

## 10.6 GHz 线宽保持随机光纤激光种子源

陈晓龙<sup>1</sup>, 郑也<sup>1,2</sup>, 李璇<sup>1</sup>, 皮浩洋<sup>1</sup>, 赵纯<sup>1</sup>, 刘恺<sup>1</sup>, 全昭<sup>1</sup>,  
沈辉<sup>1</sup>, 杨依枫<sup>1</sup>, 何兵<sup>1,3\*</sup>, 周军<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038;

<sup>4</sup>南京中科神光科技有限公司, 江苏 南京 210038

**摘要** 在基于主振荡放大结构的光纤放大器中, 窄线宽、时域稳定的种子源对抑制非线性效应和获得数千瓦窄线宽的激光输出至关重要。随机光纤激光器基于瑞利散射和拉曼增益, 在时域稳定性上独具优势, 近年来得到了广泛研究。将基于自研光纤光栅搭建的 1018 nm 光纤激光作为抽运源, 采用半开放腔随机激光形式输出 1067.6 nm 激光, 并基于窄带光栅滤波和三级放大结构, 实现了 42.8 W、10.6 GHz 线宽的激光输出, 线宽在放大过程中保持不变, 此光源特别适合作为数千瓦级窄线宽光纤放大器的种子源。

**关键词** 激光器; 随机激光; 分布反馈; 瑞利散射; 受激拉曼散射

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0701005

## 10.6 GHz Linewidth Maintained Random Fiber Laser Seed Source

Chen Xiaolong<sup>1</sup>, Zheng Ye<sup>1,2</sup>, Li Xuan<sup>1</sup>, Pi Haoyang<sup>1</sup>, Zhao Chun<sup>1</sup>, Liu Kai<sup>1</sup>,  
Quan Zhao<sup>1</sup>, Shen Hui<sup>1</sup>, Yang Yifeng<sup>1</sup>, He Bing<sup>1,3</sup>, Zhou Jun<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China;

<sup>4</sup>Nanjing Zhongke Shen Guang Science & Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210038, China

**Abstract** In a fiber amplifier which is based on master oscillator power amplifier structure, generating a seed source with narrow linewidth and stable temporal property is very important for suppressing nonlinear effects and obtaining multi-kilowatts power. The random fiber laser based on Rayleigh scattering and Raman gain has been widely investigated due to the superior performance on temporal stability. Taking 1018 nm fiber laser based on self-fabricated fiber grating as the pump source, a 10.6 GHz, 1067.6 nm random fiber laser as the seed source is achieved by adopting a half open cavity. A three-stage power amplifier structure boosts the seed to 42.8 W, the linewidth is maintained during the power scaling process, which shows that the light source has a great potential to be used as the seed source of multi-kilowatts fiber amplifier.

**Key words** lasers; random fiber laser; distributed feedback; Rayleigh scattering; stimulated Raman scattering

**OCIS codes** 140.3510; 140.3550; 140.3490; 290.5870; 290.5910

收稿日期: 2017-03-01; 收到修改稿日期: 2017-03-23

基金项目: 科技部重点专项(2016YFB0402201)、国家自然科学基金(U1330134, 61308024, 61405202)、上海市自然科学基金(16ZR1440100, 16ZR1440200)、上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1421200)、上海市优秀技术带头人计划(17XD1424800)、江苏省科技支撑计划(BE2014001)、江苏省重点研发计划(BE2016005-4)、王宽诚教育基金

作者简介: 陈晓龙(1989—), 男, 本科, 工程师, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: xl\_chen@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: bryanho@siom.ac.cn

