

# 随机光纤激光器输出可见光至近红外波段超连续谱

陈兰剑<sup>1,2</sup>, 宋锐<sup>1,2\*</sup>, 侯静<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>脉冲激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 利用随机光纤激光器结构对产生覆盖可见光至近红外波段的超连续谱进行了研究。实验采用半开腔的随机激光腔体结构, 腔内利用千米量级的掺锗光纤提供随机分布反馈和拉曼增益, 同时利用掺镱光纤提供主动增益, 最终实现了光谱范围覆盖 600~1700 nm、同时 20 dB 光谱带宽大于 660 nm 的超连续谱输出。实验结果表明, 随机光纤激光器作为一种新型超连续谱光源, 可用于多种对稳健性和性价比有较高要求的应用场合。

**关键词** 激光器; 光纤激光; 随机激光; 超连续谱; 随机分布反馈

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1136001

## Visible to Near-Infrared Supercontinuum Generated by Random Fiber Laser

Chen Lanjian<sup>1,2</sup>, Song Rui<sup>1,2\*</sup>, Hou Jing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 401173, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** We investigate visible to near-infrared supercontinuum generated by random fiber laser structure. Half-opened cavity random fiber laser is established, using germanium-doped fiber with several kilo-meters to provide random distributed feedback and Raman gain and ytterbium-doped fiber to supply active gain. Supercontinuum covering 600-1700 nm with 20 dB bandwidth of more than 660 nm is achieved. It shows that random fiber laser can be a novel supercontinuum source, which can be utilized to many applications where high robustness and low cost are required.

**Key words** lasers; fiber laser; random laser; supercontinuum; random distributed feedback

**OCIS codes** 140.3510; 190.4370; 190.4223; 290.5870

随机光纤激光器在 2007 年被法国的研究人员报道后<sup>[1]</sup>, 其因独特的时域稳定性、低成本、低空间相干性等特点而受到了世界光纤激光领域研究同行的广泛关注<sup>[2-5]</sup>。近年来, 关于随机光纤激光器各方面性能提高的报道层出不穷, 这些报道主要集中在随机光纤激光器的功率提升<sup>[6-7]</sup>、波长调谐<sup>[8-9]</sup>、偏振输出<sup>[10-11]</sup>和超连续谱产生<sup>[12-16]</sup>等方面。

利用随机光纤激光器产生超连续谱是一个新的研究方向, 传统的超连续谱产生方式主要有两种: 1) 利用高功率的连续激光或高峰值功率的脉冲激光泵浦高非线性光纤(如光子晶体光纤)得到超连续谱; 2) 利用高峰值功率的脉冲激光作为种子光, 在光

纤放大器中实现超连续谱输出。这两种技术方案经过多年的发展已经比较成熟, 但也存在一些不足, 比如, 普通的大模场面积双包层石英光纤与高非线性光纤之间的空间耦合或直接熔接都存在一定的损耗, 这些损耗在高功率时使得光纤非常容易受损。放大器结构的超连续光源方案也存在结构复杂、阈值较高等问题, 这些因素都限制了超连续谱光源的推广应用。

2018 年, 研究人员报道了由随机光纤激光器直接输出超连续谱的实验结果, 得到了 20 dB 带宽为 250 nm 的超连续谱输出<sup>[12-15]</sup>。本课题组也开展了相关工作, 在半开腔的随机激光器中实现了 20 dB

收稿日期: 2019-07-16; 修回日期: 2019-08-28; 录用日期: 2019-09-09

基金项目: 脉冲激光国家重点实验室主任基金(SKL2019ZR02)

\* E-mail: srnotice@163.com

带宽大于 500 nm 的近红外波段超连续谱输出<sup>[16]</sup>。目前,利用这种方式产生的超连续谱在光谱范围和输出功率方面还有提升的空间。

最近,本课题组对已有的实验结构进行优化,在最高功率为 44.7 W 的抽运下,利用级联四波混频效应,在随机光纤激光器中实现了可见光至近红外波段的超连续谱输出,输出功率为 3.45 W,光谱范围为 600~1700 nm,20 dB 带宽超过 660 nm,功率谱密度约为 3 mW/nm,这个结果是目前据我们所知利用随机激光器产生的光谱范围最宽的超连续谱。

该实验采用了半开腔的随机光纤激光结构,如图 1 所示。腔内的随机分布反馈和拉曼增益由千米量级的掺锗光纤提供,通过在腔内熔接掺镱光纤,为腔内引入主动增益。这种混合增益的机制有利于后续超连续谱的形成<sup>[15]</sup>。

