

基于半开放腔的可调谐多波长随机光纤激光器研究

黄昌清 刘梦诗 车腾云 韩佳晖 董新永

中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 提出了一种具有可调谐特性的半开放腔多波长随机光纤激光器,利用单模光纤和环形结构组成半开放腔结构,通过改变布里渊抽运激光波长实现输出随机激光的可调谐特性。结果表明,当布里渊抽运波长为 1550.01 nm 时,该激光器最多可以实现 4 个波长的随机激光输出,且可以通过控制掺铒光纤放大器的输出功率来精确控制输出随机激光波长数目,其一阶至四阶斯托克斯光的阈值功率分别为 12、31.6、73、610 mW。其中,一阶斯托克斯光的斜率效率可达 12.5%。固定掺铒光纤放大器的输出功率为 631 mW 时,随着随机分布反馈光纤长度的增加,随机激光输出功率成指数下降。该激光器的输出波长可在 1528~1580 nm 的波长范围内调谐。此外,半开放腔的结构设计有效地消除了输出光谱中奇数和偶数阶斯托克斯光的峰值功率差异。

关键词 激光器; 受激布里渊散射; 瑞利散射; 阈值功率

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0302001

A Tunable Multi-Wavelength Random Fiber Laser Based on Half-Open Cavity

Huang Changqing Liu Mengshi Che Tengyun Han Jiahui Dong Xinyong

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

Abstract A tunable multi-wavelength random fiber laser, with single-mode fiber and ring structure forming half-open cavity, has been proposed. Tunable Brillouin pump laser is used to achieve tunable random lasing. The results show that the proposed laser has random lasing with four wavelengths, which can be accurately controlled by the output power of erbium-doped fiber amplifier when Brillouin pump wavelength is 1550.01 nm. The threshold power of the proposed laser from the first Stokes line to the fourth Stokes line are 12, 31.6, 73 and 610 mW, respectively. The slope efficiency of the first stokes wave is 12.5%. For fixed output power of erbium-doped fiber amplifier of 631 mW, the output power of the proposed laser decreases exponentially with lengths of optical fibers as random distributed feedback media. The output wavelength of the random fiber laser can be tuned between 1528 nm and 1580 nm. The scheme of half-open cavity can effectively avoid the peak power difference of odd-order and even-order Stokes lines.

Key words lasers; stimulated Brillouin scattering; Rayleigh scattering; threshold power

OCIS codes 140.3460; 140.3510; 140.3600

1 引言

随机激光的概念是 1966 年由 Ambartsumyan 等^[1]提出来的,与传统激光器相比,随机激光器没有固定的光学谐振腔,其光反馈由无序介质中的多次散射效应实现,利用散射光的干涉效应产生特定频率的共振模式,实现随机激光输出。随机激光器在结构和输出激光方面有着独一无二的特性,如制造技术简单,不需要制造要求严格的光学谐振腔;具有低的时间/空间相干性;可以在较宽的频率范围内同时产生多个非相干的激光模式等。因此,随机激光器成为光电子技术领域的一个研究热点,其在光通信、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^[2-4]。

收稿日期: 2015-09-09; 收到修改稿日期: 2015-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(11404310)、浙江省自然科学基金(LY13F050004)

作者简介: 黄昌清(1980—),男,博士,副教授,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: cqhuang@cjlu.edu.cn

