

1.1 kW 窄光谱随机光纤激光放大

李腾龙^{1,2}, 李 阳¹, 彭万敬^{1,2}, 王小军¹, 马 毅^{1,2*}, 张 凯^{1,2}

¹中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 搭建了以掺镱光纤作为增益、单模光纤提供随机分布反馈的随机光纤激光器, 最大输出功率为 5.1 W, 半峰全宽(FWHM)为 0.34 nm。以该激光器作为种子源, 通过全光纤主振荡功率放大实现了 1102 W 的激光功率输出, 光光效率为 78.5%。放大过程中输出激光的 FWHM 基本保持不变, 均方根(RMS)谱宽为 1.24 nm。为进一步压缩随机光纤种子源的光谱线宽, 利用窄谱光纤光栅对随机光纤种子源进行滤波, 然后再进行放大, 最大输出功率为 1093 W, FWHM 为 0.61 nm, 均方根谱宽为 0.92 nm。放大过程中未观察到明显的放大自发辐射与受激布里渊散射现象。

关键词 激光器; 光纤激光器; 随机激光; 掺镱光纤放大器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201015

1.1 kW Narrowband Spectra Random Fiber Laser Amplifier

Li Tenglong^{1,2}, Li Yang¹, Peng Wanjing^{1,2}, Wang Xiaojun¹, Ma Yi^{1,2}, Zhang Kai^{1,2}

¹Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The random fiber laser is established with Yb-doped fiber as gain and single-mode fiber as the random distributed feedback, The maximum output power is 5.1 W and the full width at half maximum (FWHM) is 0.34 nm. The high power laser is realized by employing a main oscillator power amplifier configuration, seeded by the random fiber laser above, whose output power reaches 1102 W with an optical-to-optical efficiency of 78.5%. During the whole amplification process, the laser FWHM is well maintained but the root mean square (RMS) linewidth broadens to 1.24 nm. To suppress the spectral width of the random fiber seed laser, a narrowband fiber Bragg grating is used to filtering the random fiber seed laser, and then to enlarge. The maximum output power reaches 1093 W with FWHM of 0.61 nm and RMS linewidth of 0.92 nm. No amplified spontaneous emission and stimulated Brillouin scattering is observed in the whole amplification process.

Key words lasers; fiber laser; random laser; Yb-doped fiber amplifier

OCIS codes 140.3490; 060.2320; 140.3510

1 引 言

2010 年, Turitsyn 等^[1]提出随机光纤激光(RFL)概念, 它是利用光纤中的分布式瑞利散射作为反馈机制、受激拉曼散射效应作为增益机制的新型随机激光器。由于结合了光纤激光器和随机激光器的优势, 其具有结构简单、时空相干性低、输出稳定等特点, 因此在非线性光学、光纤通信传感、激光成像等领域有着广泛的应用前景, 已成为激光领域的研究热点^[1-3]。随着不同结构形式、增益类型随机光纤激光器的开发, 随机光纤激光向着高功率^[4-6]、多波段^[2-3,7]、窄光谱^[3,8-9]以及波长可调谐^[2,10]等方面快速发展。窄光谱方面, 2013 年, Sugavanam 等^[8]采用窄带光纤光栅和法布里-珀罗滤波器对随机拉曼光纤激光器进行滤波, 获得了谱宽

收稿日期: 2016-09-20; 收到修改稿日期: 2016-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(61605191, U1330134)

作者简介: 李腾龙(1987—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: nanruzi@163.com

* 通信联系人。E-mail: rufinecn@caep.cn

为 0.05 nm 的随机激光输出,但功率仅数十毫瓦。2015 年,李阳等^[9]采用增强瑞利散射光纤获得了线宽为 3.5 kHz 的单模随机激光输出,功率仍然不高。高功率方面,2015 年,Zhang 等^[5]报道了基于拉曼增益的随机光纤激光器,其总输出功率达到 124 W。同年,Du 等^[6]以随机拉曼光纤激光器作为种子源,采用主振荡功率放大(MOPA)结构放大至 1.03 kW;实验中同时观察到,随机光纤激光的线宽在放大过程中基本保持稳定,但该实验未控制种子源线宽,放大后激光光谱仍然较宽。随机光纤激光器如何在高功率输出的同时获得较窄的光谱,目前仍鲜有报道。

