光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.010

基于随机光栅的可调谐随机光纤激光器

沈成荣[1]，董新永[1,2]*

（1. 中国计量大学 光学与电子科技学院，杭州 310018；2. 广东工业大学 信息工程学院，广州 510006）

摘　要： 提出一种基于随机光栅与高反射布拉格光栅（FBG）相结合的可调谐随机光纤激光器。利用 980 nm 泵浦光源泵浦一段 7 m 长的掺铒光纤（EDF）进行增益放大，由随机光栅提供随机反馈。随机光栅长 7 cm，具有约 10 000 个折射率修改点，这些点由飞秒激光逐点写入，并沿光纤方向随机分布，两点相邻间隔小于 10 μm。同时，利用中心波长为 1 548 nm 的高反射 FBG 来组成半开放腔结构，实现了随机激光的输出。实验测得的泵浦阈值功率仅为 18 mW，斜率效率高达 13.2%，并通过改变 FBG 的中心波长，实现了输出激光波长的可调谐，调谐范围为 4.45 nm（1 548.04～1 552.49 nm）。得益于半开放式激光腔的设计和 EDF 的高增益，整个系统具有阈值低、效率高、结构简单等优点。

关键词： 光纤激光器；随机光纤激光器；随机光栅

中图分类号： TN242　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0505－04

Tunable Random Fiber Laser Based on Random Grating

SHEN Chengrong[1], DONG Xinyong[1,2]

（1. Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, CHN;
2. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, CHN）

Abstract: A tunable random fiber laser based on random grating and high reflection FBG is proposed. A 980 nm pump light source is used to pump a 7 m long erbium-doped fiber for gain amplification, and random feedback is provided by a random grating. The random grating is 7 cm long and has about 10,000 refractive index modification points. These points are written point by point by the femtosecond laser and randomly distributed along the fiber direction. The distance between the two points is less than 10 μm. At the same time, a semi-open cavity structure was formed by using a high-reflection FBG with a center wavelength of 1 548 nm to achieve random laser output. The experimentally measured pump threshold power is only 18 mW, and the slope efficiency is as high as 13.2%. By changing the center wavelength of the FBG, the output laser wavelength can be tuned with a tuning range of 4.45 nm (1 548.04～1 552.49 nm). Thanks to the design of the semi-open laser cavity and the high gain of EDF, the entire system has the advantages of low threshold, high efficiency, and simple structure.

Key words: fiber laser; random fiber laser; random grating

0　引言

随机光纤激光器（RFL）是一种基于光纤中随机分布反馈效应的新型随机激光器，它具有结构简单、方向性好和低相干输出等优点，可用于非线性光学、无散斑成像、光纤通信和传感等领域[1-6]。目前，大多数报道的随机光纤激光器都是在长距离单模光纤中，通过受激拉曼散射（SRS）或受激布里渊散射（SBS）的反向瑞利散射来获得增益[7-11]。但是，光纤

收稿日期：2020－04－21.
基金项目：国家自然科学基金项目(61775204).
* **通信作者：**董新永　**E-mail：**911989353@qq.com

中 SRS 或 SBS 的增益效率相对较低，并且由于光纤玻璃结构内的不均匀性导致的后向瑞利散射非常弱，这使得激光操作变得十分困难，通常需要数十千米长的单模光纤，而且需要较高的激光泵浦阈值[12-15]。另一方面，掺铒光纤(EDF)激光器已经在仪器测试、光学传感器和光谱学(包括低阈值，窄带宽和宽波长调谐范围)中引起了极大的关注。目前，已经有研究通过使用 EDF 代替拉曼增益来作为增益介质，与独特的光纤光栅组合，获得了低泵浦阈值随机光纤激光器[16-22]。

基于上述问题，本文提出了一种利用飞秒激光逐点写入的随机光栅(Random Grating)作为随机分布反馈介质，结合 EDF 作为增益介质的可调谐随机光纤激光器。利用高反射布拉格光栅(FBG)作为反射端镜，使整个结构形成半开放腔，在 980 nm 泵浦光的激励下，实现了阈值功率为 17 mW 的随机激光输出。与此同时，利用调谐装置改变 FBG 的中心波长实现了输出激光波长的可调谐，调谐范围为 4.45 nm(1 548.04～1 552.49 nm)。由于 EDF 的高增益和半开放腔的结构设计，整个系统具有阈值低、激光转换效率高以及有效结构短等优点。

