

可调谐多波长布里渊随机光纤激光器

吉照宇**, 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 提出了一种可调谐多波长布里渊随机光纤激光器, 其具有半开腔结构, 一端利用 3 dB 耦合器构成全反端, 另一端利用单模光纤中随机分布的瑞利散射作为反射, 经掺铒光纤放大器放大后的布里渊抽运光, 在长单模光纤中形成级联的高阶受激布里渊散射, 即实现多波长布里渊随机激光输出。实验结果表明: 当布里渊抽运波长为 1530 nm 时, 从该激光器最多可获得 7 个斯托克斯波长的随机激光输出; 通过改变布里渊抽运功率及掺铒光纤抽运激光功率, 研究了功率的大小对多波长随机激光输出的影响。此外, 通过改变布里渊抽运激光波长, 实现了多波长布里渊随机激光在 1515~1565 nm 范围内的调谐。

关键词 激光器; 随机激光; 光纤激光; 受激布里渊散射; 瑞利散射

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0901002

Tunable Multiwavelength Brillouin Random Fiber Laser

Ji Zhaoyu**, Deng Yuxiang, Zhang Zuxing*

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

Abstract We propose a novel tunable multiwavelength random fiber laser based on Brillouin scattering with half-open cavity, and it's formed by total reflection of a connected 3 dB coupler and randomly distributed Rayleigh scattering in single mode fiber. When the Brillouin pump power amplified by the erbium-doped fiber amplifier is high enough, it is possible to generate cascaded high-order stimulated Brillouin scattering in the long single-mode fiber and achieve multiwavelength Brillouin random laser output. The results show that when Brillouin pump wavelength is 1530 nm, at best seven multiwavelength Stokes have been obtained from the Brillouin random fiber laser. We study the influence of the pump power on the output of multiwavelength random lasers by changing the Brillouin pump power and erbium-doped fiber pumped laser power. Additionally, by changing the wavelength of Brillouin pump, we find that the output wavelength of the Brillouin random laser can be tunable in wavelength range from 1515 nm to 1565 nm.

Key words lasers; random laser; fiber laser; stimulated Brillouin scattering; Rayleigh scattering

OCIS codes 060.3510; 060.2410; 290.5830

1 引言

近几十年来,随机激光在光纤传感、物理光学成像、光谱测量、微波光子和生物医学等领域的潜在应用引起了学者们的研究兴趣^[1-4]。随机激光没有固定的光学谐振腔,工作原理是通过光在无序介质中多次散射来实现反馈,散射光的干涉效应在特定频率下产生谐振模式,随机激光随之产生^[5]。随机激

光器具有光学谐振腔不严格,可同时产生多个非相干激光模式等优点,但又具有发射光谱对角度高依赖和阈值功率高等缺点。光纤作为一种具有二维约束性能的波导,被选择用来改善随机激光性能。2010年, Turitsyn 等^[6]首次报道了一种基于瑞利散射随机分布反馈的随机光纤激光器,在全长 83 km 的传统光纤中利用分布式拉曼光纤增益放大器,获得了稳定的随机激光信号输出。2011年, Vatik

收稿日期: 2018-03-21; **修回日期:** 2018-04-12; **录用日期:** 2018-04-24

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

* **E-mail:** zxzhang@njupt.edu.cn; ** **E-mail:** 350388080@qq.com

等^[7]报道了基于拉曼增益和瑞利散射随机分布反馈产生的级联随机激光,实验获得了波长在 $1.2\ \mu\text{m}$ 的第二级斯托克斯随机信号。2013年,Zhang等^[8]提出了一种利用色散补偿光纤和单模光纤(SMF)混合构成的半开放随机激光腔,从拉曼随机光纤激光器中分别获得了一阶和二阶斯托克斯随机激光。但是,基于拉曼散射级联产生的随机激光具有明显的缺点,即阈值功率较高(第二阶斯托克斯线的阈值超过 $1\ \text{W}$),产生的斯托克斯线数量少(不超过三阶斯托克斯线),波长间距大(约 $100\ \text{nm}$)等。

