

一种基于分布反馈光纤激光器的超窄线宽 布里渊光纤激光器

李亚方^{1,2}, 王春雨^{1,2}, 祁海峰², 李鲁艳^{1*}, 时书华¹, 倪家升², 赵燕杰¹

¹ 山东建筑大学理学院, 山东 济南 250101;

² 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250103

摘要 介绍了一种基于分布反馈光纤激光器的超窄线宽布里渊光纤激光器。采用布里渊环形腔结构,以分布式反馈光纤激光器作为布里渊泵浦光源,以输出波长为 980nm 的半导体激光器作为腔内掺铒激光放大的泵浦光源,实现了超窄线宽的布里渊激光输出。布里渊环形腔腔长为 10 m,加偏振控制后可获得单频布里渊激光输出。为保证激光器的单纵模输出,分布反馈光纤激光器和半导体激光器泵浦光源功率应分别不低于 20 mW 和 50 mW。泵浦光源输出功率最大为 250 mW 时,最终布里渊激光输出功率超过 15 mW,线宽可小于 100 Hz。

关键词 光纤激光器; 超窄线宽; 分布式反馈; 布里渊光纤激光器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.071401

An Ultra-Narrow Linewidth Brillouin Fiber Laser Based on Distributed Feedback Fiber Laser

Li Yafang^{1,2}, Wang Chunyu^{1,2}, Qi Haifeng², Li Luyan^{1*},
Shi Shuhua¹, Ni Jiasheng², Zhao Yanjie¹

¹ Science of School, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China;

² Laser Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250103, China

Abstract This paper introduces an ultra-narrow linewidth Brillouin fiber laser based on distributed feedback fiber laser. By constructing a Brillouin ring cavity structure, a distributed feedback fiber laser is used as the Brillouin pump, a 980 nm semiconductor laser is used as the pump source for the intra-cavity erbium-doped laser amplification, thereby the Brillouin laser output with ultra-narrow linewidth is achieved. The Brillouin ring cavity is about 10 meters long, and a single longitudinal mode Brillouin laser is obtained with a proper polarization control. To ensure the single longitudinal mode laser output, the power of the distributed feedback fiber laser and the 980 nm pump source should be no less than 20 mW and 50 mW, respectively. With the output power of the pump source up to 250 mW, the final Brillouin laser output power exceeds 15 mW, and the linewidth is estimated to be less than 100 Hz.

Key words fiber laser; ultra-narrow linewidth; distributed feedback; Brillouin laser

OCIS codes 140.3510; 060.3510; 290.5830

1 引言

百 Hz 量级的超窄线宽激光器广泛应用于高精度光纤传感、远程相干光通信、高分辨率雷达成像等领域^[1-4],其性能直接影响传感、成像的精度以及光通信的距离。光纤系统中常用的窄线宽激光器有半

导体激光器、固体激光器和光纤激光器。光纤激光器由于泵浦转换效率和输出功率都比较高,且光纤系统兼容性好,因此在光纤通信、传感系统中得到了广泛的应用^[5]。光纤中实现百 Hz 线宽输出的技术主要有 Pound-Drever-Hall 技术、光注入锁定、饱和吸收体和优化腔结构的方式^[6-8]。除此之外,还有基

收稿日期: 2019-10-31; 修回日期: 2019-11-01; 录用日期: 2019-11-06

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2016FM33)、山东省重点研发计划(2019GGX104076,2019GSF111011)

* E-mail: liluyan@sdjzu.edu.cn

于光纤中受激布里渊散射(SBS)的技术。

早在1972年,SBS技术就被广泛关注^[9],它是光纤传输中效率最高的非线性现象。具有低阈值功率、超窄线宽增益和极高的转换效率,可实现性能独特的超窄线宽激光输出^[10]。一般的布里渊光纤激光器(BFL)仅具有布里渊增益,为了获得单波长、单纵模的布里渊激光,需要将布里渊腔长缩短至m级,但其布里渊泵浦功率阈值非常高^[11]。Harun等^[12-13]使用一种非线性光纤作为布里渊增益制作低阈值的紧凑环形腔。Chen等^[14]采用布里渊和掺铒光纤混合增益的同时,使用一段保偏的掺铒光纤(EDF)作为布里渊增益和线性增益介质,获得了紧凑型布里渊环形腔单纵模激光器。