近年来,光纤激光器的研究也受到人们的广泛关注^[5-6],由于光纤具有较好的二维限制作用,将光纤激光器和随机激光器的优越特性相结合,可以形成一类新的激光器,称为随机光纤激光器(RFL)。2007年,Matos等^[7]报道了在空心光子晶体光纤中填充包含TiO₂颗粒的若丹明6G溶液,采用侧面抽运的方法获得了一维随机激光输出。Hu等^[8-9]在空心光纤中填充包括纳米颗粒的有机溶液,获得了相干的随机激光输出。2010年,Turitsyn等^[10]首次报道了完全利用光纤中的分布式瑞利散射效应作为反馈机制,拉曼效应作为增益机制的随机光纤激光器,由此激发了基于随机分布反馈的随机光纤激光器的研究热潮^[11-12]。Wang等^[13-15]对利用瑞利散射作为随机分布反馈、拉曼效应作为增益的随机光纤激光器做了大量的研究工作,获得了一阶、二阶和三阶斯托克斯光。然而,直接采用拉曼效应实现多波长激光输出存在阈值功率高、波长数目少、波长间隔长等缺点。由于受激布里渊散射具有阈值功率低、波长数目多、波长间隔短等优点,因此可用于获得多波长的随机激光输出。Pang等^[16]报道了利用受激布里渊散射作为增益,实现阈值功率仅为4 mW、单波长的随机激光输出。其选用特殊制备的、折射率连续变化的非均匀光纤作为随机分布反馈介质,该光纤制备工艺相对较复杂,价格高。Wu等^[17-18]报道了布里渊-拉曼多波长随机光纤激光器。本课题组提出了布里渊-掺铒光纤多波长随机光纤激光器,可以获得4个激光输出波长^[9],且能精确控制激光输出波长数目。然而,该结构无法确定各阶斯托克斯光产生的阈值功率。

本文设计了一种具有可调谐特性的半开放腔多波长随机光纤激光器,最大输出波长数目为4,能够精确测量各阶斯托克斯光产生的阈值功率,从而实现随机激光输出波长数目可控的目的。对不同掺铒光纤放大器(EDFA)输出功率下的激光输出光谱和输出功率特性进行了详细研究,就随机分布反馈光纤长度对激光输出功率的影响进行了初步研究。通过改变布里渊抽运激光波长,最终实现了在较宽波长范围内的可调谐随机激光输出。

2 实验结构和工作原理

图1给出了基于半开放腔的可调谐多波长随机光纤激光器的结构示意图。可调谐的半导体激光器作为布里渊抽运(BP)激光源,其发出的抽运激光经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,进入隔离器(ISO)。隔离器可以有效防止反射光进入EDFA,避免损坏EDFA。然后,经EDFA放大的BP抽运光从环形器1(CIR 1)的1端口进入,2端口输出。如果放大后的BP抽运光功率足够高,在单模光纤1(SMF 1)处会产生背向传输的一阶受激布里渊散射(SBS)。背向传输的一阶SBS光由CIR 1的2端口进入,3端口输出,经CIR 2后到达SMF 2。SMF 2的瑞利背向散射可以实现随机分布光反馈^[10],反馈的瑞利背向散射光经由CIR 2的2端口进入,3端口输出。然后经由SMF 1、CIR 1、CIR 2形成光反馈。在本文提出的随机光纤激光器(RFL)结构中,SMF 1、CIR 1和CIR 2形成环形结构,与SMF 2中随机分布的瑞利散射共同组成一个“腔”,形成光反馈,实现随机激光输出,这种结构称为半开放腔结构^[17]。利用受激布里渊散射的饱和特性^[20],只要经EDFA放大后的BP抽运光的功率足够高,就可能在SMF 2产生高阶的受激布里渊散射,实现多波长的激光输出。

可调谐半导体激光器的调谐范围为1460~1580 nm,最大输出功率为10 mW,带宽为5 MHz。EDFA的最大输出功率为2 W。单模光纤均为Sumitomo公司的G.652光纤,SMF 1长度为10 km,SMF 2长度为20 km。随机激光的输出特性由SMF 2的右侧输出测得。为了防止光纤端面的菲涅耳反射,图1中的各部分光纤采用熔接的方式连接,而SMF 2的右侧形成8°倾斜角输出。