# 1 引 言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、热管理方便、结构紧凑等优点,在民用和国防领域应用广泛<sup>[1-3]</sup>。由于较小的模场面积和较大的增益长度,光纤激光器的功率提升会受到激布里渊散射效应的限制<sup>[4]</sup>。光谱合成和相干合成是解决单纤激光器功率提升受限的重要途径,但目前主流的合成技术都要求激光器的线宽小于 10 GHz,以保证合成光束的质量。传统的掺镱光纤放大器(YDFA)通常采用光纤光栅振荡器作为激光种子源,其时域特性较差,并容易产生巨脉冲,因此在后续光纤放大中容易引入自相位调制,从而导致光谱展宽<sup>[5-9]</sup>。如果能消除种子源的时域不稳定性,就可以抑制高功率光纤放大器中的光谱展宽现象,从而为合成技术提供具有良好光谱特性的光源<sup>[10-13]</sup>。随机光纤激光器(RFL)具有时域稳定和波长拓展灵活的特性,近几年得到了广泛研究<sup>[14-20]</sup>。RFL 利用一段很长的无源光纤中的瑞利散射效应提供随机分布反馈及拉曼增益,当抽运光超过一定阈值后就可以形成与抽运光拉曼频移对应波长的随机激光,抽运功率扰动引入的强度噪声可以通过较长的被动光纤实现补偿,从而获得时域稳定的光源<sup>[18,21]</sup>。将基于自研光纤布拉格光栅搭建的 1018 nm 光纤激光作为抽运源,采用半开放腔结构得到了中心波长为 1067.6 nm 的随机激光输出,并基于窄带光栅带通滤波实现了输出功率为 1.5 mW、线宽为 10.6 GHz 的窄线宽种子源。光纤光栅可以实现精确的温控,以保证输出激光的波长稳定性。全光纤三级放大系统将输出功率提升至 42.8 W,在功率增大过程中,输出激光光谱的 3 dB、10 dB 与 20 dB 带宽几乎保持不变,证明了搭建的种子在放大过程中具有保持线宽的能力,有望在数千瓦光纤激光系统中作为种子源使用。

# 2 实验结构

由图 1 可见,窄线宽随机激光光源的实验装置包括 3 个组成部分:1018 nm 光纤激光抽运源、半开放腔分布反馈结构和全光纤三级功率放大系统。其中,1018 nm 光纤激光抽运源是一个谐振腔结构的光纤激光器,该谐振腔由一对自制的 10/125  $\mu\text{m}$  光纤以及反射率、3 dB 带宽分别为 99.9%、2.25 nm 和 15%、1.12 nm 的光纤光栅组成,增益光纤为 Nufern 10/125  $\mu\text{m}$  掺镱光纤(YDF),谐振腔中加入长度为 40 m 的 Nufern 10/125  $\mu\text{m}$  掺铒光纤(GDF)以增加腔长,减小纵模间隔,提高 1018 nm 激光的时域稳定性,进而提高后续随机过程中拉曼效应的阈值,避免高阶拉曼激光产生。将 2 个中心波长为 975 nm 的 25 W 半导体激光器(LD)作为产生 1018 nm 激光的抽运源。包层光滤除器(PS)用以滤除残余抽运光,其后熔接一个分束比为 1:9 的分束器以实现功率调节,将 1018 nm 抽运激光功率控制在 4.5 W。

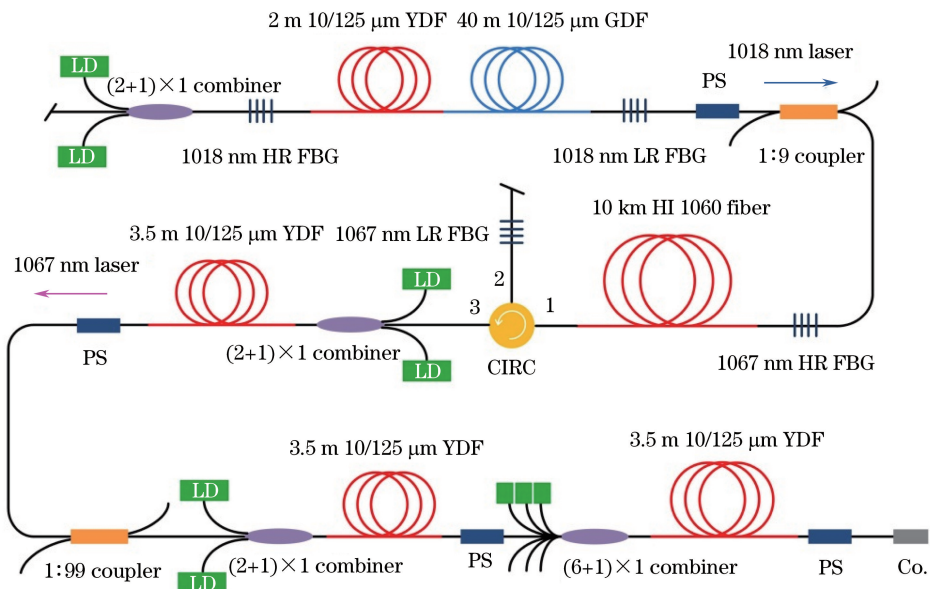


图 1 1067.6 nm 窄线宽随机激光光源实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of the 1067.6 nm narrow linewidth random fiber laser