线宽约几千Hz的窄线宽激光器多用于相干传感和分布式传感领域^[15-16],通常需要通过外腔反馈半导体激光器^[17]、短线性腔光纤激光器^[18]和环形腔光纤激光器^[19]获得。线宽约百Hz量级的激光器能够提供更长的相干长度,实现更高灵敏度的感知和更长距离的探测,在传感和探测领域有很大的应用价值,因此,更窄线宽、更高稳定度的激光器近几年备受科研人员的关注^[20-21]。百Hz量级的超窄线宽光纤激光器在国外出现得较早,早在1991年,Smith等^[22]就利用受激布里渊散射实现了30Hz的超窄线宽激光输出,美国的Xiang等^[23]通过半导体芯片和扩展的Si₃N₄布拉格光栅技术实现了320Hz的超窄线宽激光输出,此类激光器在一些国家已实现了产业化。国内重庆大学实验室通过瑞利散射和布里渊散射相结合的方法实现了超窄线宽激光输出,线宽可达75Hz^[24],但该方法光路较为复杂,仍处于实验室阶段。

本文介绍的布里渊光纤激光器采用腔内掺铒光放大的布里渊环形腔结构,以线宽为kHz量级的分布反馈光纤激光器(DFB-FL)作为布里渊泵浦光源,腔内使EDF放大的泵浦光源是输出波长为980nm的半导体激光器,从而在腔内激发布里渊光,实现超窄线宽的布里渊激光输出。DFB-FL具有体积小、结构紧凑、单纵模稳定、线宽窄、易于集成等优点,是布里渊泵浦的最佳选择。

2 基本原理

2.1 光纤中的布里渊散射

光纤中的布里渊散射是注入的光波场与光纤中的弹性声波场相互耦合产生的一种非线性光散射现

象,可看作是激光产生芯层中的三波相互作用^[25]。由于电致伸缩效应,作为泵浦的入射光在光纤中激发出声波,泵浦光被声波散射后产生频率下移的斯托克斯(Stokes)光,三波相互作用过程中,满足能量和动量守恒,即

$$\omega_A = \omega_P - \omega_S, \quad (1)$$

$$K_A = K_P - K_S, \quad (2)$$

式中, ω_A 、 ω_P 、 ω_S 分别为声波、泵浦光、Stokes光的能量, K_A 、 K_P 、 K_S 分别为声波、泵浦光、Stokes光的动量。光纤的波导结构导致光只能在两个方向传播,当泵浦光和Stokes光传播方向相反时,增益能达到最大,此时Stokes光频率下移量可表示为

$$M_B = 2n\nu_A/\lambda_P, \quad (3)$$

式中, M_B 为Stokes光频率下移量, n 为光纤折射率, ν_A 为光纤中的声速, λ_P 为泵浦光波长。

2.2 线宽压缩机制

布里渊光纤激光器特有的线宽压缩能力,能够将线宽较宽的布里渊泵浦光转换为线宽极窄的布里渊Stokes光。Smith等^[22]在1991年用实验证明了线宽为120kHz的布里渊泵浦光经布里渊光纤激光器后被转换成线宽为2kHz的布里渊激光。2000年,Debut等^[25]利用SBS耦合波方程对BFL的线宽压缩效应进行理论研究,得出布里渊泵浦光的线宽 Δl_P 与布里渊Stokes激光的线宽 Δl_S 之间满足的比例关系可表示为

$$\Delta l_S = \frac{\Delta l_P}{\left(1 + \frac{\pi \Delta l_B}{-c \ln R / nL}\right)^2}, \quad (4)$$

式中, Δl_B 为布里渊增益谱宽, L 为光纤长度, c/n 为光纤中的光速(c 为真空中的光速), R 为BFL腔的振幅反馈系数。对于一个全光纤谐振腔,(4)式中的分母部分可以达到 10^4 量级^[26]。若入射的布里渊泵浦光线宽为1MHz,理论上可以输出线宽约为100Hz的Stokes激光。