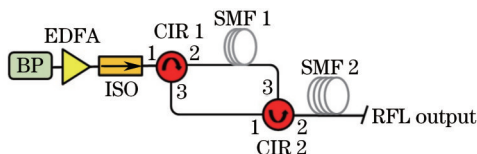


图1 可调谐多波长随机光纤激光器结构示意图

Fig.1 Schematic setup of tunable multiwavelength random fiber laser

3 实验结果与讨论

首先测定EDFA的输出功率特性。结果发现,EDFA显示的输出功率与采用功率计测定的输出功率差别

不大。所指的EDFA输出功率是直接读取EDFA中显示的输出功率。固定BP波长为1550.01 nm,输出功率为1 mW。调节EDFA的输出功率,测得不同EDFA输出功率下的随机激光输出光谱如图2所示。可以看出,当EDFA输出功率较低时,在抽运光波长两侧首先形成由自发布里渊散射引起的一阶斯托克斯光和反斯托克斯光,其强度随EDFA输出功率增加而增加。当EDFA输出功率达到12 mW时,达到一阶SBS阈值,产生不稳定的一阶斯托克斯光,此时输出光谱在一阶斯托克斯波长位置包含多个小峰,每个峰的强度和位置随时间而变化,这是随机激光模式竞争的结果^[21]。当EDFA输出功率为20 mW时,获得稳定的一阶激光输出,输出光谱如图2(a)所示,图中最大峰由一阶斯托克斯光形成,其左侧小峰是放大的BP光在SMF 1处的瑞利背向散射引起的。此时,一阶SBS的峰值强度明显高于BP峰值强度,且随时间保持稳定,两者中心波长间隔为0.088 nm。波长间隔值与光纤的种类和结构有关,单模石英光纤1550 nm附近波长间隔一般约为0.088 nm^[22-23]。进一步增加EDFA输出功率到31.6 mW时,产生不稳定的二阶斯托克斯光。随机激光输出光谱在二阶斯托克斯波长附近包含多个小峰,每个峰的强度和位置随时间而变化,但一阶斯托克斯光保持稳定。当EDFA输出功率为41.7 mW时,明显超过了二阶SBS的阈值功率,激光输出光谱包含2个稳定的输出波长,二阶SBS相对于一阶SBS中心波长间隔为0.088 nm,如图2(b)所示。当EDFA输出功率为89.1 mW时,稳定的激光输出波长增加到3个,此外,激光输出光谱中还包含高阶的斯托克斯光和反斯托克斯光,如图2(c)所示。进一步增加EDFA输出功率到631 mW时,输出的激光波长数目增加到4个。更高阶斯托克斯光和反斯托克斯光的数量和强度也明显增加。三阶和四阶斯托克斯光的阈值功率分别为73 mW和610 mW。继续增加EDFA输出功率时,激光输出波长数目不再增加,但第四阶斯托克斯光的峰值强度逐渐增加。当输出功率为2000 mW时,第四阶与第五阶斯托克斯光的峰值功率相差15 dB,更高阶斯托克斯光和反斯托克斯光的峰值强度也有所提高。综上可知,设计的多波长随机光纤激光器最多可以实现4个波长的随机激光输出。而且,随机激光输出波长数目完全可以通过控制EDFA输出功率来精确控制。与文献[19]相比,用EDFA代替掺铒光纤(EDF),并将EDFA放在环形结构的外面,可以精确确定每一阶斯托克斯光的阈值功率,以便更好地控制随机激光输出特性。多波长随机激光的获得与受激布里渊散射的饱和特性有关,当EDFA输出功率足够高时,在SMF 1处会产生一阶受激布里渊散射,其传播方向与EDFA输出光方向相反。如果产生的一阶受激布里渊散射功率足够高,传播到SMF 2时,会产生二阶受激布里渊散射。这个过程不断进行下去,可以获得更高阶的受激布里渊散射光^[20]。

已有的研究表明,当采用全开放腔的结构设计时,随机激光的输出光谱中奇数阶和偶数阶斯托克斯光的峰值功率差异巨大,这与光纤中瑞利散射较弱有关^[18,20]。随机激光输出光谱中没有明显的奇数阶和偶数阶斯托克斯光峰值功率差异,这与半开放腔的结构设计有关^[17,19]。半开放腔的设计可以有效提高光反馈效率和四波混频效应,降低奇数阶和偶数阶斯托克斯光的峰值功率差异^[17,24],实现多波长激光的输出功