1018 nm 的抽运激光首先经过中心波长为 1067.6 nm、带宽为 1.18 nm、反射率大于 99.9% 的高反(HR)光纤布拉格光栅(FBG),之后进入一段长度为 10 km 的 HI 1060 光纤。光栅与无源光纤提供的随机分布反馈形成半开放振荡腔,腔内增益由自发拉曼效应提供,1  $\mu\text{m}$  激光对应的一阶拉曼频移约为 13 THz<sup>[22]</sup>,1018 nm 抽运激光的一阶拉曼波长为 1067 nm,经过环形器(CIRC)与另一个低反(LR)光纤布拉格光栅(中心波长 1067.6 nm,带宽 0.035 nm,反射率 23%)滤波后得到种子激光输出。种子激光经过一个全光纤三级放大器进行功率放大。第一级使用 1 个(2+1) $\times$ 1 合束器将 2 个 3 W 的抽运光源抽运注入到 3.5 m 长的 10/125  $\mu\text{m}$  增益光纤中进行放大;第二级采用 1 个(2+1) $\times$ 1 合束器将 2 个 9 W 的抽运光源抽运注入 3.5 m 长的 10/125  $\mu\text{m}$  增益光纤中进行放大;第三级使用 1 个(6+1) $\times$ 1 合束器将 3 个 25 W 抽运光源抽运注入 3.5 m 长的 10/125  $\mu\text{m}$  增益光纤中进行放大,放大后的激光经过光纤准直器(Co.)输出。光谱与功率计监测输出光谱与功率特性。

### 3 实验结果与分析

由于环形器承受的功率有限,为了保证半开放腔在小功率下得到的随机信号激光功率的稳定,首先要保证 1018 nm 抽运光源的功率及其中心波长的稳定。考虑到工作过程中光纤光栅的中心波长易因温度的变化而发生改变,且对应的变化关系为<sup>[23]</sup>

$$\Delta\lambda = \lambda \cdot \xi \cdot \Delta T, \tag{1}$$

式中  $\lambda$  为光栅的中心波长; $\Delta T$  为光栅的温度变化; $\xi$  为光纤的热光系数, $\xi = 7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。随着谐振腔功率增加,光纤光栅受热升温后会出现中心波长红移的现象。由图 2 可见,当谐振腔光栅在没有任何温控的情况下,输出功率分别为 0.8 W 和 36 W 时,低反光栅温度在无任何主动冷却的情况下升高了 13  $^\circ\text{C}$ ,使得输出激光的中心波长发生了 0.1098 nm 的红移,波长漂移量为  $0.084 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,与理论计算结果  $0.071 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  基本一致。

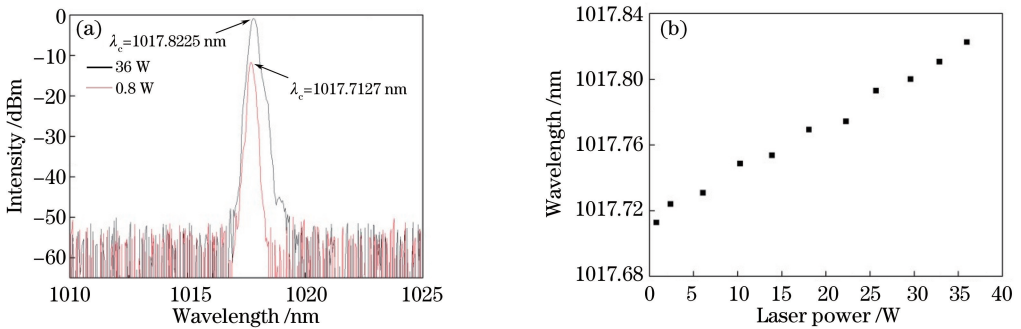


图 2 光纤光栅加热造成的激光中心波长漂移。(a)输出光谱图;(b)中心波长随输出功率的变化

Fig. 2 Center wavelength drift according to the heating of FBG. (a) Optical spectra; (b) center wavelength versus output laser power

