

基于反馈光纤环的窄线宽单纵模布里渊光纤激光器

刘 毅 于晋龙 王文睿 潘洪刚 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 提出一种基于反馈光纤环(FFL)的窄线宽单纵模布里渊激光器(BFL), 主腔是由光环形器构成的单通谐振腔, 长度从传统单纵模 BFL 的 10 m 扩展并优化至 50 m, FFL 的光纤作为激光器主要增益介质, 为了获得单模运行, 则将其长度选为传统单纵模 BFL 的光纤长度 10 m。通过理论分析, 相对于传统的单纵模窄线宽 BFL, 基于 FFL 的 BFL 阈值和线宽都可以得到改善。实验中, 与两组不同长度单模光纤进行对比分析, 优化了基于 FFL 的 BFL 环长, 同时将系统置于保温盒中, 消除外界对系统的干扰, 最终获得的阈值为 99 mW, 边模抑制比提高了 45 dB, 1 h 内输出功率波动为 0.8 dB 的单纵模布里渊激光, 利用延时干涉的方法, 测得线宽约为 3.23 kHz, 与理论分析值相符。

关键词 光纤光学; 布里渊光纤激光器; 反馈光纤环; 单纵模

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1014003

Narrow Linewidth Single Longitudinal Mode Brillouin Fiber Laser Based on Feedback Fiber Loop

Liu Yi Yu Jinlong Wang Wenrui Pan Honggang Yang Enze

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A novel narrow linewidth single longitudinal mode (SLM) Brillouin fiber laser (BFL) based on the feedback fiber loop (FFL) is proposed. The main single pass ring is constructed by an optical circulator and a 50 m single mode fiber (SMF) whose length is extended from 10 m of traditional BFL to 50 m used as laser gain medium. In order to guarantee the SLM operation, the FFL is configured with a 10 m SMF of traditional BFL. By theoretical analysis, threshold and linewidth of FFL-based BFL are better than those of traditional SLM BFL. In experiments, ring length is optimized by contrast with other two group different length SMFs. The system is enclosed in temperature control system so that environment disturbance is reduced. The SLM BFL with 99 mW threshold, 45 dB sidemode suppression and 0.8 dB power fluctuation in 1 h is obtained. 3.23 kHz linewidth is measured by delay interference method.

Key words fiber optics; Brillouin fiber laser; feedback fiber loop; single longitudinal mode

OCIS codes 140.3510; 140.3570; 290.5900

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)作为一种非线性效应, 由于其带宽窄和噪声低的优势, 越来越受到国内外研究者的关注。基于光纤中 SBS 的增益作用, 可将其应用于窄带放大器^[1]、微波光子^[2]、慢光延时^[3]以及光纤激光器^[4-5]等领域。窄线宽单纵模布里渊光

纤激光器(BFL)因其结构简单线宽窄的优势, 一直是研究的热点, 其研究方向主要集中在以下几个方面。在结构方面, Stokes 等^[6]提出用 2×2 耦合器构成的环形腔实现了亚毫瓦抽运阈值的全光纤布里渊激光器, 但是其对抽运光要求苛刻, 需要精确对准谐振腔的谐振波长, 而由光环形器^[7-9]或者非对称马

收稿日期: 2013-04-15; 收到修改稿日期: 2013-06-17

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603, 2012CB315704)、国家杰出青年科学基金(61205061)

作者简介: 刘 毅(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: liuyi28@163.com

导师简介: 于晋龙(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高速光纤通信系统、光微波和光纤传感等方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

赫-曾德尔干涉仪^[10]构成的单通环形腔则不需要抽运光与谐振腔谐振波长严格匹配,且利用了商用广泛的DFB半导体激光器作为抽运光,也为BFL产品化提供了有效的方案;在环长方面,由于SBS增益带宽约为20 MHz,为了获得单纵模BFL,需要将腔长控制在10 m左右^[6-9],以保证在增益谱中只有一个谐振模式,虽然Yong等^[10]将腔长扩展至27.6 m,但是实验也证明了配置34 m腔长时会出现多模现象,因此腔长的局限性限制了更低阈值、更窄线宽的发展;在系统稳定方面,为了获得稳定输出的布里渊激光器,需要加入反馈稳定系统,采用经典的Pound-Drever-Hall (PDH)稳定系统^[7]或者基于经典抖动方法的自动跟踪稳定系统^[10],但成本高而且结构复杂。

