表示双折射光纤环境滤波器的反射特性,虚线表示级联布里渊散射增益谱.假设最左边的竖线是激光腔中最先起振的激光波长,它作为自激发布里渊抽运在其右侧 0.088 nm 的 B 处产生第一阶布里渊斯托克斯波.而双折射光纤环境滤波器的反射峰在离布里渊抽运 0.08 nm 的 A 处,滤波器反射和受激布里渊散射增益共同作用,一个波长带将被反射.经过在激光腔内的几次往返,由于在这个反射波长带内 A 处激光波长具有最低的腔损失,反射波长带内各波长分量会进一步演化,并最终形成以 A 处波长为中心的激光波长.接着, A 处激光会激发在 D 点(离 A 点 0.088 nm 处)的第二阶斯托克斯波,并且它相对 A 处激光是反向传播的.同样,形成激光的中心波长由双折射光纤环境滤波器的反射梳状谱来调节,在 C 处形成激光.以上

的过程将不断继续并最后导致多波长输出光谱具有 0.08 nm 的波长间隔. 图 7(b)说明可产生多波长激光谱的波长间隔有一个最小值, 双折射光纤环镜滤波器的反射谱间隔小于这个最小值, 将不能得到稳定的多波长输出. F 是离布里渊抽运 0.088 nm 的托克斯波, E 表示滤波器反射峰, 此时它正好偏离了布里渊增益谱, 故不能克服 EDF 均匀加宽导致的模式竞争, 也就不能产生稳定的多波长激光输出.

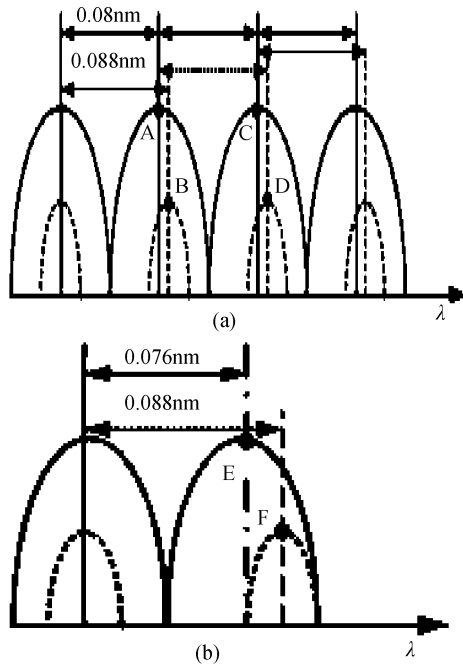


图 7 波长间隔为 0.08 nm 多波长产生的原理和产生最小波长间隔的原理

Fig. 7 The schematic of multiwavelength generation with wavelength spacing of 0.08 nm and 0.076 nm

为了分析抽运光功率对多波长输出光谱的影响, 在抽运功率为 160 mW 产生了波长间隔为 0.08 nm 的多波长后, 保持偏振控制器不动, 逐步减小 980 nm 抽运功率并记录各抽运功率下相应输出光谱, 结果如图 8. 图 8(a)是抽运功率为 120 mW 时的多波长光谱图, 和图 3(c)抽运功率是 160 mW 时的光谱比较, 光谱的平坦性几乎不变, 但是波长个数减少为 83. 图 8(b)、(c)、(d)分别是抽运功率为 80 mW、40 mW、20 mW 时的多波长光谱图, 图 8(b)和(c)中波长个数分别为 75 和 67. 由此可见, 随着抽运功率的减小, 波长个数变得越来越少, 当抽运功率减小为 20 mW, 已经不能产生稳定的多波长输出.

