

doi: 10.3788/gzxb20164503.0314001

布里渊-掺铒光纤随机光纤激光器输出特性分析

黄昌清, 刘梦诗, 车腾云, 董新永

(中国计量学院 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

摘要:设计了一种基于受激布里渊散射和掺铒光纤混合增益的随机光纤激光器,该激光器选用两段长为 20 km 的单模光纤组成全开放腔结构,利用单模光纤的瑞利散射提供随机光反馈.研究表明,固定布里渊泵浦波长和泵浦功率分别为 1 550.00 nm 和 2.19 mW 时,增加掺铒光纤泵浦功率,可以实现两个波长的随机激光输出,一阶和二阶受激布里渊散射光与布里渊泵浦光波长间隔分别约为 0.088 nm 和 0.174 nm,产生一阶和二阶受激布里渊散射对应的掺铒光纤泵浦功率分别为 190 mW 和 370 mW;当掺铒光纤泵浦功率为 433 mW 时,激光器两端的最大输出功率为 1.60 mW 和 1.68 mW.当掺铒光纤泵浦功率明显高于阈值功率时,获得的一阶和二阶随机激光输出稳定,3 dB 线宽约为 0.022 nm,峰值强度和位置基本不随时间而变化.

关键词:光纤激光器;受激布里渊散射;瑞利散射;掺铒光纤;随机分布反馈;混合增益;线宽

中图分类号:TN248

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)03-0314001-5

Output Characteristics of Brillouin-Erbium Random Fiber Laser

HUANG Chang-qing, LIU Meng-shi, CHE Teng-yun, DONG Xin-yong

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A random fiber laser with stimulated Brillouin scattering (SBS) and erbium-doped fiber (EDF) as hybrid gains was proposed and experimentally investigated. Two spools of 20 km long single-mode fibers were used to form a full-open cavity and provide random optical feedback by Rayleigh scattering. For fixed Brillouin pump wavelength and pump power of 1550.00 nm and 2.19 mW, the proposed laser can achieve random lasing of two wavelengths with frequency downshift of about 0.088 nm and 0.174 nm relative to the Brillouin pump wavelength when EDF pump power increases. EDF pump powers corresponding to the 1st and 2nd SBS are 190 mW and 370 mW, respectively. Maximal output powers of two ends are 1.60 mW and 1.68 mW when EDF pump power is 433 mW. When EDF pump power is obviously higher than the threshold power, the output lasing has 3 dB linewidth of about 0.022 nm and keeps stable. The peak intensity and wavelength have no observable fluctuations over time.

Key words: Fiber laser; Stimulated Brillouin scattering; Rayleigh scattering; Erbium-doped fiber; Random distributed feedback; Hybrid gains; Linewidth

OCIS Codes: 140.3460;140.3510;190.4370

0 引言

光纤激光器因具有结构紧凑、线宽窄、信噪比高等特点而受到研究人员的广泛关注^[1-3].随机光纤激光器利用光纤中的随机反馈实现激光振荡,并利用光纤的二维限制作用获得一维随机激光输出^[1,4],具有结构简单、阈值功率低、方向性好、可以实现非相干激光输出

等优点,因而在光通信、光传感、激光成像、光谱学和医学等领域具有广阔的应用前景^[5-6].最早的随机光纤激光器是利用光纤中填充的纳米颗粒提供随机反馈,获得一维随机激光输出^[7-8].尔后,文献[4,9-10]提出利用随机间隔或者随机相移的光纤光栅提供随机反馈,实现随机激光输出.