为了减小阈值优化线宽,并保证单模运行,本实验提出一种基于反馈光纤环的窄线宽单纵模布里渊激光器。众所周知,布里渊激光器环形腔的精细度为自由频谱宽(FSR, R_{fs})和线宽之比,那么在精细度相同的情况下,增加环长减小FSR,从而优化了激光器线宽,同样地,在环损耗相同的情况下,增加环长可以降低SBS阈值,从而降低激光器阈值。因此主腔采用光环形器构成的单通谐振腔,长度优化为50 m的单模光纤提供主要增益。但是50 m环长对应的FSR小于SBS的增益带宽20 MHz,很难保证单模运行,因此增加反馈光纤环并配以传统单纵模BFL的腔长(10 m),以保证激光器处于单模运

行状态。实验测得阈值功率为99 mW,线宽约为3.23 kHz,一小时内输出功率波动为0.8 dB。

2 实验结构及原理

2.1 实验结构

如图1所示为基于反馈光纤环的单纵模窄线宽布里渊激光器的结构原理图。用线宽为100 kHz的可调激光器(TLS)作为布里渊激光器的抽运光,通过掺铒光纤放大器(EDFA)对其进行放大。据文献^[8]可知,当抽运光与斯托克斯波偏振态一致时,可以获得最大的布里渊增益,因此在注入谐振腔前放置偏振控制器(PC1)来调节抽运光与斯托克斯波的偏振态。随后抽运光通过光环形器沿顺时针方向注入到主谐振腔(R1)中,且仅环绕谐振腔一圈。偏振控制器(PC2)用来调节R1偏振态,以保证激光器处于单模运行状态。反馈光纤环由一个对偏振不敏感的光纤耦合器(OC2)和一段单模光纤组成,OC2的分光比为50:50,单模光纤长度选为传统单纵模布里渊激光器的长度(10 m)。当抽运光功率高于受激布里渊散射的阈值时,布里渊激光从耦合器(OC1)输出,剩余部分沿逆时针方向多次环绕谐振腔,OC1的分光比为1:99。实验中考虑到环境对激光器稳定性的影响,将整个系统置于温度控制系统中,其可调范围为3 °C~80 °C,可调精度优于0.5 °C。

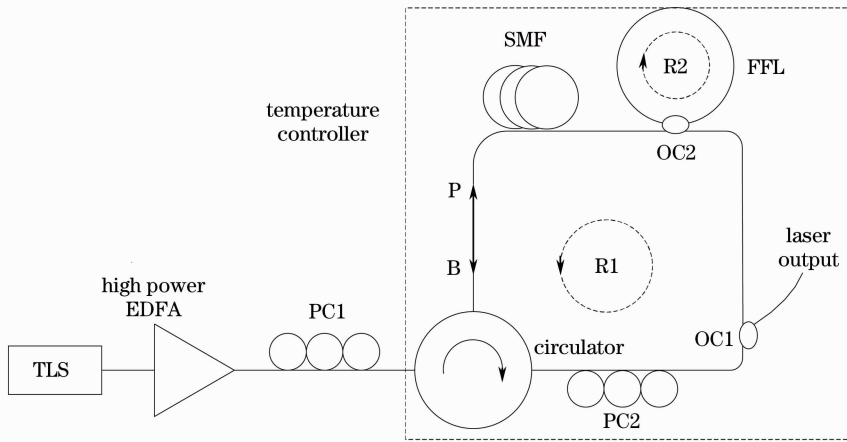


图1 基于反馈光纤环的布里渊激光器结构原理图

Fig. 1 Experimental setup of FFL-based BFL

2.2 实验原理

图2为基于反馈光纤环布里渊激光器单模运行的原理图,布里渊频移量 ν_B 与抽运频率 ν_P 的关系可以表示为^[6-10]

$$\nu_B = (2\nu_A/c)\nu_P, \quad (1)$$

式中 ν_A 为声速, c 为光速, ν_B 在1550 nm波长处大约为10 GHz。 $R_{fsm} = \frac{c}{n_m L_m}$ ($m=1,2$)是R1和R2的FSR, L_m ($m=1,2$)为R1和R2的环长, n_m ($m=1,2$)为整数,根据维纳效应,其有效FSR表示为^[11]