受激布里渊散射(SBS)被广泛应用于实现具有精确和稳定的波长间隔以及大量斯托克斯线级联的多波长光纤激光器中。基于瑞利散射所形成的随机分布式反馈,实现将SBS增益与掺铒光纤放大器(EDFA)增益或受激拉曼散射增益相结合,例如多波长布里渊-掺铒光纤/拉曼随机激光器。Pang等^[9]报道了一种相干布里渊随机光纤激光器,以一段非均匀光纤中的瑞利散射作为随机分布反馈,传统单模光纤中布里渊散射作为增益,获得了稳定的单峰窄线宽布里渊随机激光输出。对于应用于密集波分复用系统的多波长光纤激光器,要求其各信道输出功率尽可能平坦,可通过降低随机多波长激光峰值功率差异来提高功率平坦性。文献^[10]采用半开腔设计,研究发现在奇数阶和偶数阶斯托克斯峰值之间功率差异可以变小。Cholan等^[11]也设计了一个半开放腔,其一端采用色散补偿光纤形成一个环形反射端,利用在色散补偿光纤中的四波混频将第1和第5输出信道之间的峰值功率差降低到 $4.59\ \text{dB}$,但其输出功率包含传输的布里渊抽运光源(BP)功率。黄昌青等^[12]设计了一种具有可调谐功能的半开腔多波长随机光纤激光器,最终得到仅包含3个波长的随机激光输出。此后,越来越多的基于布里渊散射的随机光纤激光器的文献被报道^[13-16],但大多采用环形结构,线性结构的

半开腔布里渊随机光纤激光器仍鲜有报道。

本文研究了一种可调谐多波长布里渊随机光纤激光器,其一端利用 $3\ \text{dB}$ 耦合器构成全反端,另一端利用SMF中随机分布的瑞利散射效应形成另一个等效“腔镜”,因此所构成的激光腔为一个半开放式腔线性结构。利用SMF中瑞利散射随机分布反馈效应,经EDFA放大后的BP可在SMF中产生级联的高阶SBS,实现多波长布里渊随机激光输出。通过改变布里渊抽运功率及 $980\ \text{nm}$ 激光器功率,研究了其功率大小对随机激光输出的影响,实验最终获得了最多7个斯托克斯信号波长输出,这比已报道的结果有所提高。改变布里渊抽运的输入波长还可实现对随机激光的调谐,即实现随机激光在 $50\ \text{nm}$ ($1515\sim 1565\ \text{nm}$)范围内的调谐。

2 实验结构与原理

基于布里渊-掺铒光纤混合增益的可调谐多波长随机光纤激光器的示意图如图1所示。该激光器是一个半开放式腔线性结构,包含作为非线性增益介质的SMF,其长度为 $10\ \text{km}$,一段 $3\ \text{m}$ 长掺铒光纤通过一个 $980/1550\ \text{nm}$ 波分复用器(WDM),由最大输出功率为 $500\ \text{mW}$ 的 $980\ \text{nm}$ 激光抽运,用于在激光器中提供线性增益。具有 $970\sim 1680\ \text{nm}$ ($710\ \text{nm}$)调谐范围和输出功率范围为 $7.4\ \text{dBm}\sim 12.4\ \text{dBm}$ 的可调谐激光器(TL)作为BP,它通过环形器(cir)和一个 $3\ \text{dB}$ 耦合器(C1)耦合到腔内,另一个 $3\ \text{dB}$ 耦合器(C2)将其同侧两端口直接连接起来,起到宽带光纤反射镜的作用,这样就可在此激光器的抽运端为斯托克斯光提供较强的反馈。长SMF的尾端采用切斜角端面以避免端面菲涅耳反射的影响,从而保证稳定随机激光的产生。同时环形器的3端口还作为激光输出,输出随机多波长信号用光谱仪(AQ-6370D)进行测量。

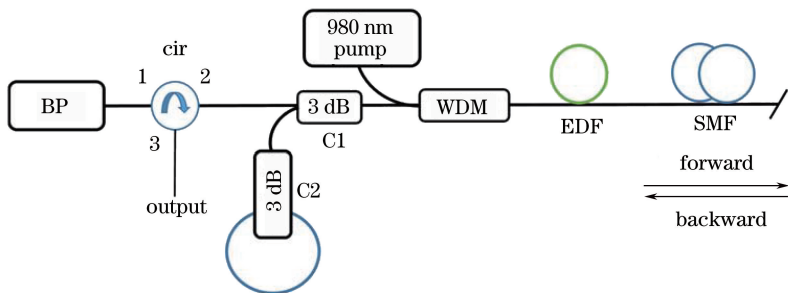


图1 可调谐多波长布里渊随机激光器示意图

Fig. 1 Experimental setup of a tunable multiwavelength Brillouin random fiber laser

