

基于随机光纤光栅的窄线宽随机光纤激光器

胡杰¹, 王奕斐¹, 邢志坤¹, 王震¹, 刘陈^{1,2}, 闫志君^{1,2*}, 孙琪真^{1,2}, 刘德明^{1,2}

¹华中科技大学光学与电子信息学院下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074;

²华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 为实现低起振阈值、高斜率效率的短腔窄线宽随机激光输出,提出一种基于随机分布光栅阵列的窄线宽随机光纤激光器。基于随机分布光栅阵列的随机光栅可有效提升随机光纤激光器的起振阈值与泵浦功率。在满足光局域化的前提下,利用随机光纤光栅超窄反射峰搭建超窄线宽随机光纤激光器,该激光器实现了1.33 kHz的窄线宽随机激光输出,起振阈值为24.5 mW,斜率效率约为10%,且激光输出功率与中心波长处于稳定状态。与其他激光器相比,所提激光器具有更低的起振阈值、更高的斜率效率、更短的腔长及相对简单的结构,有望在光通信、高功率窄线宽光纤激光器、光纤传感等领域得到进一步应用。

关键词 激光器; 光纤激光器; 光纤光栅; 窄线宽; 随机光纤激光器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1614002

Narrow-Linewidth Random Fiber Laser Based on Random Fiber Grating

Hu Jie¹, Wang Yifei¹, Xing Zhikun¹, Wang Zhen¹, Liu Chen^{1,2},

Yan Zhijun^{1,2*}, Sun Qizhen^{1,2}, Liu Deming^{1,2}

¹National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

²Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract In this paper, we propose a narrow-linewidth random fiber laser based on random distributed grating array to achieve a short cavity length and narrow-linewidth random laser with low pump threshold and high slope efficiency. The random grating based on randomly distributed grating array can effectively improve the pump threshold and pump power of the random fiber laser. Based on the localization theory of light, a narrow-linewidth random fiber laser is constructed with the ultra-narrow reflection peak of the random fiber grating. The laser can generate a stable narrow linewidth random laser output of 1.33 kHz, the pump threshold is approximately 24.5 mW, and the slope efficiency is approximately 10%. Moreover, the central wavelength and laser output power remain stable. Compared with other lasers, the proposed laser has a lower pump threshold, higher slope efficiency, shorter cavity length, and relatively simpler structure. Accordingly, the proposed laser can potentially be applied in several applications, including optical communication, narrow-linewidth high power fiber lasers, and fiber sensors.

Key words lasers; fiber laser; fiber grating; narrow linewidth; random fiber laser

OCIS codes 140.3510; 140.3500; 050.2770

1 引 言

对比一般的激光器,随机激光器由于具有无固定腔镜结构、结构相对简单、相干性低等特点,在生命科学^[1]、光学成像^[2]等方面有较大的应用潜力。

但传统的随机激光器中的随机反馈通常是三维的,导致激光器效率不高。2010年,Turitsyn等^[3]提出随机光纤激光器,基于光纤一维结构的特点,该激光器实现了更高的转换效率,近年来受到广泛研究。目前实现随机光纤激光器主要有两种方案,分别是

收稿日期: 2020-04-20; 修回日期: 2020-05-06; 录用日期: 2020-05-11

基金项目: 国家重点研究发展计划(2018YFB2100902)、湖北省自然科学基金创新群体(2019AAA053)、湖北省技术创新专项重大项目(2018AAA040)、中央高校基本研究基金(2019kfyRCPY095)