$$R_{fs} = n_1 R_{fs1} = n_2 R_{fs2}. \quad (2)$$

因此只有当某一频率达到布里渊增益最大值并且同时满足 R1 和 R2 的谐振条件时，激光器 ν_L 模式起振。

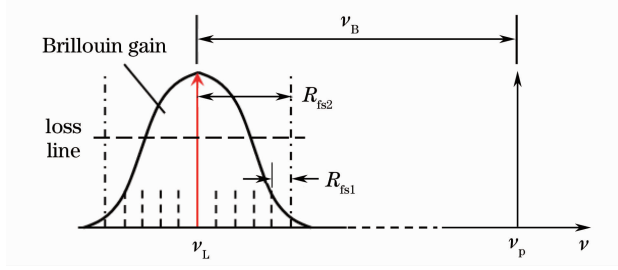


图2 激光器单模运行原理图

Fig. 2 Principle of BFL SLM operation

3 结果与分析

3.1 环长优化

另选取了两组长度不同的单模光纤组合进行对

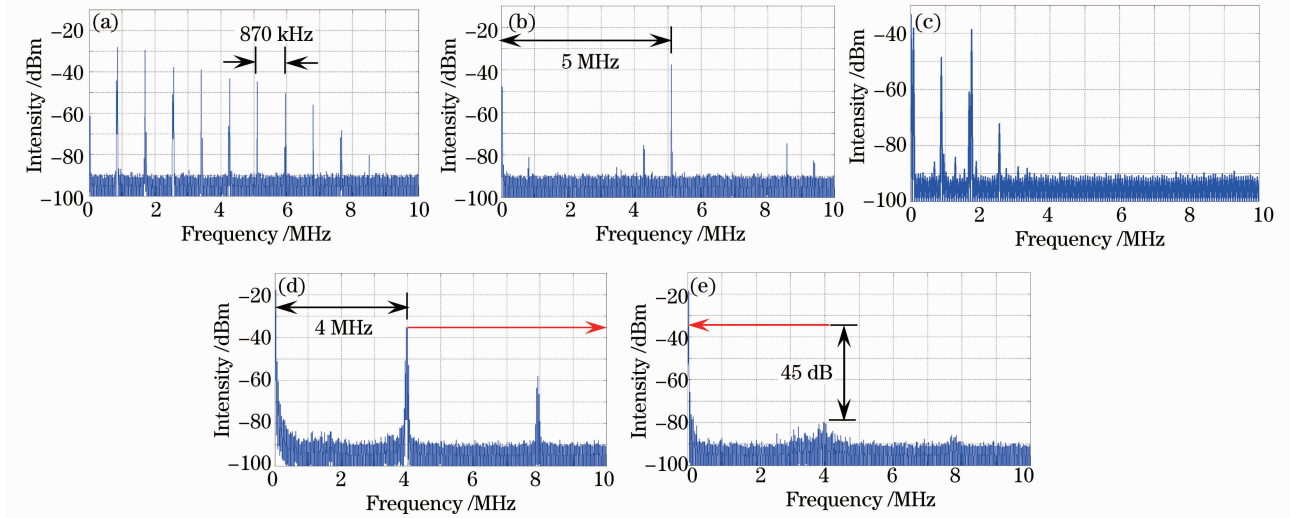


图3 激光输出光拍频频谱图。A组(a)无配置和(b)配置了FFL结构的测试结果；(c)B组配置FFL结构的测试结果；C组(d)无配置和(e)配置了FFL结构的测试结果

Fig. 3 Detected homodyne frequency spectra of proposed laser. Group A (a) without and (b) with FFL, respectively; (c) group B with FFL; group C (d) without and (e) with FFL, respectively