本文搭建了一个窄光谱随机光纤激光器种子源,以掺镱光纤作为增益、单模光纤提供随机分布反馈(RDFB),并通过窄谱光纤光栅控制线宽,获得了半峰全宽(FWHM)为 0.34 nm 的窄光谱随机激光输出。采用窄谱光纤光栅对种子源滤波以压缩其线宽,而后分别对滤波和未滤波种子源进行 MOPA,均获得了 1.1 kW 的随机光纤激光放大输出。未滤波种子源放大实验中,激光输出 FWHM 基本稳定,均方根(RMS)谱宽最大展宽至 1.24 nm。而滤波种子源放大过程中,当激光输出 FWHM 在一定功率以上时发生了明显展宽,在最大功率时 RMS 谱宽为 0.92 nm。

2 实验装置

图 1 为随机光纤激光 MOPA 实验装置示意图,整个系统由一个窄带随机光纤激光种子源加一级光纤放大器组成。随机光纤种子源采用前向抽运的半开腔结构,以一个最大功率为 25 W、中心波长为 976 nm 的激光二极管(LD)连接(2+1)×1 合束器提供抽运,长为 1.5 m 的大模场掺镱双包层光纤(LMA-YDF)提供增益,纤芯和内包层直径分别为 10,130 μm。选用窄光谱高反光纤布拉格光栅(HR-FBG)限制种子源的输出线宽,其中心波长为 1067.4 nm,13 dB 带宽(95%)为 0.3 nm。长为 2 km 的单模光纤提供随机分布反馈,纤芯和包层直径分别为 6,125 μm。整个种子源的剩余光纤端都切成 8°角以防止菲涅耳反射反馈。

放大器部分,长为 10 m 的 LMA-YDF 作为增益介质,纤芯和内包层直径分别为 20,400 μm,抽运源由一个(6+1)×1 合束器和 4 个最大功率为 350 W、中心波长为 976 nm 的 LD 组成。增益光纤盘绕在铝制水冷盘上,并且通过合适的盘绕直径以衰减高阶模。增益光纤末端与包层光滤波器(CPS)熔接,再与准直光缆连接后输出,使用功率计(PM)等设备测量输出激光特性。放大器与随机激光种子源之间,加入模场适配器(MFA)和大功率隔离器(ISO)隔离放大器回光,保护随机激光种子源,同时加入 2×2 耦合器(耦合比 1:99),用于放大过程中放大器回光的监测。

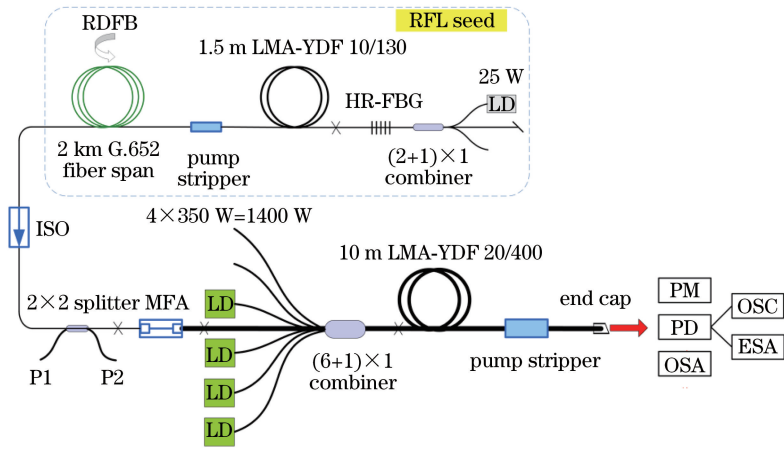


图 1 随机光纤激光 MOPA 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of MOPA structure seeded by random fiber laser