随机光纤激光器工作原理如下:BP 激光通过环形器的 1 端口到 2 端口,再经 C1 耦合进入到腔内,经过 EDFA 放大后进入 10 km 长的 SMF 中,当 BP 功率超过 SBS 阈值时产生背向一阶布里渊斯托克斯光(BS1),同时产生背向传输的瑞利散射。由于 SBS 的反向特性,BS1 信号由反方向进入 C1,一部分信号经 C1 到环形器再由 2 端口进入 3 端口输出,另一部分经过由 C2 构成的宽带光纤环反射镜进行反射后再经过 EDFA 作为新的 BP 信号,如果功率达到 SBS 阈值就在 10 km 长 SMF 中产生下一级斯托克斯光,并同时发生反向瑞利散射,这个循环重复进行,直至激光器内部的总体增益低于工作波长的损耗。

3 实验结果

测定了没有外加 BP 时激光器的输出特性,结果如图 2 所示。最大激光器自激发振荡出现在 1530 nm 附近,说明该激光器的净增益最大值在 1530 nm 波段附近。

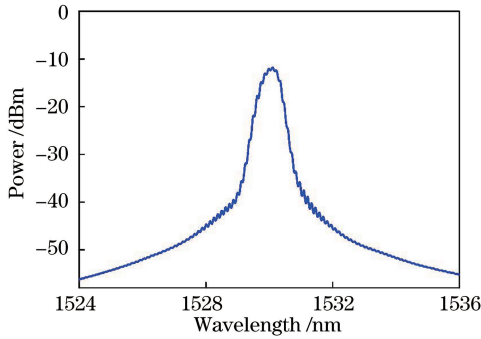


图 2 随机激光器在 1530 nm 波段的自激发振荡

Fig. 2 Self excited oscillation of random laser at 1530 nm band

固定 BP 的波长为 1530 nm,功率为 7.4 dBm,调节 980 nm 抽运功率,测得不同 980 nm 抽运功率下的激光器输出随机信激光光谱。BP 功率为 7.4 dBm 时,不同 980 nm 抽运功率下的随机激光器输出光谱如图 3 所示。由图 3 可知,当 980 nm 抽运功率相对较低时,在 BP 信号的左右两侧形成由自发布里渊散射所产生的 BS1 和反斯托克斯光,其光强度随 980 nm 抽运功率的增加而增大;当 980 nm 抽运功率增大到 75 mW,达到 SBS 阈值时,产生不稳定的 BS1;当 980 nm 抽运功率达到 87 mW 时,获得稳定的 BS1 输出。在这一点上,BS1 的峰值强度明显高于 BP 的峰值强度,光谱保持稳定,相邻两个波长间的中心波长间隔为 0.088 nm。

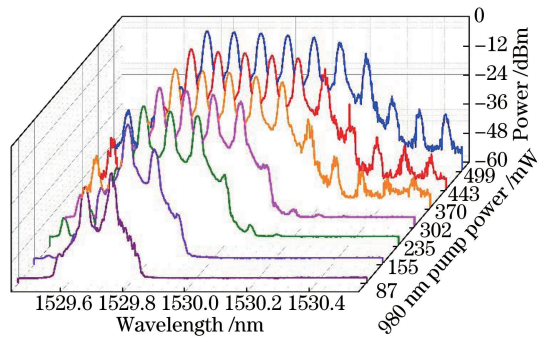


图 3 BP 功率为 7.4 dBm 时,不同 980 nm 抽运功率下的随机激光器输出光谱图

Fig. 3 Output spectra of the random lasers at different 980 nm pump powers with BP power fixed at 7.4 dBm

当 980 nm 抽运功率进一步增大到 145 mW 时,产生不稳定的二阶斯托克斯光(BS2)信号,此时 BS1 光的强度保持相对稳定;当 980 nm 抽运功率增大到 155 mW 时,此时的功率已高于 BS2 信号的阈值功率,同时获得了 BS1、BS2 两个稳定的斯托克斯波长输出,BS2 和 BS1 中心波长间隔为 0.088 nm;当 980 nm 抽运功率为 235 mW 时,3 个稳定的斯托克斯输出波长被获得,其中还包括了功率较小的更高阶斯托克斯光与反向斯托克斯光;当 980 nm 抽运功率增大到 485 mW 时,输出的斯托克斯激光波长数增加到 7 个,前 6 个 BS 信号的峰值功率明显稳定。实验结果表明,随 980 nm 抽运功率的增加,整个 EDFA 可以为激发高阶斯托克斯光提供更大的增益,使随机激光器的输出多波长数量增加。当 980 nm 抽运功率达到 500 mW 时,输出结果如图 4 所示,最终获得了 7 个多波长的输出。