* E-mail: yanzhijun@gmail.com

基于瑞利散射(RS)的随机分布式反馈光纤激光器(RDFB-FL)^[4]和基于人造随机散射增强点(ARSEP)的随机光纤激光器^[5-6]。RDFB-FL主要基于瑞利散射原理,由于瑞利散射客观存在于光纤中且在光纤中随机分布,因此RDFB-FL具有结构简单、无纵模运行、能抑制频率噪声^[7]等优点。通常RDFB会与拉曼增益结合实现分布式结构,该类激光器在光通信^[8]、分布式光纤传感^[9-10]、高功率激光器^[11-12]等领域有较大应用价值。由于随机光纤激光器的结构特性,其窄线宽输出成为研究热点之一^[13]。相关研究人员将瑞利散射线宽压缩特性与布里渊增益(BG)的窄带宽特点相结合,提出了布里渊随机光纤激光器^[14-15],实现超窄线宽激光输出,但瑞利散射的背向散射系数较小,激光器通常需要几千米以上长的反馈光纤才能实现窄线宽随机激光的输出,导致激光器起振阈值相对较高。为减小反馈光纤的长度,降低激光器起振阈值,研究人员提出一种采用ARSEP代替瑞利散射的方案^[16]。ARSEP主要有两种制备方案:1)在光纤上随机刻写大量折射率畸变点以增强光纤的后向散射^[17-18],点与点的间隔是随机的,在较短的光纤长度内得到比瑞利散射方案更强的随机反馈;2)在光纤上随机刻写弱光栅阵列^[19-20],光栅间的间隔是随机的,基于光局域化效应实现了更强的随机反馈,所搭建的随机光纤激光器阈值通常更低。Zhang等^[16]采用随机折射率畸变点增强光纤代替瑞利散射反馈光纤,有效地减小了腔长,但较低的布里渊阈值需要一定长度的腔长,激光器腔长仍相对较长。2014年Li等^[21]将掺铒光纤作为增益介质,利用折射率畸变点增强光纤提供随机反馈,实现了小于10 m的腔长,得到

了线宽达2 kHz量级的随机激光。在短腔的基础上,Zhang等^[22]通过刻写工艺的调整进一步提升了ARSEP的反射率,从而得到了阈值更低的短腔窄线宽随机光纤激光器。但从整体上而言,单点刻写的随机折射率畸变点光纤的随机反馈强度仍然较小。2016年,许儒泉等^[23]通过拉丝塔在线制作光栅的方式制备了全光纤光栅(AGF),在长度为130 m的光纤上刻写了大量随机分布的光栅,实现了1.25 kHz的窄线宽随机激光输出,该光纤虽提升了随机反馈强度,但腔长仍处于百米量级。

为了实现阈值更低、斜率效率更高的短腔窄线宽随机激光输出,本文提出了一种基于随机分布光栅阵列的窄线宽随机光纤激光器。通过仿真设计得到相关刻写参数,利用相位掩模板法对光栅进行刻写,最终搭建了环腔随机光纤激光器,实现了波长稳定的窄线宽随机激光输出,激光器的起振阈值为24.5 mW,斜率效率达10.05%。

2 随机光纤光栅的仿真及制备

2.1 随机分布光栅阵列的仿真

光在随机光纤光栅中的谐振主要依靠光的局域化理论,光局域化的产生需要满足反馈介质长度(随机光纤光栅长度)大于光局域化长度的要求。根据局域化理论,随机光纤光栅的透射率为

$$T(L) \approx \exp(-L/2\xi), \quad (1)$$

式中: L 为随机光纤光栅的长度; ξ 为光局域化长度。通过对随机光纤光栅进行仿真,获得满足光局域化条件的相关光栅参数,并对随机分布光栅阵列进行刻写,提高了刻写的效率。主要利用传输矩阵法对随机光纤光栅进行仿真,其传输关系^[24]可以表示为