3 实验结果与分析

3.1 随机激光种子源测试

逐渐增加种子源的抽运功率,当注入的抽运功率超过 0.9 W 时,可以获得随机激光输出,种子源输出功

率随抽运功率的变化关系如图 2(a)所示。当抽运功率超过 19 W 时,种子源出现较为明显的放大自发辐射 (ASE)现象,继续增加抽运功率,则激光输出功率不再提升,并出现较强的 1030 nm 波段回光。这是因为种子源中的随机分布反馈较弱,随着抽运功率的增强,ASE 引起的自激或寄生振荡在增益竞争中逐渐处于有利地位。为此,将种子源抽运功率稳定在 ASE 产生阈值以下,此时种子源最大输出功率为 5.1 W,光光效率为 28.1%。使用光谱仪(OSA)测得输出光谱如图 2(b)所示,中心波长为 1067.5 nm,FWHM 为 0.34 nm,信噪比为 35 dB。将种子源输出衰减后连接到 200 MHz 的光电探测器(PD),并分别连接示波器(OSC)和频谱分析仪(ESA),用于探测激光输出的时域特性和强度噪声谱,测量结果如图 2(c)所示,可观测到种子激光输出稳定,不存在稳定的纵模结构,符合随机激光特点。

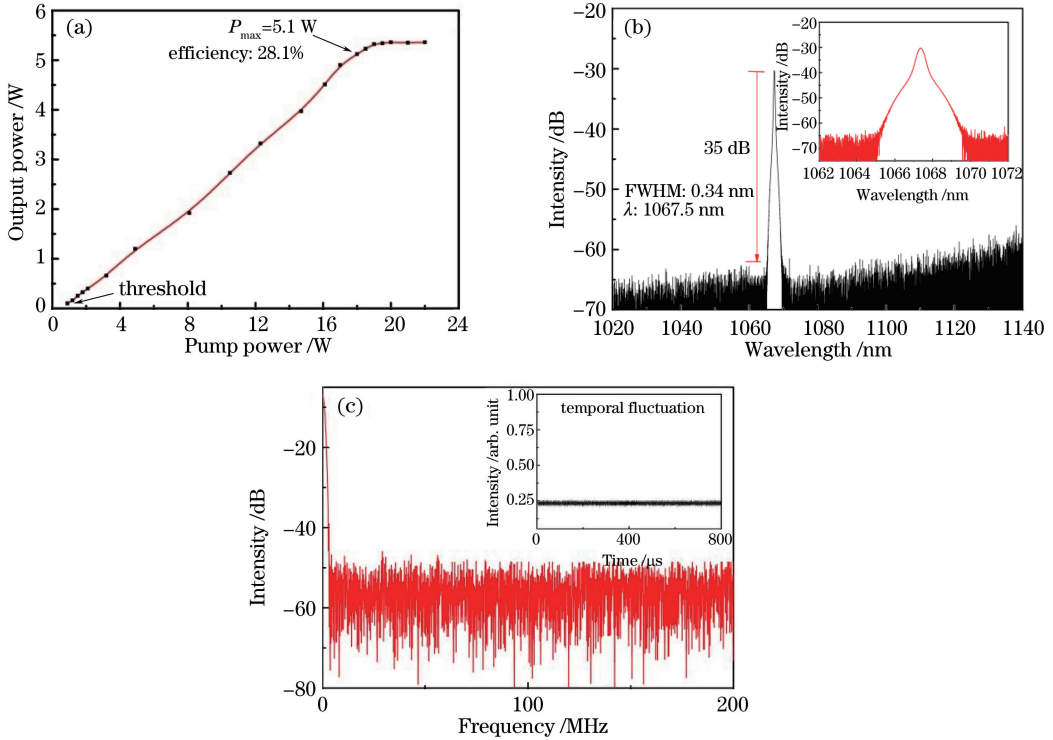


图 2 (a)输出功率随抽运功率的变化;(b)最高输出功率的输出光谱;(c)强度噪声谱与时域特性
 Fig. 2 (a) Output power versus pump power; (b) output spectra of maximum output power;
 (c) intensity noise spectrum and its time domain characteristic