2010年,Turitsyn报道了利用光纤中的瑞利散射

基金项目:国家自然科学基金(No.11404310)和浙江省自然科学基金(No.LY13F050004)资助

第一作者(通讯作者):黄昌清(1980-),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤激光器. Email: cqhuang@cjl.edu.cn

收稿日期:2015-10-08;录用日期:2015-12-10

<http://www.photon.ac.cn>

效应提供随机分布反馈的随机光纤激光器^[1],由此激发了基于瑞利散射效应反馈的随机光纤激光器的研究热潮^[11-16].由于光纤中的瑞利散射系数很小,用其作为随机分布反馈时,往往需要对光纤中传输的光信号进行放大. Turitsyn 等利用光纤喇曼散射效应进行光放大,获得一阶随机激光输出^[1, 11]. Rao 等利用喇曼散射效应实现了高阶随机激光输出^[12, 17].然而,利用受激喇曼散射效应实现光信号放大时,其阈值功率一般高达 1 W 以上.为此, Pang 等报道了基于受激布里渊散射的随机光纤激光器^[18],采用半开放腔的结构设计,并选用线宽仅为 3.5 Hz 的光源作为布里渊泵浦光源,该激光器的阈值功率仅为 4 mW.此外,基于混合增益的随机光纤激光器,如布里渊-喇曼随机光纤激光器^[19-21],一般采用全开放腔^[19-20]或者半开放腔^[21]结构提供随机分布反馈.文献^[16, 22]报道了采用半开放腔结构的布里渊-掺铒光纤随机光纤激光器,获得了多波长随机激光输出.调研发现,采用全开放腔、基于布里渊-掺铒光纤混合增益的随机光纤激光器未见报道.

本文设计了一种具有全开放腔结构、基于受激布里渊散射和掺铒光纤混合增益的随机光纤激光器.利用单模光纤中的瑞利散射效应实现随机分布反馈,获得两个波长随机激光输出,并研究了该激光器的输出光谱、输出功率和输出稳定性.

1 实验结构和工作原理

本文提出的随机光纤激光器,采用瑞利散射作为随机分布反馈,受激布里渊散射和掺铒光纤提供混合增益,实验装置见图 1.布里渊泵浦激光(Brillouin Pump, BP)由半导体激光器提供,经隔离器(Isolator)、30/70 耦合器(Coupler)和 980 nm/1 550 nm 波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)后,进入掺铒光纤(Erbium-Doped Fiber, EDF).隔离器可以有效防止反馈光进入 BP 泵浦源,避免损坏 BP 泵浦源.EDF 长度为 1 m,在 1 530 nm 处的峰值吸收为 80 dB/m,采用 980 nm 的激光二极管泵浦.输入的 BP 经 EDF 放大后,进入右侧的单模光纤(Single-Mode Fiber, SMF)中.如果放大后的 BP 功率足够高,在 SMF₂ 处会产生背向传输的一阶受激布里渊散射光,同时产生背向传输的瑞利散射光.背向传输的受激布里渊散射光和瑞利散射光经 EDF 放大后,经由 WDM 和耦合器到达 SMF₁.在 SMF₁ 处产生背向传输的二阶受激布里渊散射光和瑞利散射光.由于瑞利散射的随机分布反馈以及受激布里渊散射和掺铒光纤的混合增益作用,最终实现随机激光振荡,产生的随机激光分别从 SMF₁ 的左侧和 SMF₂ 的右侧输出.

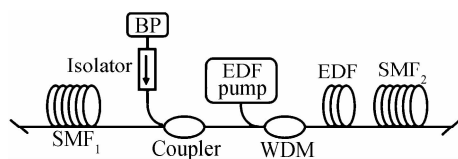


图 1 随机光纤激光器实验装置

Fig. 1 The schematic setup of the proposed random fiber laser

实验中, SMF₁ 和 SMF₂ 的长度均为 20 km, 激光反馈由 SMF₁ 和 SMF₂ 中随机分布的瑞利散射提供,因此称为全开放腔^[14].为了防止光纤端面的菲涅尔反射,图 1 中的各部分光纤采用熔接的方式连接,而 SMF₁ 左侧输出和 SMF₂ 右侧输出形成 8° 倾斜角.