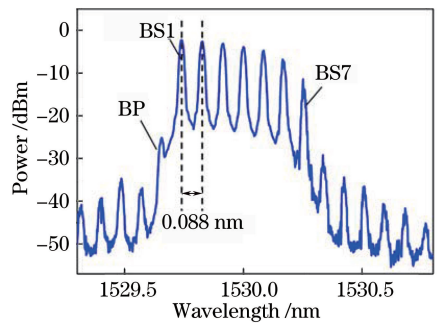


图 4 随机激光器在 980 nm 抽运功率为 500 mW 时的输出光谱

Fig. 4 Output spectrum of the random laser at 980 nm with pump power of 500 mW

由图 4 可以看出,实验得到了波长间隔为 0.088 nm 的多波长布里渊随机输出,左侧小峰是由 BP 光的瑞利背向散射引起,右侧是 1 至 7 阶的斯托克斯光。7 个输出波长峰值功率分别为:

-2.31 dBm, -2.594 dBm, -3.116 dBm, -3.89 dBm, -4.756 dBm, -6.863 dBm, -11.496 dBm, 单个 3 dB 的布里渊波长线宽小于 0.02 nm。另外, BS7 信号的后面仍然有不少更高阶光信号产生, 但这些波长的信号强度远低于前 7 个波长。由于增益的影响, BS7 信号不稳定, 但前 6 阶能持续稳定输出。随机激光的输出光谱中, BS1 和 BS6 峰值功率差较小, 奇数阶和偶数阶斯托克斯光的峰值功率差异不大, 这说明半开腔较全开腔能更有效提高光反馈效率和实现四波混频效应, 使多波长随机激光输出更平坦^[9,17-18]。从实验结果来看, 该实验中的半开腔随机激光器可获得 7 个信道的随机多波长激光输出, 同时多波长的个数可以通过控制 980 nm 抽运功率的大小来改变。

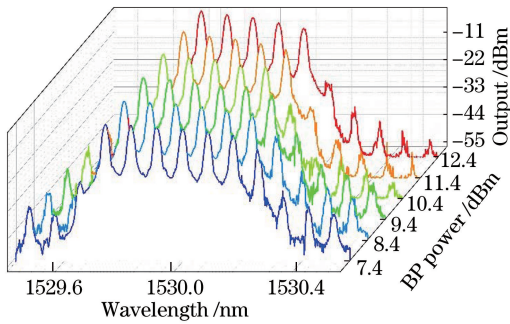


图 5 980 nm 抽运功率为 500 mW 时, 不同 BP 功率下的随机激光器输出光谱图

Fig. 5 Output spectra of the random laser under different BP powers at 980 nm with pump power fixed at 500 mW

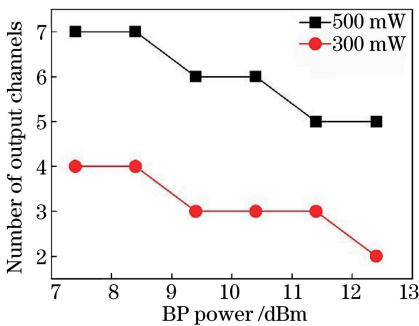


图 6 980 nm 抽运功率为 300 mW 和 500 mW 时, 不同 BP 功率下的多波长个数

Fig. 6 Wavelength number under different BP powers at 980 nm with pump powers at 300 mW and 500 mW

BP 功率的大小也是影响多波长输出个数的重要因素, 如图 5 和图 6 所示。当保持 980 nm 抽运功率为 500 mW 不变时, 改变 BP 功率, 分别为 7.4 dBm, 8.4 dBm, 9.4 dBm, 10.4 dBm, 11.4 dBm, 12.4 dBm 时, 该激光器的多波长输出个数分别为 7,