3.2 随机激光放大

保持种子源在最高功率 5.1 W 下连续输出,逐步加载放大器中的 4 个 LD 电流,在加载过程中将放大器与种子源间的 2×2 耦合器端口与功率计连接,实时监测种子源前向输出与放大器回光,确保种子源与放大器都处于安全工作状态。实验装置最终实现 1102 W 激光输出,功率变化曲线和回光功率如图 3(a)所示,放大器光光效率为 78.5%。回光功率与激光输出呈线性关系,如图 3(a)内插图所示,通过激光输出光谱图[图 3(b)]未观测到异常光谱信息,可见放大器工作正常,未出现受激布里渊散射(SBS)和 ASE 现象。实验中同时观测到,系统展现出与 Du 等^[6]报道文献相同的线宽保持特性,FWHM 在放大过程中未发生明显展宽,但输出激光的 RMS 谱宽却随着输出功率线性增长,在输出功率为 1102 W 时展宽至 1.24 nm,如图 3(c)所示。激光输出的时域特性和强度噪声谱如图 3(d)所示,可见由随机激光种子源放大产生的激光不存在稳定的纵模结构,仍然符合随机激光特点。随机激光放大过程中 FWHM 保持稳定可通过如下理由解释:目前理论认为,种子源强度噪声引起了放大器中的光纤折射率变化,引入了自相位调制效应,光强变化导致相位变化时,频谱逐渐展宽^[6,10-11]。同时,传统窄谱种子源中存在大量频率接近的等间隔纵模,满足相位匹配关系,放大过程中容易发生多级四波混频导致输出光谱快速展宽^[12]。随机激光种子源强度波动相较于传统多纵模振荡器更加微弱,理想情况下也不存在稳定的纵模,因此以随机激光作为种子源的光纤放大器频谱展宽较其他光纤放大器要小。