3 实验设计与结果分析

超窄线宽布里渊掺铒光纤激光器采用的环形腔结构如图1所示,其中CIR为环形器,PC为偏振控制器,BF-filter为带通滤波器,OC为光耦合器,ISO为光隔离器,WDM为光波分复用器。为满足单纵模工作条件,将腔长设为10m,腔内包括3m长的EDF,型号为EDFL-980-HP,在波长为980nm附近吸收值为13dB/m。实验中,输出波长为980nm的泵浦光源用作腔内EDF的放大,其最大输出功率

为250 mW,DFB-FL用作布里渊泵浦光源,最大输出功率和中心波长分别为110 mW和1550.07 nm,带通滤波器的中心波长为1550.12 nm,带宽为0.11 nm,位于光路中以限制激光工作模式。DFB-FL发出的窄线宽激光进入环行器并在进入光耦合器之前激发出单模光纤中的布里渊散射光,后向布里渊散射光沿环形腔逆时针方向传播并经EDF放大。工作波长为(1550±20) nm的隔离器放置在EDF和光耦合器之间,阻止来自EDF的残余波长为980 nm的泵浦光,同时使波长为1550 nm激光在环形腔中单向传播。

DFB-FL组成结构如图2所示,其中980 nm pump是一个输出波长为980 nm半导体激光器,



图2 DFB-FL组成结构图

Fig. 2 Composition diagram of DFB-FL

当布里渊散射光的增益超过损耗时,布里渊光纤激光器会以逆时针方向连续从光耦合器发射激光。由于在单模光纤中往往存在两个正交的偏振态,因此,产生的激光也容易形成两个偏振态模式,如图3(a)所示,可以发现两波长差为5 pm,光强几乎相等。为进一步压缩激光线宽、消除多偏振态,系

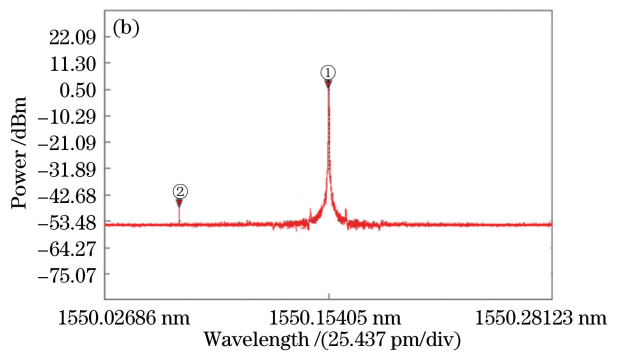
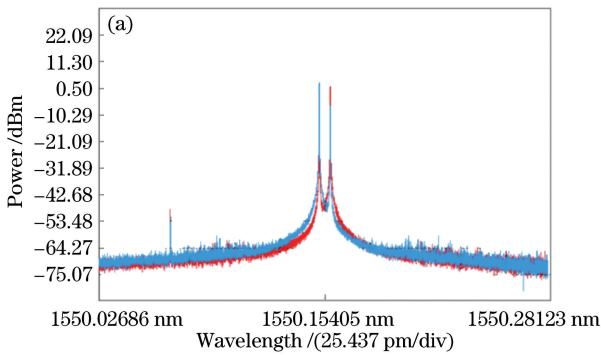


图3 两种情况下的布里渊光谱图。(a)无偏振控制;(b)有偏振控制

Fig. 3 Laser spectra of the Brillouin fiber laser in two cases. (a) Without polarization control; (b) with polarization control

3.1 布里渊光纤激光器的输出功率与输出波长为980 nm泵浦光源功率的关系

为研究布里渊光纤激光器的输出功率与输出波长为980 nm的泵浦光源功率的关系,设定DFB-FL的功率分别为20,40,60,80,100,110 mW,耦合器的耦合比分别为90:10和70:30,在保持DFB-FL功率恒定的条件下,逐渐增加输出波长为980 nm的泵浦光源功率,测得布里渊光纤激光器的输出功率变化曲线如图4所示。