1 激光器结构与原理

基于随机光栅的可调谐随机光纤激光器的实验装置如图 1 所示，它由一个最大输出功率为 300 mW 的 980 nm 泵浦光源、一个 980/1 550 nm 波分复用器(WDM)、一段 7 m 长的 EDF、一个随机光栅和一个高反射 FBG 组成。其中，WDM 的公共端连接掺铒光纤，输入端连接 980 nm 泵浦光源，反射端连接高反射 FBG，从而起到波分复用的作用；EDF 作为增益介质起到增益放大的作用；与此同时，随机光栅提供全波段的随机分布反馈。高反射 FBG 的中心波长为 1 548 nm，3 dB 带宽为 0.12 nm，FBG 作为反射端镜，使整个系统成为半开腔系统，这样可以显著降低随机光纤激光器的阈值功率，并用应力调谐装置来改变 FBG 的中心波长，从而达到波长可调谐的目的。用分辨率为 0.02 nm 的光学光谱仪(OSA)和光功率计来测量输出功率，并在 FBG 一侧的光纤尾部切割成约 8°的倾斜角来消除光纤末端的菲涅耳反射。

本文所使用的随机光栅是由飞秒激光逐点写入的，其栅区长度为 7 cm，具有约 10 000 个折射率修改点，并沿单模光纤轴向随机分布，两个折射率修改点的间隔小于 10 μm。随机光栅的输出谱如图 2 所示，其提供的随机反馈强度比 10 km 长的单模光纤所提供的反馈强度更高。增强的折射率具有不均匀性，产生反向瑞利散射效应具有随机性，因此会产生随机分布的光反馈。

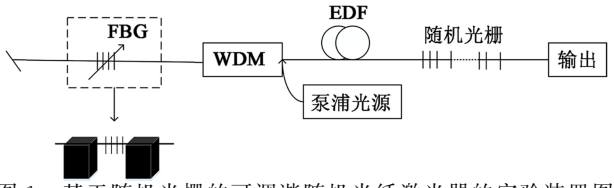


图 1 基于随机光栅的可调谐随机光纤激光器的实验装置图

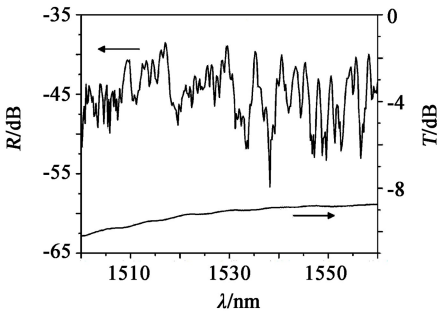


图 2 随机光栅的输出谱

随机光纤激光器的工作原理为：泵浦光通过 WDM 耦合进入 EDF，对其进行激励，铒离子吸收泵浦光能量后，从基态跃迁至高能级状态，然后以无辐射的方式跃迁到亚稳态能级，铒离子不断吸收泵浦光能量而在上能级聚集，当其数目达到一定值后，会从亚稳态跃迁到基态并辐射光子，最终实现能级间的粒子数反转，从而产生受激辐射，对通信波段的光进行光增益放大。一方面，由于随机光栅的随机分布反馈作用，在经过 FBG 的高反射之后，光增益会在 EDF 中放大。随着泵浦功率的增加，当系统的总增益克服了激光腔中的总损耗时，就会发生谐振，形成随机激光的输出。在这个过程中，随机光栅的点间距是随机分布的，所以其提供反馈的谐振腔的腔长和相位都不是固定的，因此该系统为随机光纤激光器。另一方面，在实现随机激光的输出后，利用应力调谐装置对高反射 FBG 施加轴向应变，通过改变高反射 FBG 的中心波长，来实现可调谐随机光纤激光器。

2 激光器的输出特性

图 3 显示了当高反射 FBG 的中心波长固定为 1 548 nm 时，在不同功率下测得的激光输出光谱。从图中可以发现，产生随机激光的阈值为 18 mW，

由于窄带宽 FBG 的选频滤波作用，只出现了一个主激光峰。在泵浦功率 P_p 为 30 mW 时，在主峰左边出现了一个侧峰。在泵浦功率到 50 mW 时，在峰值处分裂出两个主峰。随着泵浦功率的增加，侧峰有时消失，有时又会出现。光学信噪比(OSNR)则显著增加。另一方面，对输出光谱的具体数值进行分析，可以得到：随着泵浦功率的增加，激光输出的中心波长向长波方向偏移 0.05 nm，3 dB 幅值增加了 0.04 dB，OSNR 逐渐增加到 55 dB。

这可能是因为泵浦功率的增加导致了更多的激光模式被激发，而这些模式的波长并不完全相同，从而导致激光发射光谱的展宽和波长发生变化。同时，由于高反射 FBG 会将谐振腔的大部分功率都返回光学谐振腔，从而进一步加强腔内的模式竞争。除此之外，激光功率的增加会引起非线性效应，这也会使激光光谱变宽，从而影响激光的输出光谱。