因此,为了稳定谐振腔输出激光的中心波长,采用 TEC 温控装置对光栅进行封装冷却,当设置 TEC 温度为  $(20 \pm 0.1) \text{ } ^\circ\text{C}$  时,对应的光纤光栅的中心波长稳定在 1017.7 nm。图 3 给出了 4.5 W 的 1017.7 nm 激光的输出光谱,其放大的自发辐射光(ASE)抑制比达到了 52 dB。

4.5 W 的 1017.7 nm 抽运激光经过 10 km HI 1060 光纤后,输出激光功率为 290 mW,对应的光谱如图 4(a)所示。此时,1067.6 nm 处的一阶拉曼光已经超过了 1017.7 nm 抽运激光 10 dB 以上,而且还出现了少量的二阶拉曼光(1120.3 nm)。为了得到纯净的窄线宽 1067.6 nm 随机激光光源,在 HI 1060 光纤之后经过环形器和窄带光栅滤波,获得了输出功率约为 1.5 mW、3 dB 带宽为 0.044 nm 的 1067.6 nm 种子激光。接下来通过三级放大系统对 1.5 mW 的种子光逐级放大,第一级放大至 170 mW,第二级放大至 3.3 W。二级放大后对应的输出光谱如图 4(b)所示,除了中心波长为 1067.6 nm 的发射峰外,未见其他光谱成分,ASE 抑制大于 40 dB。

对 1067.6 nm 窄线宽随机激光光源在 3.3 W 时的频域与时域特性分别进行测试,结果如图 5 所示。

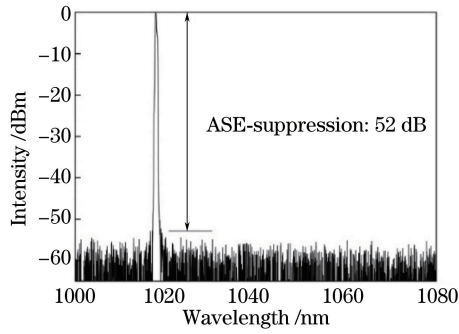


图 3 1017.7 nm 谐振腔输出激光光谱

Fig. 3 Output optical spectrum of 1017.7 nm laser cavity

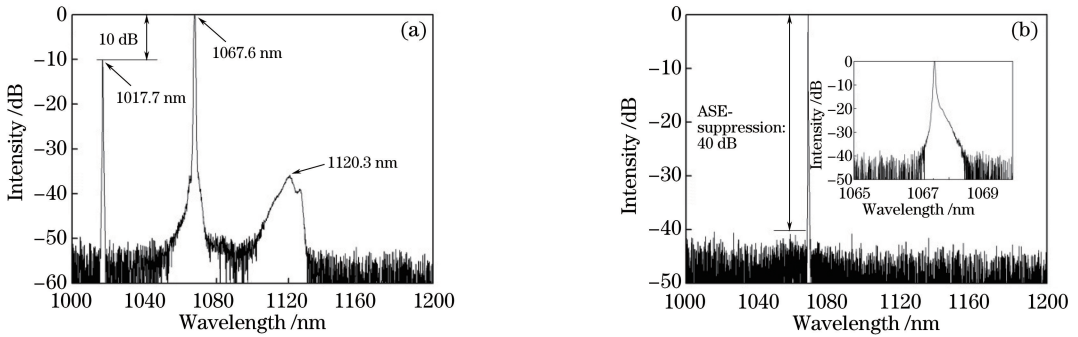


图 4 输出激光光谱图。(a)随机激光输出光谱;(b)第二级放大后的输出光谱

Fig. 4 Outputlaser spectra. (a) Output spectrum of random fiber laser;