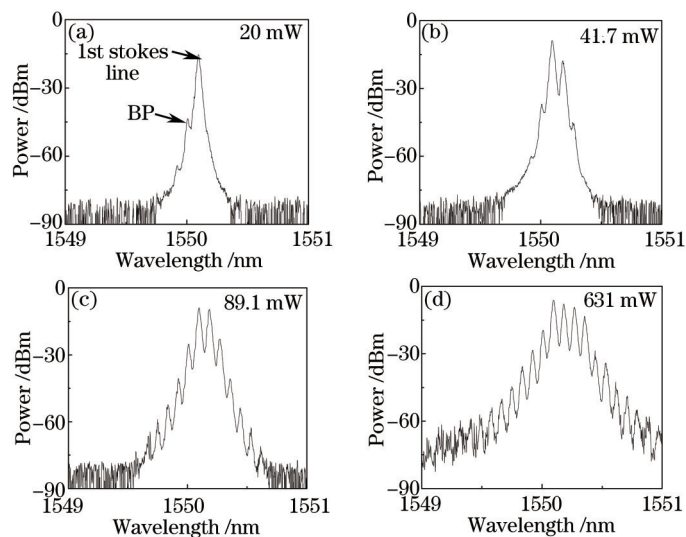


图2 不同EDFA输出功率下的输出光谱图

Fig.2 Output spectra for different EDFA output powers

率平坦化。

图3给出了随机光纤激光器输出功率随EDFA输出功率的变化曲线,内插图为其输出功率较小时的激光输出功率曲线。由图可知,该激光器的阈值功率只有12 mW,对应于一阶SBS的产生,此结果与利用光谱仪测得的阈值功率结果一致。图3的插图中两根直线为输出功率拟合线,其交点对应于二阶SBS的产生,相应的EDFA输出功率为26 mW,比采用光谱仪测得的二阶SBS阈值功率稍小。二阶SBS斜率小于一阶SBS斜率,说明二阶SBS转换效率低于一阶SBS转换效率。当EDFA输出功率低于26 mW时,激光输出的斜率效率可达12.5%。然而,当二阶SBS产生后,激光输出的斜率效率迅速降低到4.7%。当EDFA输出功率约大于100 mW时,随着EDFA输出功率的增加,激光输出功率增加非常缓慢,斜率效率进一步降低。由图3还可知,当EDFA输出功率为50 mW时,激光输出功率约为3.43 mW。

为了研究随机分布反馈光纤长度对随机激光输出功率的影响,固定EDFA的输出功率为631 mW,改变SMF 2的长度,测试随机激光的输出功率,结果如图4所示。由图可知,随着SMF 2光纤长度的增加,随机激光的输出功率成指数下降。当EDFA的输出功率为631 mW时,如果SMF 2的长度为20 km,随机激光的输出功率为8.39 mW,而当SMF 2的长度增加到50 km时,随机激光的输出功率降低到1.48 mW。随机激光输出功率的下降与SMF 2光纤长度增加引起的损耗增加有关^[25]。因此,适当降低随机分布反馈光纤长度,可以有效增加随机激光的输出功率。最新研究发现,当拉曼随机光纤激光器的光纤长度为300 m时,激光输出功率和光学效率显著增加^[26],但是阈值功率也显著提高。短光纤布里渊随机光纤激光器的输出特性需进一步的详细研究。

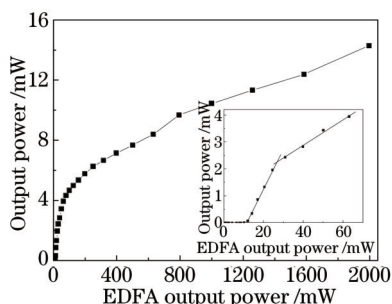


图3 随机光纤激光器的输出功率特性曲线
Fig.3 Output power of the proposed laser

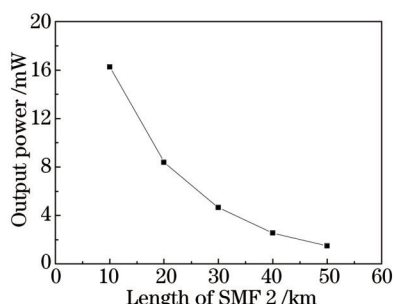


图4 随机分布反馈光纤长度与随机激光输出功率关系曲线
Fig.4 Output power of random laser with different lengths of SMF 2

为了研究输出随机激光的可调谐特性,实验中固定EDFA的输出功率为631 mW,将BP波长从1520 nm变化到1580 nm,波长间隔为2 nm,测量激光器的输出光谱曲线。图5(a)给出了BP波长从1532 nm变化到1548 nm的随机激光输出光谱图。由图可知,在BP波长为1532 nm到1548 nm范围内变化时,均获得了稳定的多波长随机激光输出,激光输出波长数目为3个或者4个。图5(b)给出了BP波长为1532 nm的输出光谱曲线,当BP波长为1532 nm时,最大的激光输出波长数目为3个。