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \prod_i^j \begin{pmatrix} \left\{ \cosh[\gamma R_j(z)] - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sinh[\gamma R_j(z)] \right\} \exp \left[-2 \frac{i\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} R_j(l) \right] & -i \frac{k}{\gamma} \sinh[\gamma R_j(z)] \exp \left[-2 \frac{i\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} R_j(l) \right] \\ i \frac{k}{\gamma} \sinh[\gamma R_i(z)] \exp \left[2 \frac{i\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} R_j(l) \right] & \left\{ \cosh[\gamma R_i(z)] - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sinh[\gamma R_j(z)] \right\} \exp \left[2 \frac{i\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} R_j(l) \right] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(z, \delta) \\ v(z, \delta) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中: $u(z, \delta)$ 和 $v(z, \delta)$ 分别为进入光栅前的前向传播场和后向传播场的缓慢变化的振幅; U 和 V 分别为经过随机光栅后的前向传输场与后向传输场的缓慢变化的振幅; $\gamma^2 = |q|^2 - \delta^2$, $q = q(z)$ 为光栅耦合系数, δ 为波数失谐量; $R_i(z)$ 、 $R_j(z)$ 分别为第 i 、 j 个布拉格光栅的随机长度; $R_j(l)$ 为第 j 段相

邻光栅的随机间隔; $\hat{\sigma}$ 为自耦合系数; λ 为光栅的中心波长; n_{eff} 为光纤的有效折射率; k 为波数。可以通过调节光栅的强度、光栅的长度及光栅的间距来调整随机性,本文主要改变光栅的间距,其余参量保持统一。

随机定义光栅长度及随机间距,结合边界条件

可得随机光纤光栅的透射谱与反射谱。在仿真过程中,单个光栅的反射率设置为 5%,光栅长度为 2 mm,中心波长为 1550 nm,随机间隔为 2~7 mm。对 15 个相同的光栅进行级联,得到的随机光纤光栅长度为 91.3 mm,反射谱如图 1 所示。由反射谱可估算出,光栅的平均透射率为 0.3,推测光栅的局域化长度约为 37.9 mm,小于光栅长度,因此该光栅满足随机激光器的局域化条件,可采用仿真所得的光栅参数进行刻写。

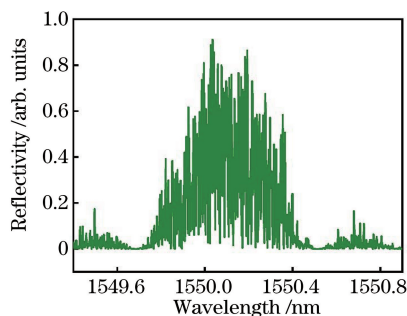


图 1 随机光纤光栅的仿真反射谱

Fig. 1 Simulated reflection spectrum of random fiber grating

2.2 随机分布光栅阵列的刻写

利用相位掩模板法实现随机光纤光栅的制备,其刻写装置如图 2(a)所示。激光器是 248 nm 波长氟化氩的准分子激光器(IPX-700, lightmachinery 公司),激光器输出的脉冲激光经全反镜后进入光束整形器件中进行整形,以消除输入激光边缘质量较差的激光,整形后的光由聚焦透镜聚焦至掩模板附近,由此产生的衍射光在光敏光纤上进行折射率调

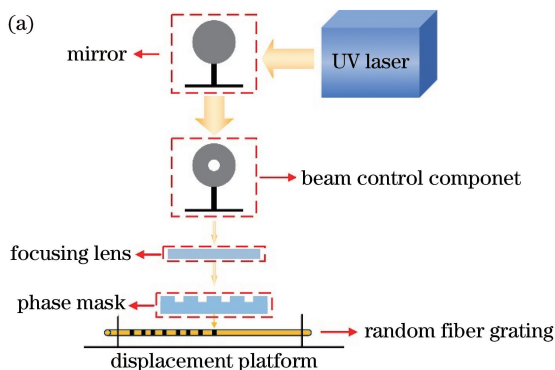


图 2 随机光纤光栅。(a)刻写装置;(b)透射谱与反射谱

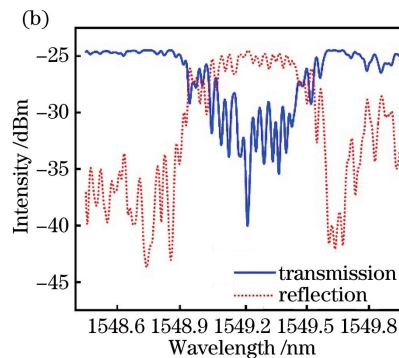
Fig. 2 Random fiber grating. (a) Fabrication setup; (b) transmission and reflection spectra