7, 6, 6, 5, 5; 当保持 980 nm 抽运功率为 300 mW 不变时, 改变 BP 功率, 分别为 7.4 dBm, 8.4 dBm, 9.4 dBm, 10.4 dBm, 11.4 dBm, 12.4 dBm 时, 该激光器的多波长输出个数分别为 4, 4, 3, 3, 3, 2。结果显示, 随着 BP 功率的增加, 多波长个数有所减少, 这是因为高功率的 BP 信号使随机激光器的振荡阈值增加, 同时降低了激光器的输出波长数。

实验继续研究了随机激光器的可调谐性, 将 980 nm 抽运功率固定在 500 mW, 考察布里渊抽运波长在 1500~1570 nm 范围内当波长步长为 1 nm 时的变化, 测量激光器的输出光谱, 并得到多波长个数。图 7 给出了 1525~1541 nm (16 nm) 范围内的可调谐输出光谱图。结果显示, 布里渊抽运在 1525~1541 nm 范围内变化时, 可得到稳定的多阶随机斯托克斯波长输出, 输出的多波长个数为 4~7。

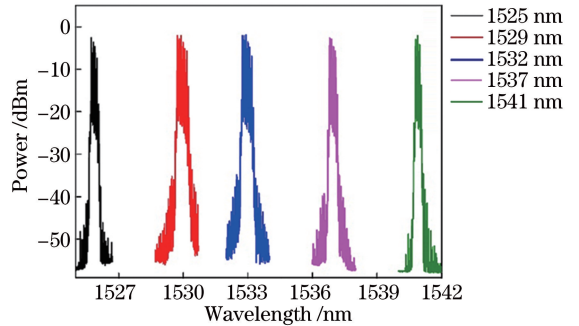


图 7 不同 BP 波长的随机激光输出光谱图

Fig. 7 Random laser output spectra of different BP wavelengths

图 8 给出整个可调谐范围内每 1 nm 测量的输出多波长个数的情况。从实验结果可以看出, 在 1527~1534 nm (7 nm) 范围内调节 BP 波长, 该随机激光器的输出多波长个数为 7。但是, 当 BP 波长小于 1524 nm 或大于 1549 nm 时, 多波长的输出个数减少, 甚至没有。这是由于 BP 工作波长不在

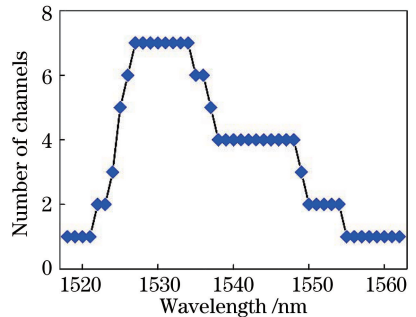


图 8 随机激光器在调谐范围内可产生的波长数

Fig. 8 Wavelength number obtained from the random laser in the tuning range

EDFA 的增益范围内,对应的斯托克斯信号不能得到充足的放大,达不到 SBS 阈值,所以不能激发下一阶斯托克斯光产生。实验结果表明,随机激光器可以在 1515~1565 nm(50 nm)范围内调谐,以实现多波长输出。

图 9 给出在 BP 信号为 7.4 dBm,980 nm 抽运功率为 500 mW 时,激光器输出多波长的结果。测试时间为 60 min,每 10 min 取一次实验结果,以获得该激光器 7 个多波长信号的稳定性。结果显示,7 个信道的峰值功率最大抖动分别为:0.52 dBm,0.371 dBm,0.55 dBm,0.47 dBm,0.376 dBm,0.989 dBm,3.972 dBm。除信道 7 的波长稳定性相对较差外,其余 6 个波长抖动都小于 1 dBm。结果表明随机激光器稳定性较好。

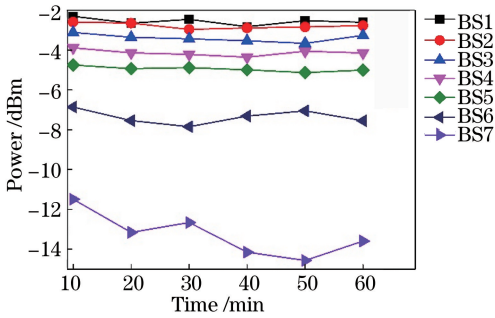


图 9 BP 信号为 7.4 dBm,980 nm 抽运功率为 500 mW 时,激光器输出多波长的结果

Fig. 9 Multiwavelength output results with 7.4 dBm BP power and 500 mW pump power of 980 nm laser