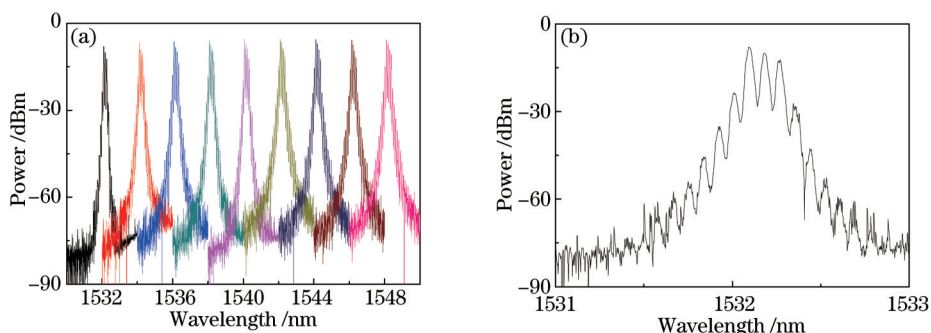


图5 (a) 不同BP波长的输出光谱图; (b) BP波长为1532 nm的输出光谱图

Fig.5 (a) Output spectra for different BP wavelengths; (b) output spectra for wavelength of 1532 nm

实验统计了BP波长从1520 nm到1580 nm变化时,最大的激光输出波长数量,结果如图6所示。当BP波长为1536 nm到1574 nm之间时,激光输出波长数目为4个。BP波长高于1574 nm或者低于1536 nm,激光

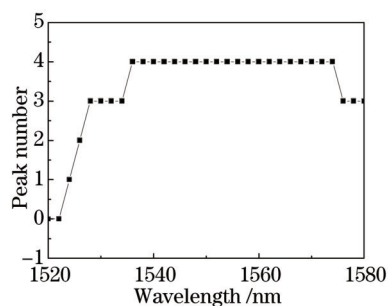


图6 不同BP波长时的最大输出波长数量图

Fig.6 Output wavelength number for different BP wavelengths

输出波长数目减少。当BP波长在1528~1580 nm之间时,该激光器至少有3个激光输出波长。这与EDFA输出功率放大区间有关,随机激光输出波长数量受掺铒光纤放大器的增益带宽影响。因此,设计的随机光纤激光器可以在波长为1528~1580 nm之间获得多波长的随机激光输出。

4 结 论

设计了一种可调谐的多波长随机光纤激光器。当BP波长为1550.01 nm时,最多可实现4个波长的稳定激光输出,对应一阶至四阶斯托克斯光的阈值功率分别为12、31.6 mW和73、610 mW,随机激光输出波长数目可以由EDFA输出功率来精确控制。当EDFA输出功率低于26 mW时,产生一阶斯托克斯光的斜率效率可达12.5%,但高阶斯托克斯光的斜率效率显著下降。固定EDFA输出功率为631 mW时,随机激光输出功率随着随机分布反馈光纤长度的增加而指数下降,当随机分布反馈光纤长度为20 km时,随机激光输出功率为8.39 mW。通过改变布里渊抽运激光波长,在1528~1580 nm的波长范围内获得可调谐的多波长随机激光输出。利用单模光纤和环形结构形成的半开放腔实现随机光反馈,有效地克服了奇数阶和偶数阶斯托克斯光的峰值功率差异问题。