3 激光器性能与分析

传统的基于随机光纤光栅的随机激光器采用直腔的结构,且光栅刻写在掺铒光纤上,导致激光器容

制。具体刻写过程为首先对单个光栅进行刻写,调控激光器脉冲数,同时观察光栅连接的光栅解调仪,使得单个光栅的反射率约为 5%;调节位移平台使光纤轴向移动并仿真所得的随机间隔,再刻写下一个光栅,控制激光器脉冲数与第一次刻写时一致,保证每个光栅的反射率基本相同;以相同的步骤刻写其余光栅,最终得到基于随机分布光栅阵列的随机光纤光栅。

刻写完成后,采用自发辐射光源和光谱分析仪(AQ6370D, YOKOGAWA 公司)对随机光纤光栅的透射谱与反射谱进行测量,测量结果如图 2(b)所示。在透射谱中可以看出,光栅的平均反射率约为 85%,谱中存在一个较为锐利的强透射峰,其形成机理是随机光栅中形成了多个法布里-珀罗(F-P)腔,若干个 F-P 腔干涉谱的交叠会产生非常锐利的透射峰,这为产生窄线宽随机激光提供了可能。与仿真结果对比,实验中所得透、反射谱的干涉峰相对较少,因为光谱仪的最小分辨率为 0.02 nm,无法分辨更精细的干涉峰。现有的随机光纤激光器中窄线宽输出主要依靠随机反馈对线宽的压缩作用,因此随机反馈的强度决定了激光器起振阈值与斜率效率。基于单点刻写折射率畸变点的随机光纤光栅的瑞利散射反馈强度较弱,导致激光起振阈值相对较低。所提方案利用了多个随机 F-P 腔干涉叠加产生锐利反射峰的滤波效应,刻写的单个光栅的反射率更高,可以通过干涉叠加形成强度较高的锐利反射峰,进而降低了激光器的起振阈值,提高了斜率效率。



易受温度影响,激光输出较不稳定。而所提激光器采用环腔结构,且随机光栅刻写在单模光纤(SMF)上,缓解了腔内的温度效应,激光器结构如图 3(a)所示。激光器的泵浦源为 980 nm 半导体激光器

(LD), 激光经 1550 nm/980 nm 波分复用器 (WDM) 传输到一段长度为 1.35 m 且掺杂浓度为 80 dB/m 的掺铒光纤 (EDF; EDF80, OFS OPTICS 公司) 中产生受激辐射; 光再经环形器进入随机分布

光栅阵列中, 再通过随机反馈回到环腔中形成振荡, 最终由 90/10 耦合器的 10% 端口输出随机激光。结合器件尾纤长度, 整体腔长约为 4.44 m。由光谱分析仪采集随机激光输出, 并对其光谱特征进行分析。

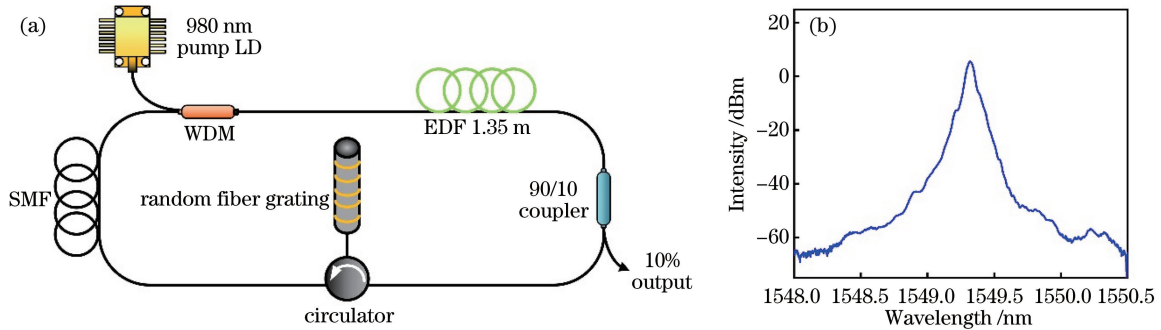


图 3 所提随机光纤激光器。(a) 结构图; (b) 激光输出光谱图

Fig. 3 Proposed random fiber laser. (a) Diagram of structure; (b) optical spectrum of laser output