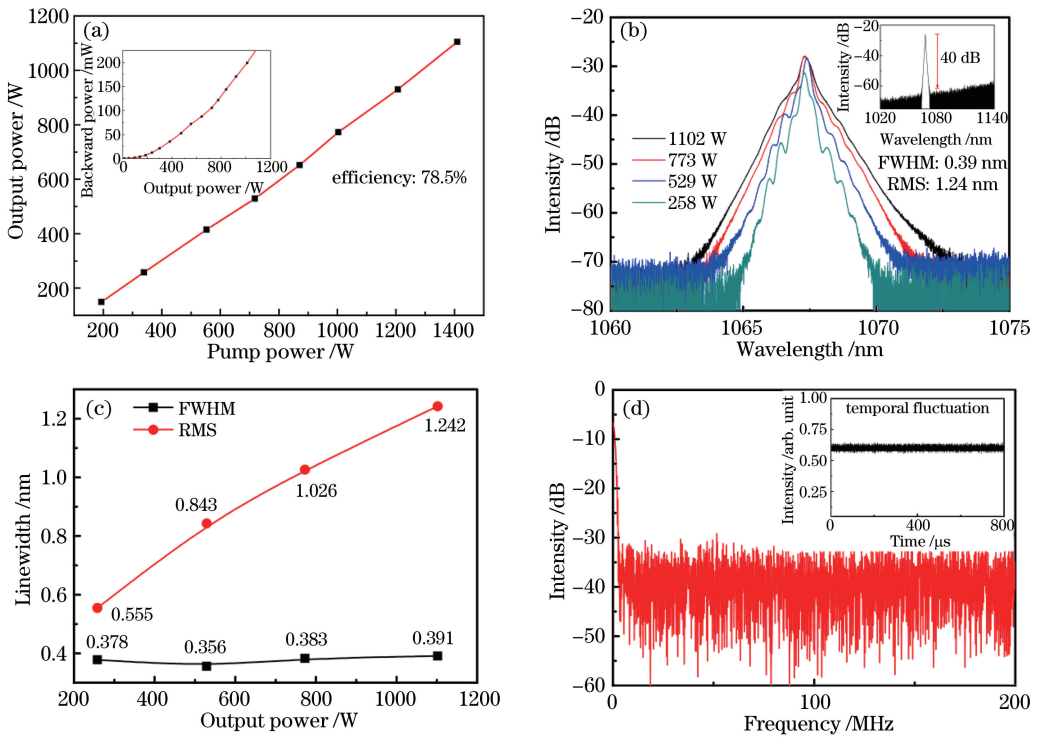


图 3 (a)输出功率随抽运功率的变化;(b)不同功率发射光谱细节图;(c) FWHM 与 RMS 谱宽随输出功率的变化;(d)强度噪声谱与时域特性

Fig. 3 (a) Output power versus pump power; (b) detailed emission spectra at different powers; (c) FWHM and RMS linewidth versus output power; (d) intensity noise spectrum and its time domain characteristic

3.3 随机种子源滤波后放大

实验中激光光谱的 FWHM 保持稳定,但 RMS 谱宽却仍然展宽至 1.24 nm。从图 2(b)中看到,虽然种子源输出光谱的 FWHM 与 HR-FBG 的带宽基本相同,但光谱中基底成分较多。为此,将随机激光种子源输出端通过隔离器后,接入对波长 1067 nm 高反的光栅(与种子源高反光栅参数相同)与环形器共同构成的滤波器,将种子光光谱滤去基底部分^[8,13],如图 4 所示。由于隔离器、环形器的插入损耗以及光栅滤波除去了部分能量,随机激光种子源经滤波后损耗较大,最大输出功率仅为 1.3 W。滤波后的光谱如图 4 所示,其 FWHM 为 0.31 nm,RMS 谱宽为 0.27 nm,滤波效果明显。

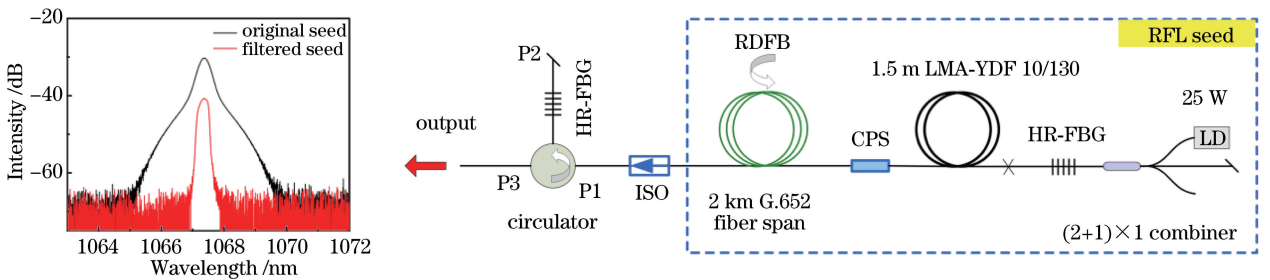


图 4 滤波随机光纤激光种子源结构及输出光谱

Fig. 4 Schematic of filtered random fiber laser seed and its output spectra

实验环境不变的情况下,将滤波后的随机激光种子源接入原始 MOPA 系统中进行放大。由于种子源输出功率较低,放大过程中缓慢增大放大器 LD 电流,同时通过 2x2 耦合器实时监测放大器回光,确保种子源与放大器都处于安全工作状态。实验装置功率变化曲线和回光功率如图 5(a)所示,放大器输出功率与光光效率与原始放大实验基本一致,最大输出功率为 1093 W。放大过程中放大器回光功率与激光输出功率仍然呈线性关系,但功率有所增长。同时从激光输出光谱图[图 5(b)]也未观测到 SBS 和 ASE 现象,可见放大