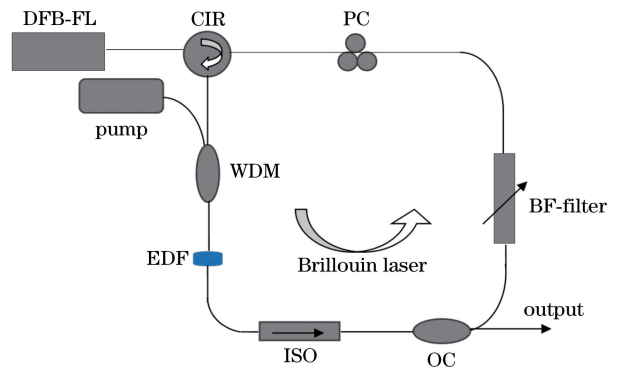


图1 布里渊环形腔结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the Brillouin ring cavity laser
FBG是光纤布拉格光栅,amplifying light path是放大光路。

统中插入了偏振控制器,从而实现单波长激光输出,结果如图3(b)所示。在具有偏振控制的布里渊光谱中,1550.154 nm处的主激光①与较低波长处的弱泵浦激光②之间的波长差约为0.088 nm,恰好对应约11 GHz的布里渊频移。

从图4中可看出,在DFB-FL功率一定的条件下,布里渊光纤激光器的输出功率随泵浦光源功率的增加而增加,且泵浦光源功率需满足特定的阈值条件才能产生布里渊光。采用两个耦合比不同且阈值相差较大的耦合器,如图4(a)所示90:10的耦合器,其阈值都在50 mW附近;如图4(b)所示70:30的耦合器,其阈值相对前者有所不同,但可以发现输出波长为980 nm的泵浦光源功率的阈值随DFB-FL功率的变化而变化,DFB-FL功率越大,其阈值也越大。

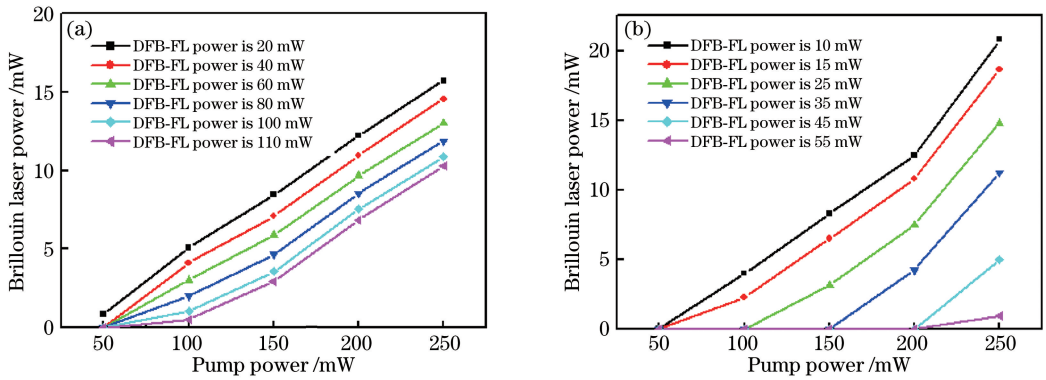


图 4 布里渊光输出功率与 980 nm 泵浦光功率关系曲线图。(a) 90 : 10 耦合器对应关系图;(b) 70 : 30 耦合器对应关系图
Fig. 4 Output power graph of the Brillouin fiber laser versus 980 nm pump optical power. (a) 90 : 10 coupler correspondence diagram; (b) 70 : 30 coupler correspondence diagram

3.2 布里渊光纤激光器的输出功率与 DFB-FL 功率的关系

输出波长为 980 nm 的泵浦光源功率分别为 50, 100, 150, 200, 250 mW, 在此功率一定的条件下, 逐渐增加 DFB-FL 功率, 得到不同耦合输出比情况下的布里渊光纤激光器的输出功率, 如图 5 所示。

由图 5 可明显看出布里渊光纤激光器的输出功率对应 DFB-FL 功率的关系, 且不同耦合比的耦合器对应的关系曲线差别较大。采用耦合比为 90 : 10 的耦合器时, 其输出功率随 DFB-FL 功率的增大减小得较缓慢, 在某个特定的 980 nm 泵浦光源功