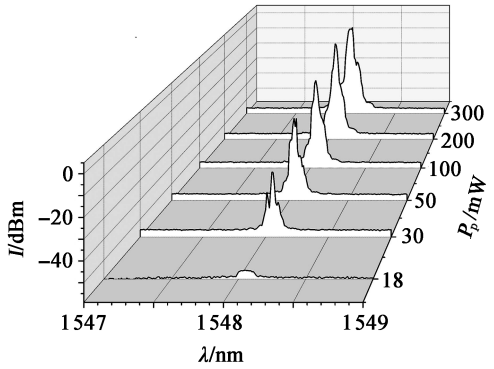


图 3　当高反射 FBG 的中心波长为 1 548 nm 时，在不同功率下测得的激光输出光谱

为了进一步研究该随机激光器的输出特性，不对 FBG 施加任何应力，将泵浦功率维持在 300 mW 的最大功率，在 25 ℃的实验室环境下，每 2.5 min 测量一次随机激光输出光谱，总共测 10 次。测量结果如图 4 所示，可以得出波长和功率波动分别为 0.04 nm 和 1.5 dB。可见光纤布拉格光栅窄宽带的滤波作用，使得输出激光的中心波长较为稳定。另一方面，在该泵浦功率下，激光腔内的模式竞争比较强烈，尤其是前 5 min 和 5～10 min 的功率波动比较明显，10 min 之后波动趋缓。该实验结果表明激光结构具有良好的稳定性。

在高反射 FBG 的中心波长为 1 548 nm 时，该光纤随机激光器的输出功率随泵浦功率的变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出，在泵浦功率为 300 mW 时，激光器的输出功率 P_{out} 为 36.7 mW，斜率效率达到了 13.2%，这与普通(非随机)光纤激光器的效率相当。

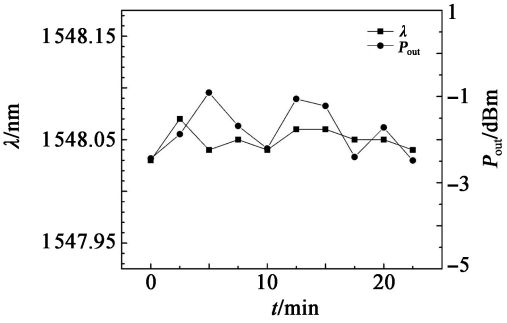


图 4　在泵浦功率为 300 mW 时，不同时间下的输出光谱

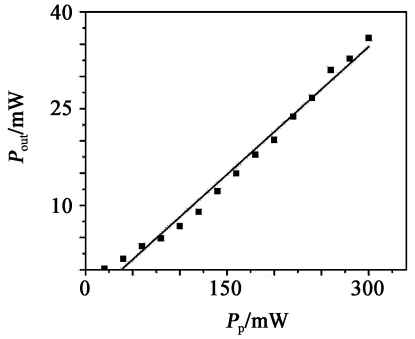


图 5　光纤随机激光器的输出功率随泵浦功率变化曲线

利用高反射 FBG 的选频滤波特性，可以通过改变 FBG 的中心波长，实现输出激光的波长可调谐。调节泵浦功率至 300 mW 并保持不变，通过应变装置改变 FBG 的轴向应变量。每改变一个应变，待输出激光稳定后，记录其激光输出光谱。随机激光的输出光谱与应变幅度 σ 的关系如图 6 所示。其调谐范围最大可达 4.45 nm(1 548.04～1 552.49 nm)，并且最大功率波动仅为 3 dB，在随机激光的正常波动范围内。其波长漂移量与应力幅度基本成线性关系。

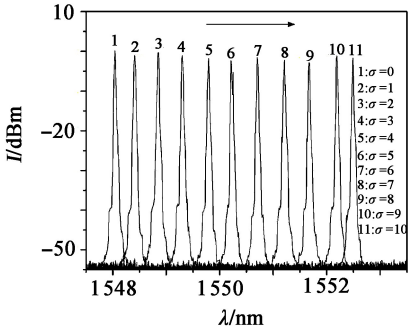


图 6　随机激光的输出光谱与应变幅度的关系

3　结论

利用高浓度 EDF 进行增益放大，以飞秒激光逐

点写入的随机光栅作为随机反馈介质，实现了一种具有低阈值、较高稳定性的可调谐随机光纤激光器，并对其光谱特性和输出特性做了研究。实验中，利用飞秒激光逐点写入了 10 000 个折射率调制点形成随机光栅，并使用高反射 FBG 形成半开腔系统。最终获得的随机激光输出的阈值功率仅为 18 mW，斜率效率为 13.2%。通过 FBG 的调谐装置，实现输出激光波长的可调谐，调谐范围最大可达 4.45 nm(1 548.04～1 552.49 nm)。实验结果表明，本文提出的随机光纤激光器具有低阈值、高转换效率以及较高稳定性等优点。这种基于无源器件的简单且紧凑的结构，在实际应用中非常有吸引力，特别是在光纤光学传感、光通信和生物医学研究领域。