器工作正常。实验中观察到,放大激光的 RMS 谱宽随着输出功率线性增长,在最大输出功率为 1093 W 时展宽至 0.92 nm。但与原始实验不同的是,放大过程中激光的 FWHM 在输出功率 500 W 以上时出现了明显的展宽,不再具有线宽保持性质。输出激光时域特性和强度噪声谱如图 5(d)所示,与原始放大实验相同,不存在稳定的纵模结构。

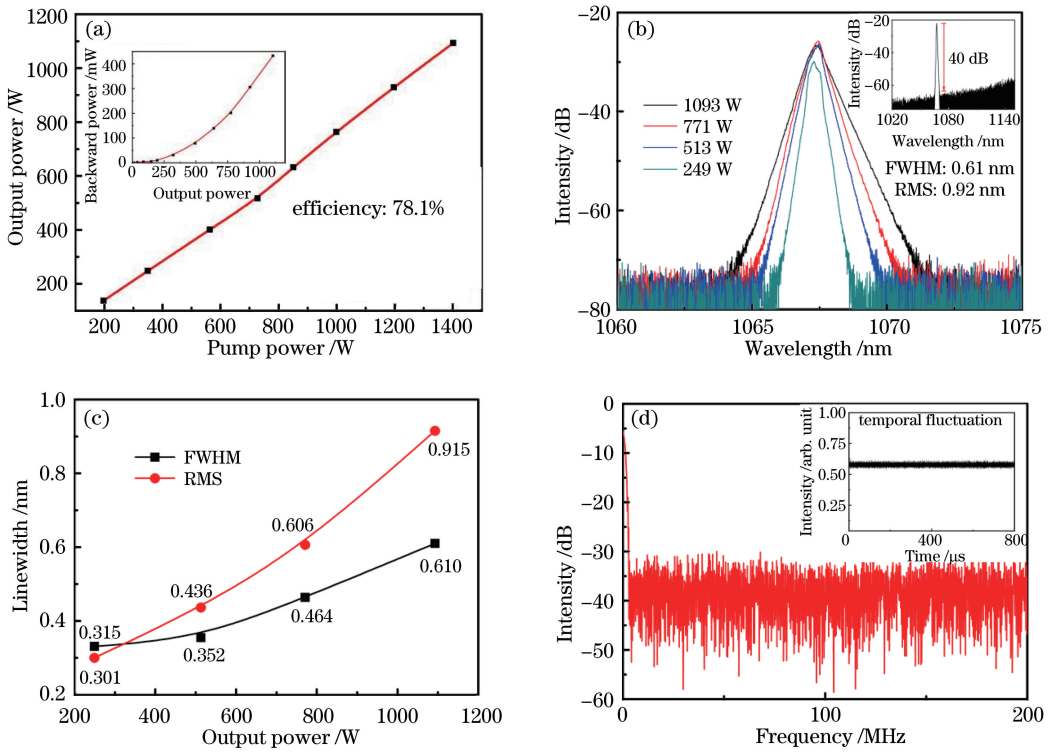


图 5 (a)输出功率随抽运功率的变化;(b)不同功率发射光谱细节图;(c) FWHM 与 RMS 谱宽
随输出功率的变化;(d)强度噪声谱与时域特性

Fig. 5 (a) Output power versus pump power; (b) detailed emission spectra at different powers; (c) FWHM and RMS
linewidth versus different powers; (d) intensity noise spectrum and its time domain characteristic