率下, 当 DFB-FL 功率低于阈值时, 无布里渊激光发出, 实验用的 DFB-FL 功率不够高, 但可根据曲线推测当 DFB-FL 功率足够高时, 布里渊光纤激光器输出功率可能降为零; 对于耦合比为 70 : 30 的耦合器, 其输出功率随 DFB-FL 功率的增大而降低得较快, 由图 5 可看出在某个一定 980 nm 泵浦功率下, 当 DFB-FL 功率低于或高于阈值时, 都没有布里渊光输出。两耦合比的输出功率不同主要是因为随着输出耦合比的增加, 允许输出腔外的激光功率比例增加, 但耦合比越大腔损也越大, 这就导致图 5 (b) 的功率下降趋势更明显。

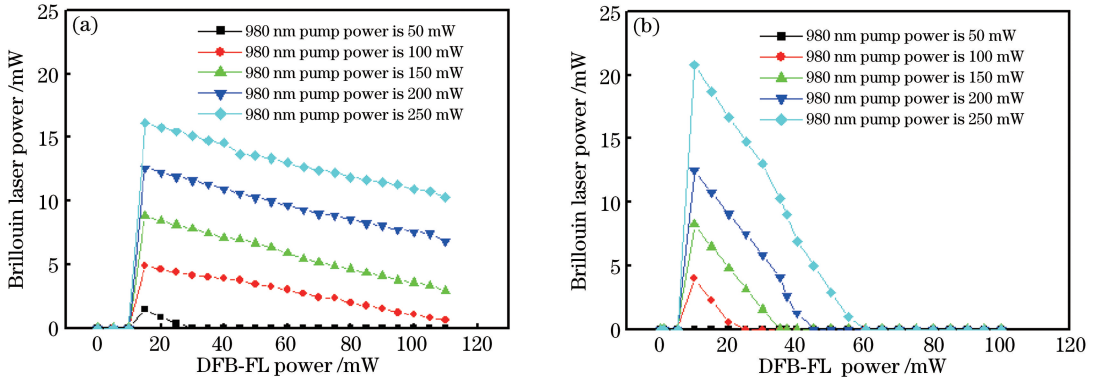


图 5 布里渊光纤激光器的输出功率与 DFB-FL 功率关系曲线图。(a) 90 : 10 耦合器对应关系图;
(b) 70 : 30 耦合器对应关系图

Fig. 5 Output power graph of the Brillouin fiber laser versus DFB-FL power. (a) 90 : 10 coupler correspondence diagram; (b) 70 : 30 coupler correspondence diagram

两者相同的是当布里渊光纤激光器以稳定的单纵模运行时, 激光功率随 DFB-FL 功率的增加呈线性下降趋势。在实验中, 当 DFB-FL 功率不够高时, 激光器作为普通环形腔工作在多模状态下, 其波长在带通滤波器的中心波长附近; 当 DFB-FL 功率很高时, 布里渊光将会变得非常弱, 但不会出现多模现象。

激光线宽测试原理如图 6 所示, 使用 55 km 长的

光纤干涉仪采用自零差法测量, 55 km 长的光纤延迟对应 1550 nm 处的激光线宽约为 5 kHz。图中 PD 为光探测器, DAQ 为数据采集卡, PC 为计算机。

首先测得 DFB-FL 的线宽小于 2 kHz, 假设线宽符合洛伦兹线型, 则测得 -20 dB 频谱宽度应低于 40 kHz, 表明实际的激光洛伦兹线宽应低于 2 kHz。因布里渊环形腔的线宽压缩机制, 输出激