3.2 阈值与线宽测量及分析

实验中, $L_1 = 50$ m, $L_2 = 10$ m。首先测试了布里渊激光器输出功率特性曲线,如图4所示,抽运光功率在EDFA输出尾纤处进行测量,激光器输出功率在OC1的1%处进行测量,考虑OC1的分光比后,对其功率值进行了修正。假设抽运光与受激布里渊散射保持相同的偏振态,那么输入阈值功率 P_{th} 与有效腔长 $L_{eff} = [1 - \exp(-2\alpha L)]/2\alpha$ 成反比,表示为^[8]

$$\text{Rexp}(gP_{th}L_{eff}/A - \alpha L) = 1, \quad (3)$$

式中 $\alpha = 0.2$ dB/km 为单模光纤衰减系数, $g = 5 \times$

比分析。设A组为 $L_1 = 230$ m, $L_2 = 50$ m; B组为 $L_1 = 230$ m, $L_2 = 10$ m; C组实验所选长度 $L_1 = 50$ m, $L_2 = 10$ m。光纤长度分别为230、50、10 m对应的FSR分别为0.87、4、20 MHz。对于A组,图5(a)、(b)分别为无配置和配置了FFL结构的测试结果,可以观察到维纳效应,但在布里渊增益带宽内还存在边模,没有单模运行;B组中 L_1 比C组的 L_1 长,理论上分析也会获得比C组更低的阈值和更窄的线宽,但是不能和 L_2 很好地匹配,图5(c)为B组配置了FFL结构的测试结果,在0~4 MHz带宽内的边模没有被抑制掉,不能保证单模运行;而C组环长组合可以很好地匹配,图5(d)、(e)分别为无配置和配置了FFL结构的结果,在0~10 MHz布里渊增益带宽内没有边模存在,此时为单模运行状态,且相对于单环配置边模抑制比提高了45 dB。

10^{-11} m/W 为布里渊增益系数, $A = 8.5 \times 10^{-12}$ m² 为有效截面面积, $R \approx 0.99$ 为耦合比。考虑到整个环的3 dB损耗,所以将其改进后得到 $R' = 0.5 \times R = 0.495$,假设只有R1提供布里渊增益,可求得50 m环长的 P_{th} 为24 mW。进一步考虑到PC1、环形器的损耗,那么外部理论阈值功率为96 mW,图3为实际测得的激光器输出功率特性曲线,阈值输入功率为99 mW,在相同条件下,是已报道传统配置10 m单环BFL阈值(704 mW)的14%,与理论值相符。图5为抽运光和布里渊激光的光谱图,光谱仪分辨率为0.05 nm,可以观察到两波长相差大约0.08 nm,

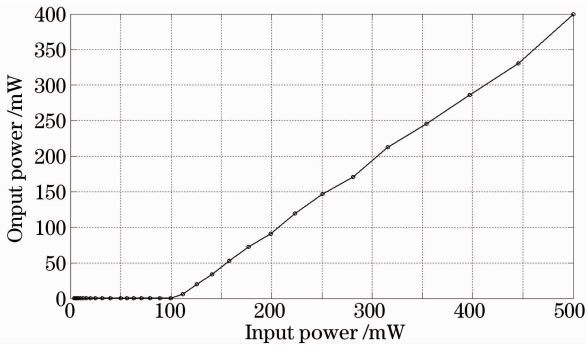


图 4 激光器输出功率特性曲线

Fig. 4 Brillouin laser output power as a function of pump power

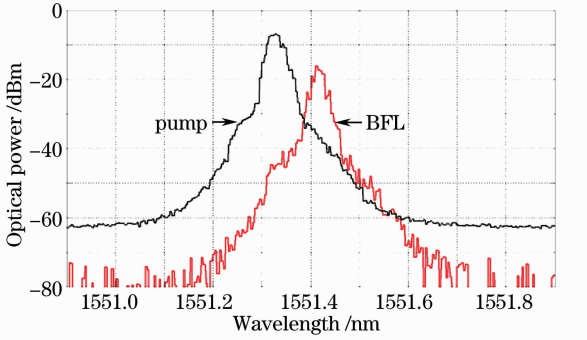


图 5 抽运光与激光器输出光谱

Fig. 5 Optical spectra of Brillouin pump and BFL

对应布里渊频移量为 10 GHz。

其次对布里渊激光器的线宽进行了测试。布里渊激光器的线宽 $\Delta\nu_{BFL}$ 与抽运光线宽 $\Delta\nu_P$ 关系可表示为^[12] (细化窄线宽理论, 将其中的参数进行详细介绍)

$$\Delta\nu_{BFL} = \frac{\Delta\nu_P}{\left(1 + \frac{\gamma_A}{\Gamma_C}\right)^2}, \quad (4)$$