(b) output spectrum after amplifying by the second-stage

10 km腔长对应的纵模频率间隔为  $c/(2nL)=10$  kHz,其中  $c$  为真空中的光速, $n$  为纤芯的折射率, $L$  为腔长。图 5(a)中,在  $0\sim 100$  kHz 内的频谱中没有与 10 kHz 相应的频率分量,满足随机激光的特性。图 5(b)为时域特性图,强度标准差小于 0.16%,强度振幅在时域上相对浮动不大,较为稳定。

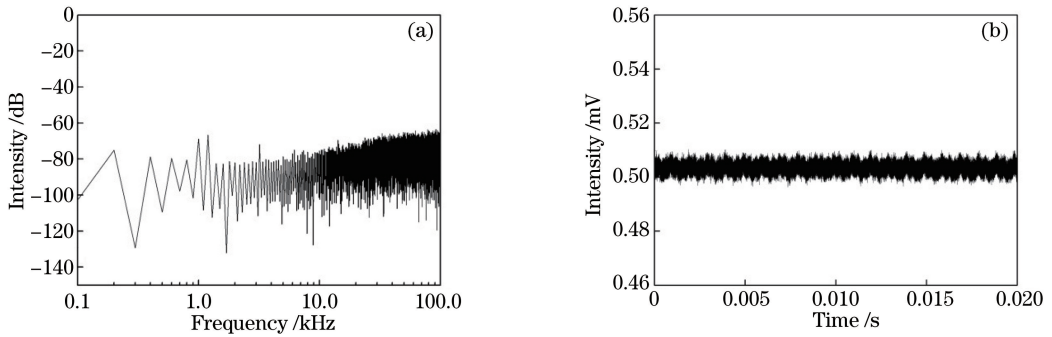


图 5 1067.6 nm 窄线宽随机激光光源的(a)频域特性和(b)时域特性

Fig. 5 (a) Frequency domain and (b) time domain properties of 1067.6 nm narrow linewidth random laser source

最后将二级输出的 3.3 W 的激光进行第三级放大,将功率放大至 42.8 W。放大过程中,在输出端采集各个功率量级的光谱,观察激光线宽的变化趋势,具体演变情况如图 6 所示。3 dB 带宽一直维持在 0.045 nm附近,没有展宽的趋势,如图 6(a)所示;10 dB 和 20 dB 带宽的最大漂移量也小于 3%,没有发生展宽现象,如图 6(b)所示。

## 4 结 论

基于自研光纤光栅搭建了 1018 nm 光纤激光,并通过半开放腔随机激光结构实现 1067.6 nm 激光的输出。环形器与光纤光栅窄带滤波实现种子激光的光谱整形,基于主振荡功率放大结构的(MOPA)全光纤放

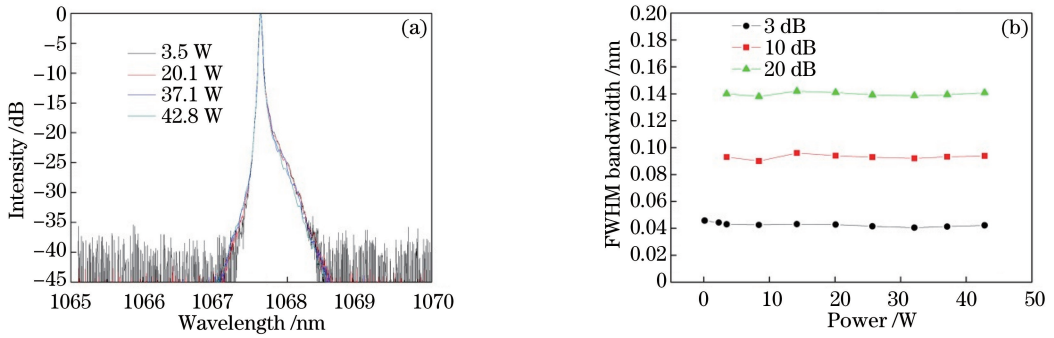


图 6 (a)第三级放大过程中不同功率量级对应的光谱图;(b) 3 dB、10 dB、20 dB 带宽随功率变化的趋势图

Fig. 6 (a) Spectra corresponding to different laser powers during the third amplifying process;