2 实验结果与讨论

固定 BP 泵浦波长和泵浦功率分别为 1 550.00 nm 和 2.19 mW, 改变 EDF 泵浦功率, 测得随机激光左侧输出光谱如图 2. 由图 2 可知, 当 EDF 泵浦功率为 49 mW 时, 输出光谱只有一个峰值, 波长为 1 550.00 nm, 是由放大后的 BP 泵浦光在 SMF₂ 处的瑞利背向散射引起的. EDF 泵浦功率增加到 162 mW 时, 在 1 550.00 nm 峰值的两侧出现两个新的峰, 与 BP 的波长间隔均为 0.086 nm, 分别为自发的一阶斯托克斯光和一阶反斯托克斯光. 当 EDF 泵浦功率进一步增加到 194 mW 时, 一阶斯托克斯光波长附近出现多个峰, 此时 EDF 泵浦功率已经达到阈值条件, 产生一阶受激布里渊散射. 为了研究阈值功率附近的一阶受激布里渊散射特性, 固定 EDF 泵浦功率为 194 mW, 测量输出光谱随时间的变化, 如图 3(a) 所示. 图 3(a) 中, 为了便于区分, 相邻曲线之间垂直移动了 20 dB. 由图 3(a) 可知, 一阶斯托克斯光波长附近峰的位置和相对强度随时间变化, 具有明显的不稳定性, 这与光纤中多种模式竞争有关^[23].

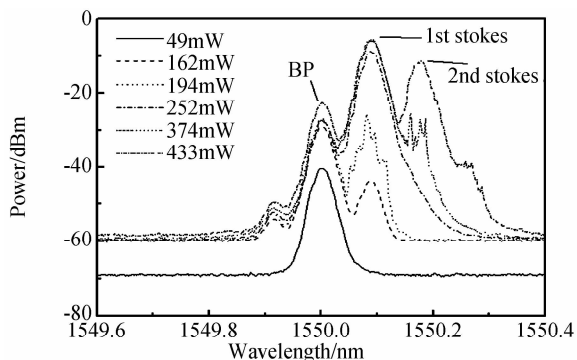


图 2 不同 EDF 泵浦功率下的左侧输出光谱

Fig. 2 Output spectra (left) of the proposed laser with different EDF pump power

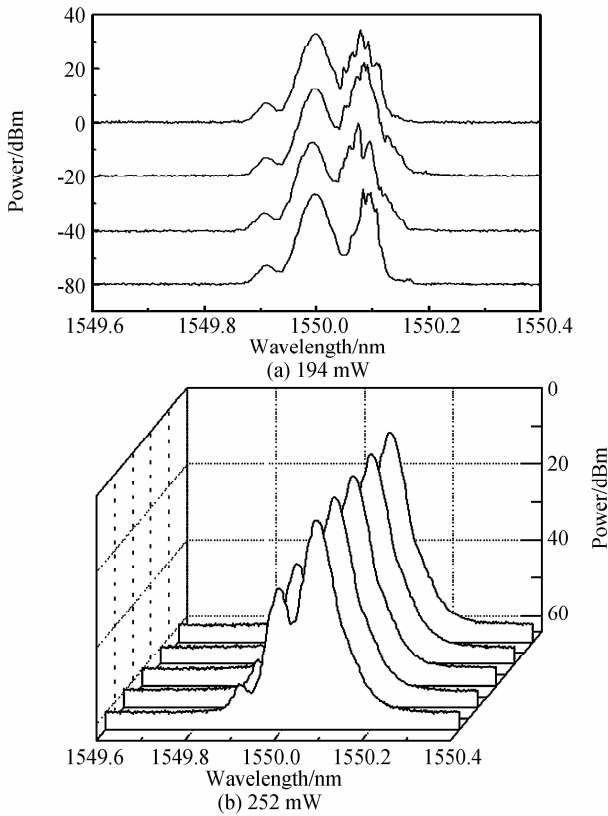


图3 相同EDF泵浦功率下的左侧输出光谱稳定性
Fig.3 Stability of output spectra (left) with fixed EDF output power