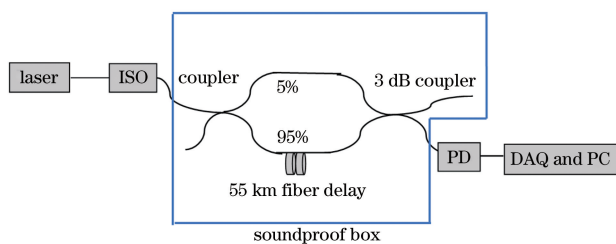


图 6 线宽测试原理图

Fig. 6 Schematic diagram for linewidth test

光具有超窄线宽,用以上装置测量的布里渊光纤激光器和 DFB-FL 的线宽谱的结果如图 7 所示。

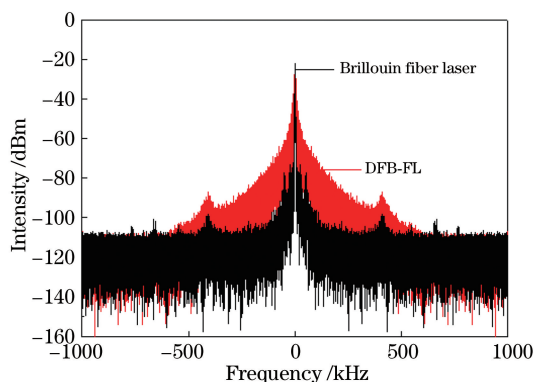


图 7 布里渊光纤激光器和分布反馈光纤激光器的线宽对比图

Fig. 7 Linewidth of the Brillouin fiber laser and DFB-FL

由图 7 可知,布里渊光纤激光器的线宽比 DFB-FL 的线宽要窄得多,因此估计布里渊光纤激光器的线宽小于 1 kHz,超出了实验测试仪器的测量极限。此外选用线宽为 100 kHz 的可调谐激光器作为布里渊泵浦光源,以验证线宽压缩和变窄效应,结果显示缩窄系数(定义为布里渊泵浦激光器与布里渊光纤激光器的线宽比)约为 40 kHz,可调谐激光器与布里渊光纤激光器的线宽比较如图 8 所示。

将商用窄线宽光纤激光器(NKT X15)和实验中使用的布里渊光纤激光器的线宽进行对比,结果如图 9 所示。图中的曲线已经过平滑处理,为得到更清晰的对比效果,将图像放大 10 倍。虽然无法测量布里渊光纤激光器的线宽,但通过 NKT X15 的标称线宽小于 100 Hz,对比可知布里渊光纤激光器的线宽小于 100 Hz。

4 结 论

通过搭建布里渊环形腔结构,用分布反馈光纤激光器作为布里渊泵浦光源,用输出波长为 980 nm 的半导体激光器作为腔内线性放大的泵浦光源,设

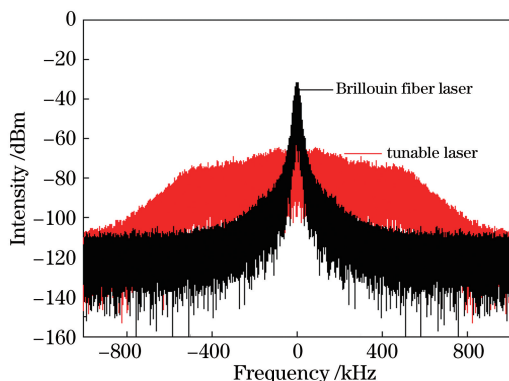


图 8 可调谐激光器与布里渊光纤激光器的线宽

Fig. 8 Linewidth of the tunable laser and Brillouin fiber laser

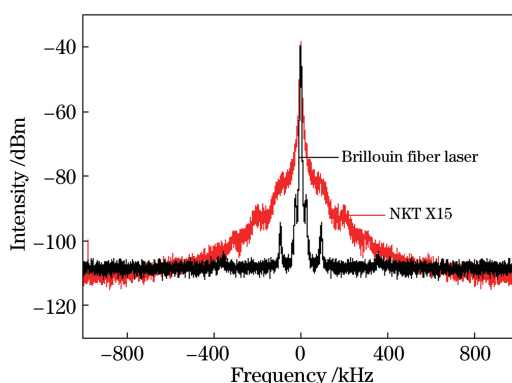


图 9 NKT X15 激光器与布里渊光纤激光器的线宽

Fig. 9 Linewidth of the Brillouin fiber laser and NKT X15 laser

计了线宽超窄的布里渊掺铒光纤激光器,实验预测其输出激光线宽可低于 100 Hz,单波长和单偏振模式下的输出光功率超过 15 mW。

参 考 文 献

- [1] Burrows E C, Liou K Y. High resolution laser LIDAR utilising two-section distributed feedback semiconductor laser as a coherent source [J]. Electronics Letters, 1990, 26(9): 577-579.
- [2] Libatique N, Wang L, Jain R. Single-longitudinal-mode tunable WDM-channel-selectable fiber laser[J]. Optics Express, 2002, 10(25): 1503-1507.
- [3] Fang X J. A variable-loop Sagnac interferometer for distributed impact sensing [J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(10): 2250-2254.
- [4] Wang J, Luo H, Meng Z, et al. Experimental research of an all-polarization-maintaining optical fiber vector hydrophone [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1178-1184.
- [5] Chen C Y, Choy M M, Andrejco M J, et al. A