参考文献：

[1] Ambartsumyan R, Basov N, Kryukov P. A laser with a nonresonant feedback[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 1966, 2(9): 442-446.

[2] 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)：18-23.
Hu Pengbing, Dong Xinyong. Research progress in random distributed feedback fiber laser[J]. Laser & Optoelectron. Progress, 2011, 48(11): 18-23.

[3] Fotiadi A A. Random lasers: An incoherent fibre laser[J]. Nature Photon., 2010, 4(4): 204-205.

[4] Redding B, Choma M A, Cao H. Speckle-free laser imaging using random laser illumination[J]. Nature Photon., 2012, 6(6): 355-359.

[5] Tao Z, Bao X, Chen L. A self-gain random distributed feedback fiber laser based on stimulated Rayleigh scattering [J]. Opt. Communications, 2012, 285(6): 1371-1374.

[6] Wang L, Dong X, Shum P P, et al. Tunable erbium-doped fiber laser based on random distributed feedback[J]. IEEE Photon. J., 2014, 6(5): 1-5.

[7] Liu Y, Dong X, Jiang M, et al. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on random distributed feedback[J]. Appl. Phys. B, 2016, B122(9): 240-241.

[8] Huang C, Dong X, Nan Z, et al. Multiwavelength Brillouin-erbium random fiber laser incorporating a chirped fiber Bragg grating[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., 2014, 20(5): 294-298.

[9] Huang C, Dong X, Zhang S, et al. Cascaded random fiber laser based on hybrid Brillouin-erbium fiber gains[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(13): 1287-1290.

[10] Wang L, Dong X, Shum P P, et al. Random laser with multiphase-shifted Bragg grating in Er/Yb-codoped fiber[J]. J. of Lightwave Technol., 2015, 33(1): 95-99.

[11] Pang M, Xie S, Bao X, et al. Rayleigh scattering-assisted narrow linewidth Brillouin lasing in cascaded fiber[J]. Opt. Lett., 2012, 37(15): 3129.

[12] Lizarraga N, Puente N P, Chaikina E I, et al. Single-mode Er-doped fiber random laser with distributed Bragg grating feedback[J]. Opt. Express, 2009, 17(2): 395.

[13] Song J, Dong X, Guo Z, et al. Random laser with Erbium-doped fiber and FS-laser introduced random fiber grating, 2018[C]// Proc. 2018 Asia Communications and Photonics Conf., 2018.

[14] Fan M, Wang Z, Wu H, et al. Low-threshold, high-efficiency random fiber laser with linear output[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(3): 319-322.

[15] Xu Y, Gao S, Lu P, et al. Low-noise Brillouin random fiber laser with a random grating-based resonator[J]. Opt. Lett., 2016, 41(14): 3197.

[16] Gagne M, Kashyap R. Random fiber Bragg grating Raman fiber laser[J]. Opt. Lett., 2014, 39(9): 2755.

[17] Hu Z, Gao P, Xie K, et al. Wavelength control of random polymer fiber laser based on adaptive disorder[J]. Opt. Lett., 2014, 39(24): 6911.

[18] Sugavanam S, Tarasov N, Shu X, et al. Narrow-band generation in random distributed feedback fiber laser[J]. Opt. Express, 2013, 21(14): 16466.

[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]. Opt. Express, 2014, 22(3): 2839.

[20] 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)：35-41.
Zhu J, Zhang W, Rao Y, et al. Output characteristics of low-threshold random distributed feedback fiber laser[J]. Chinese J. of Laser, 2013, 40(3): 35-41.

[21] Babin S A, El-Taher A E, Harper P, et al. Tunable random fiber laser[J]. Phys. Rev. A, 2011, 84(2): 4903-4911.

[22] Pinto A M R F. Interrogation of a suspended-core Fabry-Perot temperature sensor through a dual wavelength Raman fiber laser[J]. J. of Lightwave Technol., 2010, 28(21): 3149-3155.

作者简介：

董新永(1975—)，男，博士，研究员，主要从事光纤激光器、光纤通信和光纤传感等方面的研究。