图2中,继续增加EDF泵浦功率到252 mW,一阶受激布里渊散射波长处只有一个光滑的峰,与BP泵浦光的波长间隔为0.088 nm,3 dB线宽为0.022 nm,其峰值强度显著高于由于瑞利散射所形成的BP峰.一阶受激布里渊散射光与BP光波长间隔以及3 dB线宽与传统的布里渊掺铒光纤激光器基本一致^[24-26],但3 dB线宽明显优于基于喇曼散射效应的随机光纤激光器^[27-28].固定EDF输出功率不变,每隔5 min测量一次左侧输出光谱,其结果如图3(b).结果表明,一阶受激布里渊散射的峰值位置和强度不随时间发生明显的变化,3 dB线宽基本保持不变,说明产生了稳定的随机激光输出.当EDF泵浦功率增加到374 mW时,在二阶斯托克斯光波长附近出现多个峰.与一阶斯托克斯光类似,刚产生的二阶斯托克斯光的峰值位置和数量随时间变化,具有不稳定性.但是,增加EDF泵浦功率到最大值433 mW时,产生的二阶斯托克斯光变得稳定,峰值位置和强度不随时间而变化,其峰值波长与BP泵浦光的波长间隔为0.176 nm,3 dB线宽为0.024 nm.此时一阶斯托克斯光峰值位置和3 dB线宽基本保持不变.因此,本文设计的具有全开放腔结构的随机光纤激光器,实现了两个波长的稳定随机激光输出.较少的输出波长数目与全开放腔的结构设计导致弱的光反馈有关,如果选用特种光纤,提高瑞利散射系数,或者提高EDF泵浦功率,输出的波长数目可能增加.

图4(a)给出了不同EDF泵浦功率下右侧随机激光输出光谱图.与图(2)的左侧随机激光输出光谱图相比,当EDF泵浦功率为162 mW时,右侧光谱未探测到自发的一阶斯托克斯光和一阶反斯托克斯光.这是因为自发的一阶斯托克斯光和一阶反斯托克斯光强度非常弱,经由SMF₁产生的瑞利背向散射很小,SMF₂右侧无法探测到.随着EDF输出功率的增加,右侧的输出光谱经历不稳定的一阶受激布里渊散射(EDF输出功率为194 mW)、稳定的一阶受激布里渊散射(EDF输出功率为252 mW)、不稳定的二阶受激布里渊散射(EDF输出功率为374 mW)和稳定的二阶受激布里渊散射(EDF输出功率为433 mW)等过程.由于右侧的输出光谱中包含剩余的BP泵浦光,产生的一阶和二阶受激布里渊散射光强度低于剩余的放大后的BP泵浦峰值强度.当EDF泵浦功率为433 mW时,除了探测到一阶和二阶受激布里渊散射外,更高阶的斯托克斯光和反斯托克斯光也探测到,这可能与SMF₂中的四波混频效应有关^[29].稳定的一阶受激布里渊散射光与BP泵浦光波长间隔为0.088 nm,3 dB线宽为0.022 nm.稳定的二阶受激布里渊散射与一阶受激布里渊散射波长间隔为0.086 nm,3 dB线宽为0.02 nm.图4(b)给出了EDF泵浦功率为252 mW时,每隔5 min测量一次右侧输出光谱图.结果表明,一阶受激布里渊散射的峰值位置和3 dB线宽不随时间发生明显的变化,说明产生了稳定的一阶随机激光输出.