- widely tunable erbium-doped fiber laser pumped at 532 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, 2(1): 18-20.
- [6] Svelto C, Bava E, Taccheo S, et al. Pound-drever frequency-stabilised Yb-Er: glass laser against C₂H₂ molecule at 1.534097 μm [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(5): 461-462.
- [7] Horowitz M, Daisy R, Fischer B, et al. Narrow-linewidth, singlemode erbium-doped fibre laser with intracavity wave mixing in saturable absorber [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(8): 648-649.
- [8] Matsuura M, Kishi N. Frequency control characteristics of a single-frequency fiber laser with an external light injection [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(1): 55-58.
- [9] Ippen E P, Stolen R H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(11): 539-541.
- [10] Zhan L, Gu Z C, Xing L, et al. Advances of fiber Brillouin lasers and amplifiers and their applications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4): 901-911.
詹黎, 顾照昶, 邢亮, 等. 光纤布里渊光纤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.
- [11] Ahmad H, Razak N F, Zulkifli M Z, et al. Ultra-narrow linewidth single longitudinal mode Brillouin fiber ring laser using highly nonlinear fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(10): 105105.
- [12] Harun S W, Shahi S, Ahmad H. Compact Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(1): 46-48.
- [13] Chen M, Meng Z, Zhang Y C, et al. Ultranarrow-linewidth Brillouin/erbium fiber laser based on 45-cm erbium-doped fiber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1500606.
- [14] Chen M, Meng Z, Sun Q, et al. Mechanism and characteristics of a fast-tuning Brillouin/erbium fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15039-15048.
- [15] Wang C, Wang C, Shang Y, et al. Distributed acoustic mapping based on interferometry of phase optical time-domain reflectometry [J]. *Optics Communications*, 2015, 346: 172-177.
- [16] Wong A C L, Chen D, Wang H J, et al. Extremely short distributed Bragg reflector fibre lasers with sub-kilohertz linewidth and ultra-low polarization beat frequency for sensing applications [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(4): 045202.
- [17] Li Q, Yan F P, Peng W J, et al. A single-frequency, ring cavity Tm-doped fiber laser based on a CMFBG filter [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(9): 095105.
- [18] Hu H W, Xiao P P. Study on highly stable single-frequency Brillouin fiber laser [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2012, 42(7): 731-736.
- [19] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. 4th ed. New York: Academic Press, 2007: 195-211.
- [20] Zou H, Xiong H, Zheng Y R. Tunable self-seeded multiwavelength Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1001001.
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): 1001001.
- [21] Ji Z Y, Deng Y X, Zhang Z X. Tunable multiwavelength Brillouin random fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0901002.
吉照宇, 邓宇翔, 张祖兴. 可调谐多波长布里渊随机光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0901002.
- [22] Smith S P, Zarinetchi F, Ezekiel S. Narrow-linewidth stimulated Brillouin fiber laser and applications [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(6): 393-395.
- [23] Xiang C, Morton P A, Bowers J E. Ultra-narrow linewidth laser based on a semiconductor gain chip and extended Si₃N₄ Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3825-3828.
- [24] Huang S H, Zhu T, Yin G L, et al. Tens of hertz narrow-linewidth laser based on stimulated Brillouin and Rayleigh scattering [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5286-5289.
- [25] Debut A, Randoux S, Zemmouri J. Linewidth narrowing in Brillouin lasers: theoretical analysis [J]. *Physical Review A*, 2000, 62(2): 023803.
- [26] Geng J H, Staines S, Wang Z L, et al. Highly stable low-noise Brillouin fiber laser with ultranarrow spectral linewidth [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(17): 1813-1815.