4 结 论

提出了一种可调谐多波长布里渊随机光纤激光器,该激光器采用半开腔的线性结构设计,能有效消除输出光谱中奇数阶和偶数阶斯托克斯光的峰值功率差异,实现较多斯托克斯波长随机激光输出。半开腔结构一端利用 3 dB 耦合器构成全反端,另一端利用 SMF 中随机分布的瑞利散射作为反射,经 EDFA 放大后的布里渊抽运光在 SMF 中形成级联的高阶 SBS,产生了多波长布里渊随机激光,并利用改变可调激光器(布里渊抽运)的输入波长实现对随机激光的可调谐特性。实验最终获得 7 个斯托克斯信号波长输出,波长在 1515~1565 nm(50 nm)范围内调谐。可调谐多波长布里渊随机光纤激光器在光纤传感光谱测量、微波光子等领域均有重要的潜在应用,且对今后产生更多波长的随机激光的研究有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] Tommasi F, Ignesti E, Fini L, *et al.* A new concept for non-invasive optical sensing: random lasing [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10231: 102310E.
- [2] Lee B S, Krishnanchettiar S, Lateef S S, *et al.* Random protein association analyses of MALDI-TOF mass spectra of two- and three-component protein systems using binomial and multinomial distribution [J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2006, 254(1/2): 101-105.
- [3] Redding B, Choma M A, Cao H. Speckle-free laser imaging using random laser illumination [J]. Nature Photonics, 2012, 6: 355-359.
- [4] Tretti C M, Galimberti M, Toulaki A, *et al.* Random fractional ultrapulsed CO₂ resurfacing of photodamaged facial skin: long-term evaluation [J]. Lasers in Medical Science, 2013, 28(2): 643-650.
- [5] Wang H, Liu J S. Theory and research status of random lasers [J]. Physics, 2003, 32(4): 235-241. 王宏, 刘劲松. 随机激光器的理论与研究现状 [J]. 物理, 2003, 32(4): 235-241.
- [6] Turitsyn S K, Babin S A, Eltsher A E, *et al.* Random distributed feedback fiber laser [J]. Nature Photonics, 2010, 4(4): 231-235.
- [7] Vatnik I D, Churkin D V, Babin S A, *et al.* Cascaded random distributed feedback Raman fiber laser operating at 12 μm [J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18486-18494.
- [8] Zhang W L, Zhu Y Y, Rao Y J, *et al.* Random fiber laser formed by mixing dispersion compensated fiber and single mode fiber [J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8544-8549.
- [9] Pang M, Bao X Y, Chen L. Observation of narrow linewidth spikes in the coherent Brillouin random fiber laser [J]. Optics Letters, 2013, 38(11): 1866-1868.
- [10] 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.
- [11] Cholan N A, Al-Mansoori M H, Noor A S M, *et al.* Flattening effect of four wave mixing on multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. Applied Physics B, 2013, 112(2): 215-221.
- [12] Huang C Q, Dong X Y, Zhang N, *et al.* Multiwavelength Brillouin-erbium random fiber laser incorporating a chirped fiber Bragg grating [J]. IEEE

- Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 294-298.
- [13] Xiang D, Lu P, Xu Y P, *et al.* Random Brillouin fiber laser for tunable ultra-narrow linewidth microwave generation[J]. Optics Letters, 2016, 41(20):4839-4842.
- [14] Zhang L, Xu Y P, Gao S, *et al.* Multi-wavelength coherent Brillouin random fiber laser with high optical signal-to-noise ratio [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 0900308.
- [15] Gao S, Zhang L, Xu Y P, *et al.* High-speed random bit generation via Brillouin random fiber laser with non-uniform fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(16): 1352-1355.
- [16] Zhang L, Wang C, Li Z Y, *et al.* High-efficiency Brillouin random fiber laser using all-polarization maintaining ring cavity[J]. Optics Express, 2017, 25(10): 11306-11314.
- [17] Luo Z Q, Zhong W D, Cai Z P, *et al.* Multiwavelength fiber optical parametric oscillator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(21): 1609-1611.
- [18] Xu R Q, Guo H Y, Li W, *et al.* Ultra-narrow linewidth random fiber laser based on all grating fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1201005.
- 许儒泉, 郭会勇, 黎威, 等. 基于全光栅光纤的超窄线宽随机光纤激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1201005.