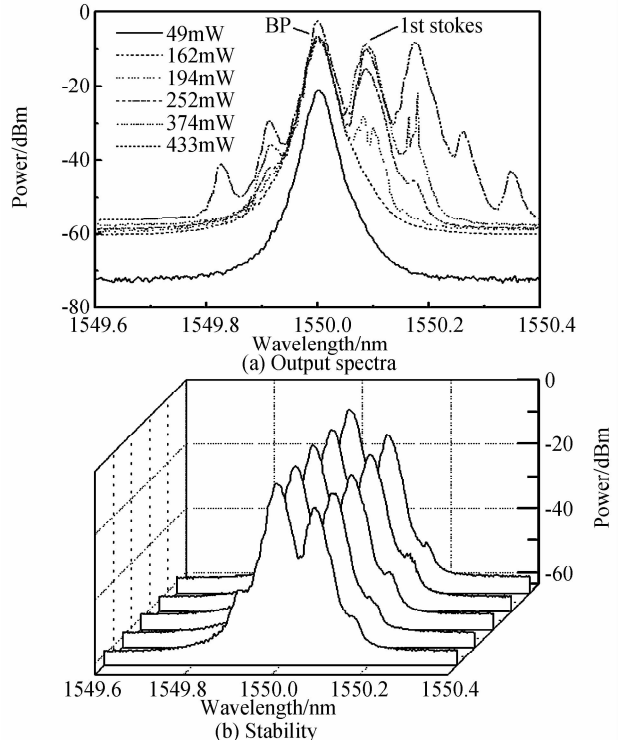


图4 右侧输出光谱图及其稳定性研究
Fig.4 Output spectra and stability measurement (right) of the proposed laser

图 5 给出了随机光纤激光器输出功率随 EDF 泵浦功率的变化曲线图. 图中曲线 *a* 为随机激光右侧输出功率曲线, 曲线 *b* 为随机激光左侧输出功率曲线. 由图 5 可知, 当 EDF 泵浦功率低于 40 mW 时, 激光器两端的输出功率接近于零, 这是因为 EDF 具有很大的吸收损耗, 当 EDF 泵浦功率较小时, 放大后的 BP 功率不足以抵消 EDF 的吸收损耗. 当 EDF 泵浦功率大于 40 mW 时, 右侧的输出功率几乎线性增加, 此时, 放大的 BP 功率足以抵消 EDF 的吸收损耗, 进入 SMF₂ 后, 由右侧输出. 随着 EDF 泵浦功率的增加, 放大后的 BP 功率也逐渐增加, 右侧的输出功率线性增加. 左侧的输出功率因 SMF₂ 瑞利散射效应也相应线性增加, 但是由于瑞利散射较弱, 图 5 中曲线 *b* 变化不明显. 当 EDF 泵浦功率达到 190 mW 时, 图 5 中曲线 *b* 输出功率迅速线性增加, 此时, 产生一阶受激布里渊散射, 使得左侧输出功率线性增加. 而曲线 *a* 的输出功率增加明显减缓, 斜率变小, 说明放大的 BP 功率转换成背向传输的一阶受激布里渊散射. 该结果与输出光谱测试结果一致. 当 EDF 泵浦功率增加到 370 mW 时, 在 SMF₁ 处产生二阶受激布里渊散射, 右侧输出功率斜率增加, 而左侧输出功率斜率减小. 当 EDF 泵浦功率为 433 mW 时, 实验测得激光器左侧的最大输出功率为 1.60 mW, 右侧的最大输出功率为 1.68 mW. 由于受掺铒光纤泵浦光源最大输出功率的限制, 没有产生更高阶的受激布里渊散射光. 实验采用全开放腔的结构设计, 激光器的输出波长数目比半开放腔结构的输出激光波长数目少, 而一阶斯托克斯光和二阶斯托克斯光的阈值功率明显更大, 最大输出功率也小很多^[16, 22].