参 考 文 献

- 1 R V Ambartsumyan, N G Basov, P G Kryukov, *et al.*. Laser with nonresonant feedback[J]. IEEE J Quantum Electron, 1966, 3(6): 442-446.
- 2 B Redding, M A Choma, H Cao. Speckle-free laser imaging using random laser illumination[J]. Nat Photonics, 2012, 6(6): 355-359.
- 3 J Bingi, A R Warriar, Vijayan C. Raman mode random lasing in ZnS- β -carotene random gain media[J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(22): 221105.
- 4 M Leonetti, C Conti, C Lopez. Non-locality and collective emission in disordered lasing resonators[J]. Light: Sciences & Applications, 2013, 2(8): e88.
- 5 Liu Yi, Yu Jinlong, Wang Hongjie, *et al.*. Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser based on feedback fiber loop[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0202003.
刘毅, 于晋龙, 王红杰, 等. 基于反馈光纤环的可调多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(2):0202003.
- 6 Xu Jia, Wu Sida, Liu Jiang, *et al.*. Noise-like pulsed Raman fiber lasers using graphene oxide saturable absorber[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302006.
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 基于氧化石墨烯的类噪声脉冲拉曼光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302006.
- 7 C J S De Matos, L de S Menezes, A M Brito-silva, *et al.*. Random fiber laser[J]. Phys Rev Lett, 2007, 99(15): 153903.
- 8 Z J Hu, Q Zhang, B Miao, *et al.*. Coherent random fiber laser based on nanoparticles scattering in the extremely weakly scattering regime [J]. Phys Rev Lett, 2012, 109(25): 253901.
- 9 Z J Hu, B Miao, T X Wang, *et al.*. Disordered microstructure polymer optical fiber for stabilized coherent random fiber laser[J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4644-4647.
- 10 S K Turitsyn, S A Babin, E El-taher, *et al.*. Random distributed feedback fibre laser[J]. Nat Photonics, 2010, 4(4): 231-235.
- 11 Hu Pengbing, Dong Xinyong. Research progress in random distributed feedback fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(11): 110606.
胡朋兵, 董新永. 随机分布反馈光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 110606.

- 12 Zhu Junmei, Zhang Weili, Rao Yunjiang, *et al.*. Output characteristics of low-threshold random distributed feedback fiber laser[J]. Chinese J 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.
- 13 Z N Wang, Y J Rao, H Wu, *et al.*. Long-distance fiber-optic point-sensing systems based on random fiber lasers[J]. Opt Express, 2012, 20(16): 17695-17700.
- 14 W L Zhang, Y J Rao, J M Zhu, *et al.*. Low threshold 2nd-order random lasing of a fiber laser with a half-opened cavity[J]. Opt Express, 2012, 20(13): 14400-14405.
- 15 Z N Wang, H Wu, M Q Fan, *et al.*. Third-order random lasing via Raman gain and Rayleigh feedback within a half-open cavity[J]. Opt Express, 2013, 21(17): 20090-20095.
- 16 M Pang, X Y Bao, L Chen. Observation of narrow line width spikes in the coherent Brillouin random fiber laser[J]. Opt Lett, 2013, 38(11): 1866-1868.
- 17 H Wu, Z N Wang, X H Jia, *et al.*. Flat amplitude multiwavelength Brillouin-Raman random fiber laser with a half-open cavity[J]. Appl Phys B, 2013, 112(4): 467-471.
- 18 H Ahmad, M Z Zulkifli, M H Jemangin, *et al.*. Distributed feedback multimode Brillouin-Raman random fiber laser in the S-band[J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(5): 055102.
- 19 C Q Huang, X Y Dong, S Y Zhang, *et al.*. Cascaded random fiber laser based on hybrid Brillouin-erbium fiber gains[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26(13): 1287-1290.
- 20 R S Shargh, M H Al-mansoori, S B A Anas, *et al.*. OSNR enhancement utilizing large effective area fiber in a multiwavelength Brillouin-Raman fiber laser[J]. Laser Phys Lett, 2011, 8(2): 139.
- 21 H E Türeci, L Ge, S Rotter, *et al.*. Strong interactions in multimode random laser[J]. Science, 2008, 320(5876): 643-646.
- 22 G J Cowle, D Y Stepanov, Y T Chieng. Brillouin/erbium fiber lasers[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(7): 1198-1204.
- 23 Y J Song, L Zhan, S Hu, *et al.*. Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with a polarization-maintaining fiber Sagnac loop filter[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(9): 2015-2017.
- 24 N A Cholan, M H Al-Mansoori, A S M Noor, *et al.*. Flattening effect of four wave mixing on multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. Applied Physics B, 2013, 112(2): 215-221.
- 25 Z N Wang, H Wu, M Q Fan, *et al.*. High power random fiber laser with short cavity length: theoretical and experimental investigations [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2015, 21(1): 0900506.
- 26 H Zhang, P Zhou, H Xiao, *et al.*. Efficient Raman fiber laser based on random Rayleigh distributed feedback with record high power[J]. Laser Phys Lett, 2014, 11(7): 075104.

栏目编辑: 宋梅梅