(b) change of 3 dB, 10 dB and 20 dB bandwidth at different output powers

大器实现了 42.8 W 功率放大,最终输出激光线宽为 10.6 GHz。1067.6 nm 种子光具有良好的时域特性和频域特性,在放大过程中光谱展宽得到良好的抑制,3 dB、10 dB 和 20 dB 带宽在功率放大过程中的最大偏移量不超过 3%。搭建的窄线宽随机激光种子源有望在数千瓦光纤放大器中抑制非线性效应引起的光谱展宽,从而在相干合成、光谱合成、激光雷达、相干通信以及其他线宽需求在 10 GHz 以下的领域中获得重要应用。

### 参 考 文 献

- [1] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, *et al.* Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [2] Tünnermann A, Schreiber T, Röser F, *et al.* The renaissance and bright future of fibre lasers[J]. Journal of Physics B, 2005, 38(9): S681-S693.
- [3] Limpert J, Röser F, Klingebiel S, *et al.* The rising power of fiber lasers and amplifiers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 537-545.
- [4] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, *et al.* Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [5] Kuznetsov A G, Podivilov E V, Babin S A. Spectral broadening of incoherent nanosecond pulses in a fiber amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(6): 1231-1236.
- [6] Manassah J T. Self-phase modulation of incoherent light[J]. Optics Letter, 1990, 15(6): 329-331.
- [7] Turitsyn S K, Bednyakova A E, Fedoruk M P, *et al.* Modeling of CW Yb-doped fiber lasers with highly nonlinear cavity dynamics[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8394-8405.
- [8] Bednyakova A E, Gorbunov O A, Politko M O, *et al.* Generation dynamics of the narrowband Yb-doped fiber laser[J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8177-8182.
- [9] Upadhyayaa B N, Chakravartya U, Kuruvillaa A, *et al.* Self-pulsing characteristics of a high-power single transverse mode Yb-doped CW fiber laser[J]. Optics Communication, 2010, 283(10): 2206-2213.
- [10] Zeringue C, Vergien C, Dajani I. Pump-limited, 203 W, single-frequency monolithic fiber amplifier based on laser gain competition[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 618-620.
- [11] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, *et al.* Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power[J]. Optics Letters, 2005, 30(5): 459-461.
- [12] Theeg T, Sayinc H, Neumann J, *et al.* All-fiber counter-propagation pumped single frequency amplifier stage with 300-W output power[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(20): 1864-1867.
- [13] Liu Guangbo, Yang Yifeng, Lei Min, *et al.* 1.5 kW near-diffraction-limited narrowband all-fiber superfluorescent source[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1202009.
- [13] 刘广柏, 杨依枫, 雷敏, 等. 1.5 kW 近衍射极限全光纤窄带超荧光光源[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1202009.
- [14] Turitsyn S, Babin S, El-Taher A E, *et al.* Random distributed feedback fibre laser[J]. Nature Photonics, 2010, 4: 231-235.
- [15] 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.
- [16] Churkin D V, Babin S A, El-Taher A E, *et al.* Raman fiber lasers with a random distributed feedback based on



- Rayleigh scattering[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033828.
- [17] Du X Y, Zhang H W, Ma P F, *et al.* Kilowatt-level fiber amplifier with spectral-broadening-free property, seeded by a random fiber laser[J]. *Optics Letter*, 2015, 40(22): 5311-5314.
- [18] Nuno J, Alcon-Camas M, Ania-Castanon J D. RIN transfer in random distributed feedback fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 27376-27381.
- [19] Sugavanam S, Yan Z, Kamynin V, *et al.* Multiwavelength generation in a random distributed feedback fiber laser using an all fiber Lyot filter[J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 2839-2844.
- [20] Feng Yan, Jiang Huawei, Zhang Lei. Advances in high power Raman fiber laser technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(2): 0201005.  
冯 衍, 姜华卫, 张 磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201005.
- [21] Turitsyn S K, Babin S A, Churkin D V, *et al.* Random distributed feedback fibre lasers[J]. *Physics Reports*, 2014, 542(2): 133-193.
- [22] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 4th ed. New York, USA: Academic Press, 2006: 205-216.
- [23] 饶云江, 王一平, 朱 涛. *光纤光栅原理及应用*[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 160-165.