式中 $\gamma_A = \pi\Delta\nu_B$ (布里渊增益带宽 $\Delta\nu_B = 20$ MHz) 为声波衰减率, $\Gamma_C = -c \ln R/nL$ 为腔损耗率。同样假设只有 R1 提供增益, 耦合比 $R = 0.495$, 理论线宽大约为抽运光的百分之一。用延时干涉的方法对其进行了测试, 如图 6(a) 所示, 激光器输出先通过一个 EDFA 进行放大, 然后一路经过 PC 后进入强度调制器(IM), PC 用来调节通过 IM 的激光偏振态, IM 调制 50 MHz 信号, 另一路经过 20 km 单模光纤的延时, 20 km 单模光纤对应的最小分辨率约为 10 kHz, 两路通过 50:50 的耦合器会合进入光电探测器(PIN), 用电谱仪(ESA)获取数据, 图 6(b) 为电

估计实际线宽约为 3.23 kHz。在相同条件下, 与传统配置 10 m 单环 BFL 的 6 kHz 线宽相比, 线宽有明显改进。

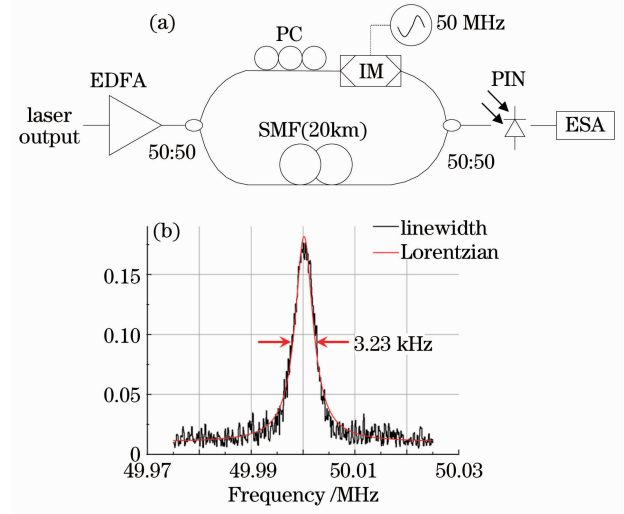


图 6 (a) 延时干涉系统; (b) 激光器线宽测试结果 (中心频率为 50 MHz, 范围为 50 kHz)

Fig. 6 (a) Delay interference system; (b) linewidth measurement of FFL-based BFL at center frequency of 50 MHz with span of 50 kHz

3.3 稳定性分析

影响 BFL 稳定性的三大因素有: 温度效应、非线性克尔效应和频率牵引效应。由于 FSR 和布里渊增益主要受温度影响, 因此输出的激光频率主要受温度影响, 那么对于基于 FFL 的 BFL 来说, 在两个连续基频之间发生跳变的温度范围可以近似表示为^[13-14]

$$\Delta T_{\text{mode-hopping}} \approx R_{\text{fs, min}} / \nu_B \left(\frac{1}{\nu_B} \frac{\partial \nu_B}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \right), \quad (5)$$

式中, 近似取主腔对应的基频 $R_{\text{fs, min}} = 4$ MHz, 对于单模光纤来说, 长度波动对应的温度系数为 $(1/L) \times (\partial L / \partial T) = 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 1550 nm 波段处布里渊频移温度系数为 $\partial \nu_B / \partial T = 1.04$ MHz/ $^\circ\text{C}$, 折射率温度系数为 $\partial n / \partial T \approx 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。可求得发生模式跳变的温度范围为 3.78 $^\circ\text{C}$, 此温度大于实验中温控系统的精度 0.5 $^\circ\text{C}$, 所以可以保证激光器输出频率不会发生跳模。反过来讲, 对于 50 m 的环长, 0.5 $^\circ\text{C}$ 会引起 50 μm 环长变化、0.52 MHz 的布里渊频移量以及 6×10^{-6} 的折射率变化, 因此还不能完全保证实验系统稳定至理想状态, 这也是下一步的实验工作。图 7 为对激光器 1 h 内的输出功率进行的测试, 输出功率波动为 0.8 dB。