对比前后两个放大实验可以看到,虽然通过滤波明显降低了输出激光光谱最终的 RMS 谱宽,但滤波后其光谱展宽倍率是大于未滤波前的,而且 FWHM 在输出功率大于 500 W 以后不再保持稳定。目前初步认为是由于实验中种子注入功率低,导致放大器 ASE 基底较原始实验更大,如图 5(a)所示,放大器回光功率增长,种子激光在放大器传播放大过程中受其影响而信噪比下降,强度噪声变大,由此增强了自相位调制引起的频谱展宽效应。随着随机种子源的放大功率逐渐增大,其作用越来越明显,当超过一定阈值后,放大器就无法再保持 FWHM 了,这也造成了滤波后的 RMS 谱宽的光谱展宽倍率大于未滤波前的。其具体机理仍需要进一步理论分析与实验验证。

5 结 论

报道了基于随机光纤激光器种子源的 MOPA 结构全光纤放大器。采用掺镱光纤作为增益、长距离单模光纤提供随机反馈,搭建了窄光谱随机光纤激光种子源,种子源最大输出功率为 5.1 W,FWHM 为 0.34 nm。而后将该随机激光在全光纤放大器中放大至 1102 W,得益于随机激光种子源无稳定纵模且强度波动微弱,放大过程中 FWHM 呈现出与之前文献相同的线宽稳定性质,但 RMS 谱宽会随着输出功率线性增长,最大输出时展宽至 1.24 nm。为进一步压缩线宽,通过滤波方式将种子源光谱滤去基底部分,并在相同放大器中放大至 1093 W,但与原始实验不同的是,滤波放大过程中 FWHM 在超过一定功率后出现了明显的展宽,在最大输出功率时展宽至 0.61 nm,此时 RMS 谱宽为 0.92 nm。目前认为是滤波后种子源注入功率低,放大器 ASE 基底变大,增强了种子激光传播放大过程中的强度噪声,进而导致在放大功率超过一定阈

值后,无法再保持线宽稳定特性,但具体机理仍需进一步研究。实验中,由于随机光纤种子源中 2 km 光纤盘长度未得到充分优化,提供的随机反馈较弱,增益光纤的 ASE 限制了功率的提升;同时该光纤为通信波段光纤,对 1067 nm 激光损耗较大。故通过优化随机种子源参数,提升其功率水平,有望获得更高功率的随机光纤激光放大输出。

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(4): 231-235.
- [2] Turitsyn S K, Babin S A, Churkin D V, *et al.* Random distributed feedback fibre lasers[J]. *Physics Reports*, 2014, 542(2): 133-193.
- [3] Churkin D V, Sugavanam S, Vatik I D, *et al.* Recent advances in fundamentals and applications of random fiber lasers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(3): 516-569.
- [4] Zhang H, Zhou P, Lv H, *et al.* Towards high-power random fiber laser[C]. SPIE/COS Photonics Asia, International Society for Optics and Photonics, 2014: 92660I.
- [5] Zhang H, Zhou P, Wang X, *et al.* Hundred-watt-level high power random distributed feedback Raman fiber laser at 1150 nm and its application in mid-infrared laser generation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17138-17144.
- [6] Du X, Zhang H, Ma P, *et al.* Kilowatt-level fiber amplifier with spectral-broadening-free property, seeded by a random fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5311-5314.
- [7] 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.
- [8] Sugavanam S, Tarasov N, Shu X, *et al.* Narrow-band generation in random distributed feedback fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 16466-16472.
- [9] Li Yang, Liu Yan, Liu Zhibo, *et al.* Single-mode narrow linewidth random fiber laser with enhanced feedback from Rayleigh scattering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 084206.
李 阳, 刘 艳, 刘志波, 等. 基于增强瑞利反馈的单模窄线宽随机激光器[J]. *物理学报*, 2015, 64(8): 084206.
- [10] Huang Changqing, Liu Mengshi, Che Tengyun, *et al.* A tunable multi-wavelength random fiber laser based on half-open cavity[J]. *Chinese J 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] Goodno G D, McNaught S J, Rothenberg J E, *et al.* Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1542-1544.
- [12] Soh D B S, Koplou J P, Moore S W, *et al.* The effect of dispersion on spectral broadening of incoherent continuous-wave light in optical fibers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 22393-22405.
- [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.
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.