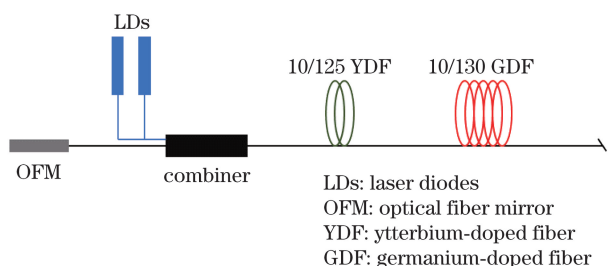


图 1 实验结构图

Fig. 1 Experimental setup

图 2 中浅色曲线代表超连续谱刚开始生成时的输出光谱(此时的泵浦功率为 4.3 W),增大泵浦功率至最高值,产生的超连续谱的宽度有所拓宽,可见光部分的强度增加近 13 dB。实验结果表明,半开腔的随机光纤激光器可以产生光谱极大展宽的激光,这完全不同于传统的随机激光器输出。实现这种输出的原因在于:在激光器腔内,沿着掺锗光纤的随机分布反馈与腔左端的光纤镜形成了数量巨大的

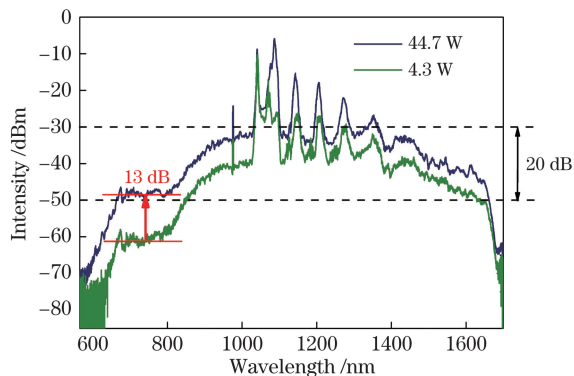


图 2 超连续谱光谱图

Fig. 2 Output spectra of supercontinuum

微型谐振腔,随着泵浦光功率的增加,损耗不同的谐振腔相继实现激光输出,随着起振成分的不断增多,分立的光谱成分逐渐连接在一起,从而形成了宽谱输出。在拉曼效应作用下,近红外波段光谱得到进一步的展宽。近红外成分增加后,利用模间级联四波混频过程<sup>[17-19]</sup>可以促进可见光部分的产生。

该实验结果表明,随机光纤激光器可作为一种新型的可见光至近红外的超连续谱光源。这种超连续谱光源具有成本低、稳健性好等特点,在对性价比和稳定性方面要求比较高的领域具有巨大的应用潜力。

### 参 考 文 献

- [1] de Matos C J, Brito-Silva A M, *et al.* Random fiber laser[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(15): 153903.
- [2] Hu P B, Dong X Y. 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.
- [3] 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.
- [4] Turitsyn S K, Babin S A, Churkin D V, *et al.* Random distributed feedback fibre lasers[J]. *Physics Reports*, 2014, 542(2): 133-193.
- [5] 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.
- [6] Wang Z H, Yan P, Huang Y S, *et al.* An efficient 4-kW level random fiber laser based on a tandem-pumping scheme[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 817-820.
- [7] Zhang H W, Huang L, Song J X, *et al.* Quasi-kilowatt random fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2613-2616.
- [8] Zhang L, Jiang H W, Yang X Z, *et al.* Ultra-wide wavelength tuning of a cascaded Raman random fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 215-218.
- [9] Dong J Y, Zhang L, Jiang H W, *et al.* High order cascaded Raman random fiber laser with high spectral purity[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5275-5280.
- [10] Xu J M, Huang L, Jiang M, *et al.* Near-diffraction-limited linearly polarized narrow-linewidth random fiber laser with record kilowatt output[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(4): 350-354.

- [11] Huang L, Xu J M, Ye J, *et al.* Power scaling of linearly polarized random fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0900608.
- [12] Ma R, Rao Y J, Zhang W L, *et al.* Broadband supercontinuum light source seeded by random distributed feedback fiber laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10323: 103237P.
- [13] Ma R, Rao Y J, Zhang W L, *et al.* Backward supercontinuum generation excited by random lasing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0901105.
- [14] Ma R, Rao Y J, Zhang W L, *et al.* Stable supercontinuum source based on random lasing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10591: 105910W.
- [15] Ma R, Zhang W L, Wang S S, *et al.* Simultaneous generation of random lasing and supercontinuum in a completely-opened fiber structure [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(8): 085111.
- [16] Chen L, Song R, Lei C, *et al.* Influences of position of ytterbium-doped fiber and ASE pump on spectral properties of random fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9647-9654.
- [17] Hao Q, Zeng H P. Cascaded four-wave mixing in nonlinear Yb-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 0900205.
- [18] Mondal P, Bhatia N, Mishra V, *et al.* Cascaded Raman and intermodal four-wave mixing in conventional non-zero dispersion-shifted fiber for versatile ultra-broadband continuum generation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2351-2357.
- [19] Perret S, Fanjoux G, Bigot L, *et al.* Supercontinuum generation by intermodal four-wave mixing in a step-index few-mode fibre [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(2): 022905.