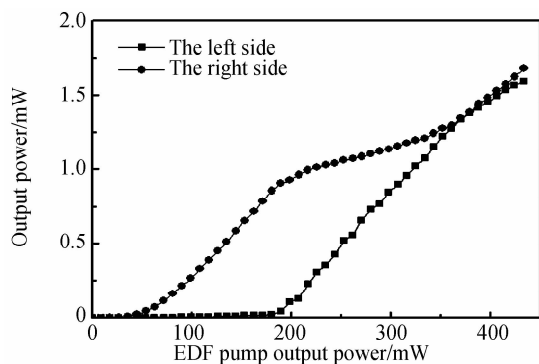


图 5 随机光纤激光器的输出功率曲线

Fig. 5 Output power curve of the proposed laser

为了进一步研究输出随机激光稳定性, 固定 EDF 泵浦功率为 433 mW, BP 输出功率为 2.19 mW, 每隔 5 min 测试一次右侧输出光谱图, 其结果如图 6. 由图 6 可知, 该激光器总共有三个输出波长, 包括一个剩余的放大后的 BP 泵浦光、一阶斯托克斯光和二阶斯托克斯光. 三个输出波长的峰值位置和 3 dB 线宽不随时间而发生明显变化, 输出激光特性稳定.

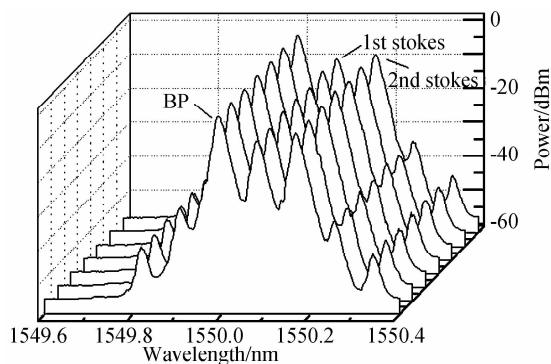


图 6 随机激光输出光谱稳定性研究

Fig. 6 Stability measurement of output spectra

3 结论

设计并实验研究了一种具有全开放腔结构, 利用受激布里渊散射和掺铒光纤作为混合增益的随机光纤激光器, 实现了两个波长的随机激光输出. 当 BP 泵浦功率等于 2.19 mW 时, 产生一阶和二阶斯托克斯光的 EDF 泵浦功率分别为 190 mW 和 370 mW, 一阶和二阶受激布里渊散射波长与布里渊泵浦波长间隔分别约为 0.088 nm 和 0.174 nm. 激光器两端最大输出功率分别为 1.60 mW 和 1.68 mW. 当 EDF 泵浦功率远高于阈值功率时, 随机激光输出光谱保持稳定.

参考文献

- [1] TURITSYN S K, BABIN S A, EL-TAHER A E, *et al.* Random distributed feedback fibre laser [J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**: 231-235.
- [2] HE Wei, ZHU Lian-qing, DONG Ming-li, *et al.* Dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber ring filter [J]. *Acta Photonics Sinica*, 2015, **44**(8): 0806006. 何巍, 祝连庆, 董明利, 等. 基于光纤环形滤波器的双波长掺铒光纤激光器[J]. *光子学报*, 2015, **44**(8): 0806006.
- [3] SONG Zhi-qiang, QI Hai-feng, GUO Jian, *et al.* Characteristics of self-amplified distributed feedback fiber laser [J]. *Acta Photonics Sinica*, 2014, **43**(2): 0206005. 宋志强, 祁海峰, 郭健, 等. 自放大结构分布反馈光纤激光器输出特性[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2): 0206005.
- [4] GAGNE M, KASHYAP R. Demonstration of a 3 mW threshold Er-doped random laser based on a unique fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(21): 19067-19074.
- [5] PINTO A M R, LOPEZ-AMO M, KOBELKE J, *et al.* Temperature fiber laser sensor based on a hybrid cavity and a random mirror[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(8): 1168-1172.
- [6] WANG Z N, RAO Y J, WU H, *et al.* Long-distance fiber-optic point-sensing systems based on random fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(16): 17695-17700.
- [7] DE MATOS C J S, MENEZES L de S, BRITO-Silva A M, *et al.* Random fiber laser[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(15): 153903.
- [8] HU Z J, ZHANG Q, MIAO B, *et al.* Coherent random fiber laser based on nanoparticles scattering in the extremely weakly scattering regime[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **109**: 253901.
- [9] LIZARRAGA N, PUENTE N P, CHAIKINA E I, *et al.*