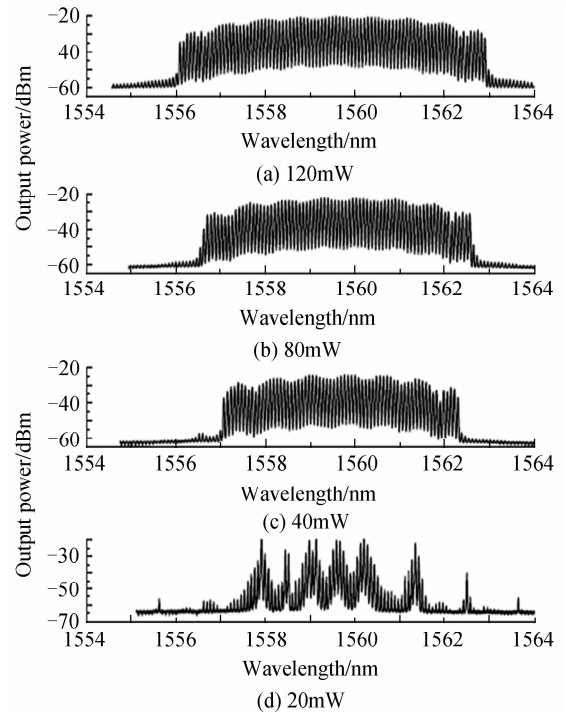


图 8 多波长输出光谱随抽运功率的变化

Fig. 8 The evolution of multiwavelength spectra with the change of pump power

### 3 结论

本文研究了一个基于受激布里渊散射的波长间隔可变多波长光纤激光器, 实验研究表明单模光纤中自激发的受激布里渊散射能有效地抑制均匀加宽增益介质掺铒光纤中的模式竞争, 在室温下实现多波长输出. 改变双折射光纤环镜滤波器中保偏光纤的长度, 可以实现波长间隔可变多波长激光输出, 提高了多波长激光器操作的灵活性和实用性. 实验实现了波长间隔从 0.8 nm 至 0.076 nm 可变的的多波长激光产生, 波长数随波长间隔减小而增加, 间隔为 0.08 nm 的激光波长数达 86. 还实验研究了抽运功率对多波长输出特性的影响, 发现抽运功率对多波长产生的个数有很大影响, 抽运功率越小, 产生的波长个数越少.

#### 参考文献

- [1] CHEN L R, PAGE V. Tunable photonic microwave filter using semiconductor fibre laser[J]. *Electron Lett*, 2005, **41**(21): 1183-1184.
- [2] ZHAO X F, YANG Y F, ZHOU H B, *et al.* Influence of degenerate four-wave mixing on the performance of supercontinuum-based multiwavelength optical source[J]. *Chin Phys*, 2007, **16**(6): 1672-1677.

- [3] SI Li-bin, FU Sheng-gui, JIA Xiu-jie, *et al.* High power switchable multi-wavelength double-clad fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2):209-211.  
司立彬,付圣贵,贾秀杰,等.大功率多波长可转换双包层光纤激光器[J].光子学报,2008,37(2):209-211.
- [4] CHOU J, TOWN G, EGGLETON B, *et al.* Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, **8**(1):60-62.
- [5] PARK N, WYSOCKI P F. 24-line multiwavelength generation of Erbium-doped fiber-ring laser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, **8**(11):1459-1461.
- [6] ZHOU K J, ZHOU D, DONG F, *et al.* Room-temperature multiwavelength erbium-doped fiber ring laser employing sinusoidal phase-modulation feedback[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(11):893-895.
- [7] CHEN H X. Multiwavelength fiber ring lasing by use of a semiconductor optical amplifier[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(6):619-621.
- [8] QIN S, TANG Y B, CHEN D R. Multi-wavelength hybrid gain fiber ring laser based on Raman and erbium-doped fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, **4**(11):652-654.
- [9] ZHANG X L, ZHANG Y, SUN J Q, *et al.* Multi-wavelength laser based on SOA and cascaded sampled fibre gratings[J]. *Acta Phys Sin*, 2003, **52**(9):2159-2164.
- 张新亮,张颖,孙军强,等.基于SOA和级联取样光纤光栅的多波长激光器[J].物理学报,2003,52(9):2159-2164.
- [10] LI Jia-fang FENG Ming, LI Yi-gang, *et al.* 48-line linear cavity multi-wavelength Er-doped fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):485-488.  
李家方,冯鸣,李乙钢,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.
- [11] LIU Y G, FENG X H, YUAN S Z, *et al.* Simultaneous four-wavelength lasing oscillations in an erbium-doped fiber laser with two high birefringence fiber Bragg gratings[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(10):2056-2061.
- [12] GAO Y, CHEN D R, GAO S M. Stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on dispersion-shifted fiber and Sagnac loop filter[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **5**(9):519-521.
- [13] LIU X M, LU C. Self-stabilizing effect of four-wave mixing and its applications on multiwavelength erbium-doped fiber lasers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(12):2541-254.
- [14] COWLE G J, STEPANOV D Y. Hybrid Brillouin/erbium fiber laser[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(16):1250-1252.
- [15] ZHANG Z X, ZHAN L, XIA Y X. Tunable self-seeded multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with enhanced power efficiency[J]. *Opt Express*, 2007, **14**(15):9731-9736.

## Spacing-adjustable Multiwavelength Fiber Laser Based on Stimulated Brillouin Scattering

ZHANG Zu-xing, DAI Guo-xing, KUANG Qing-qiang, SANG Ming-huang, YE Zhi-qing

(Key Lab of Photoelectron and Communications of Jiangxi Province, College of Physics & Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China)

**Abstract:** A spacing-adjustable multiwavelength fiber laser based on self-excited stimulated Brillouin scattering without external Brillouin pump is proposed. The nonlinear gain of self-excited stimulated Brillouin scattering can suppress mode competition induced by homogeneous broadening of erbium-doped fiber. With the use of a birefringence fiber loop filter, the wavelength spacing can be adjusted by changing the length of the used birefringence fiber, which makes the laser more flexible. Multiwavelength output with adjustable spectral spacing from 0.8 nm to 0.076 nm is experimentally obtained. And the wavelength number increases as the decrease of wavelength spacing.

**Key words:** Multiwavelength fiber laser; Stimulated Brillouin scattering



**ZHANG Zu-xing** was born in 1975. He is an associate professor with the Ph. D. degree, and his research interests focus on the fiber lasers.