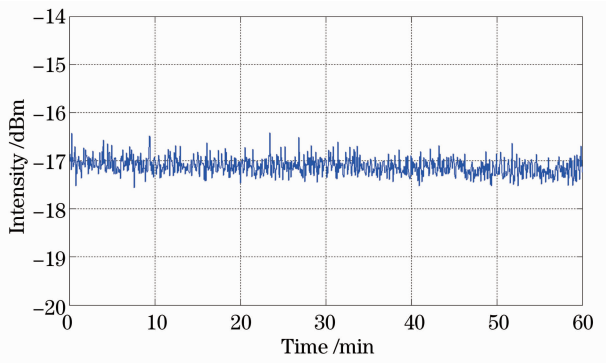


图7 1 h内激光输出功率变化

Fig. 7 Power fluctuation in 1 h

4 结 论

采用反馈光纤环的结构,搭建窄线宽单纵模布里渊激光器,主腔长度为50 m,反馈光纤环长度为10 m,根据维纳效应,得到了窄线宽单纵模布里渊激光器。实验测试得到激光器的阈值为99 mW,边模抑制比优化了45 dB,输出功率波动为0.8 dB。同时,利用延时干涉的方法,测得激光器线宽约为3.23 kHz,与理论分析吻合,为窄线宽高性能光纤激光器提供一定的参考。

参 考 文 献

- 1 Zhan Li, Gu Zhaochang, Xing Liang, *et al.*. Advances of fiber Brillouin lasers and amplifiers and their applications [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 901–911.
詹黎, 顾照昶, 邢亮, 等. 光纤布里渊激光器和放大器的研究进展及其应用[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 901–911.
- 2 Shen Ying, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. 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, 等. 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.

- 3 Yang Xiufeng, Li Qun, Tong Zhengrong, *et al.*. Research of a novel configuration of optically controlled delays based on stimulated Brillouin scattering [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0323003.
杨秀峰, 李群, 童峥嵘, 等. 基于受激布里渊散射的新型多级慢光延时结构的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0323003.
- 4 Chen Wei, Zhang Yan, Ren Min, *et al.*. Experimental study of single-longitudinal-mode Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1740–1744.
陈伟, 张艳, 任民, 等. 单纵模布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1740–1744.
- 5 Zhou Huijuan, Chen Mo, Chen Wei, *et al.*. Brillouin-erbium fiber laser with ultra-short ring cavity [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702010.
周会娟, 陈默, 陈伟, 等. 超短环形腔布里渊掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702010.
- 6 L Stokes, M Chodorow, H Shaw. All-fiber stimulated Brillouin ring laser with submilliwatt pump threshold [J]. Opt Lett, 1982, 7(10): 509–511.
- 7 P A Nicati, K Toyama, H J Shaw. Frequency stability of a Brillouin fiber ring laser [J]. J Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1445–1451.
- 8 G Wang, L Zhan, J Liu, *et al.*. Watt-level ultrahigh-optical signal-to-noise ratio single-longitudinal-mode tunable Brillouin fiber laser [J]. Opt Lett, 2013, 38(1): 19–21.
- 9 Z Wu, L Zhan, Q Shen, *et al.*. Ultrafine optical-frequency tunable Brillouin fiber laser based on fiber strain [J]. Opt Lett, 2011, 36(19): 3837–3839.
- 10 J Yong, L Thévenaz, B Kim. Brillouin fiber laser pumped by a DFB laser diode [J]. J Lightwave Technology, 2003, 21(2): 546–554.
- 11 C Yeh, T Huang, H Chien, *et al.*. Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation [J]. Opt Express, 2007, 15(2): 382–386.
- 12 A Debut, S Randoux, J Zemmouri. Linewidth narrowing in Brillouin lasers: theoretical analysis [J]. Phys Rev A, 2000, 62(2): 023803.
- 13 T Kurashima, T Horiguchi, M Tateda. Thermal effects of Brillouin gain spectra in single-mode fibers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2(10): 718–720.
- 14 P Nicati, K Toyama, S Huang, *et al.*. Temperature effects in a Brillouin fiber ring laser [J]. Opt Lett, 1993, 18(24): 2123–2125.

栏目编辑: 宋梅梅