- Single-mode Er-doped fiber random laser with distributed Bragg grating feedback[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(2): 395-404.
- [10] WANG L L, DONG X Y, SHUM P, *et al.* Random laser with multiphase-shifted Bragg grating in Er/Yb-codoped fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(1): 95-99.
- [11] BABIN S A, EL-TAHER A E, HARPER P, *et al.* Tunable random fiber laser [J]. *Physical Review A*, 2011, **84**: 021805.
- [12] ZHANG W L, RAO Y J, ZHU J M, *et al.* Low threshold 2nd-order random lasing of a fiber laser with a half-opened cavity[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(13): 14400-14405.
- [13] ZHU Jun-mei, ZHANG Wei-li, RAO Yun-jiang, *et al.* Output characteristics of low-threshold random distributed feedback fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(3): 0302007.
朱俊梅, 张伟利, 饶云江, 等. 低阈值随机分布反馈光纤激光器的输出特性[J]. *中国激光*, 2013, **40**(3): 0302007.
- [14] XU Lei, MA Wan-zhuo, WANG Tian-shu, *et al.* All-opened double-spacing Brillouin-Raman multi-wavelength fiber laser [J]. *Acta Photonics Sinica*, 2015, **44**(9): 0906003.
徐磊, 马万卓, 王天枢, 等. 全开腔双倍间隔布里渊-喇曼多波长光纤激光器[J]. *光子学报*, 2015, **44**(9): 0906003.
- [15] WANG L L, DONG X Y, SHUM P, *et al.* Tunable erbium-doped fiber laser based on random distributed feedback[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, **6**(5): 1501705.
- [16] HUANG C Q, DONG X Y, ZHANG S Y, *et al.* Cascaded random fiber laser based on hybrid Brillouin-erbium fiber gains[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(13): 1287-1290.
- [17] WANG Z N, WU H, FAN M Q, *et al.* Third-order random lasing via Raman gain and Rayleigh feedback within a half-open cavity [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(17): 20090-20095.
- [18] 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.
- [19] AHMAD H, ZULKIFLI M Z, JEMANGIN M H, *et al.* Distributed feedback multimode Brillouin-Raman random fiber laser in the S-band[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, **10**: 055102.
- [20] SHARGH R S, AL-MANSORI M H, ANAS S B A, *et al.* OSNR enhancement utilizing large effective area fiber in a multiwavelength Brillouin-Raman fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2011, **8**(2): 139-143.
- [21] WU H, WANG Z N, JIA X H, *et al.* Flat amplitude multiwavelength Brillouin-Raman random fiber laser with a half-open cavity[J]. *Applied Physics B*, 2013, **112**(4): 467-471.
- [22] 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 Quantum Electronics*, 2014, **20**(5): 0902405.
- [23] TURECI H E, GE L, ROTTER S, *et al.* Strong interactions in multimode random laser[J]. *Science*, 2008, **320**(5876): 643-646.
- [24] SONG Y J, ZHAN L, HU S, *et al.* Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with a polarization-maintaining fiber Sagnac loop filter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(9): 2015-2017.
- [25] HARUN S W, EMAMI S D, RAHMAN F A, *et al.* Multiwavelength Brillouin/erbium ytterbium fiber laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, **4**(8): 601-603.
- [26] HARUN S W, SHAAHI S, AHMAD H. Brillouin fiber laser with a 49 cm long Bismuth-based erbium-doped fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, **7**(1): 60-62.
- [27] DU X Y, ZHANG H W, XIAO H, *et al.* Temporally stable random fiber laser operates at 1070 nm[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(5): 1503107.
- [28] WANG Z N, WU H, FAN M Q, *et al.* High power random fiber laser with short cavity length: theoretical and experimental investigations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electron.*, 2015, **21**(1): 0900506.
- [29] 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**: 215-221.