当激光器工作时, 随机光纤光栅内形成多个 F-P 干涉, 干涉谱进行交叠产生锐利的反射峰, 为腔内的激光提供随机反馈。由于随机光栅的透射谱中形成了强度差较大的锐利的强透射峰, 为激光器稳定的单波长输出提供了条件, 不需要额外的滤波器来稳定激光输出。当功率大于阈值 24.5 mW 时, 腔内的增益大于损耗, 随机激光起振, 输出激光的光谱如图 3(b) 所示。激光输出功率与泵浦功率的关系

如图 4(a) 所示, 当泵浦功率超过阈值后, 输出功率呈线性增长趋势, 斜率效率约为 10.05%, 插图展示的是在起振阈值附近更细节的输出功率变化情况。对比一般的基于随机光纤光栅的激光器^[3], 所提激光器起振阈值偏高且斜率效率偏低的原因可能是环腔中 90/10 耦合器与环形器带来的插损。与现有的窄线宽随机光纤激光器相比, 所提激光器起振阈值得到降低, 斜率效率得到提升。

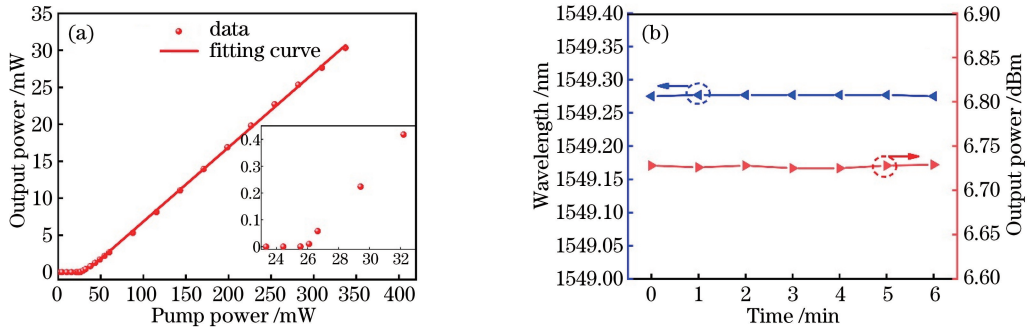


图 4 激光器输出性能。(a) 输出功率随泵浦功率的变化情况; (b) 激光器功率与中心波长的波动情况

Fig. 4 Output performance of laser. (a) Output power versus pump power; (b) fluctuation of central wavelength and output power

在之前报道过的基于随机光纤光栅的激光器中, 无滤波器结构的激光器通常会产生多模激光且频繁产生跳模^[20]。因此实验观测 6 min 内激光器中心波长的漂移及输出功率的变化, 实验结果如图 4(b) 所示。可以看出, 在波长分辨率为 0.02 nm 的光谱仪下, 6 min 内激光器的中心波长基本保持不变, 输出功率的变化小于 0.02 dB, 表明在没有滤波器的条件下激光器的输出基本为单模。该激光器良好的稳定性是因为随机光栅中存在 F-P 干涉叠加, 且干涉峰中存在超过 6 dB 强度差的锐利透射

峰, 腔内模式竞争受到抑制。

采用延迟自外差 (DSH) 法对激光器输出线宽进行测量, 装置结构如图 5(a) 所示。随机激光进入 DSH 法系统后首先被 50/50 耦合器分为两路, 一路进入长度为 100 km 的延时标准单模光纤, 一路进入声光调制器 (AOM; T-M200-0.1C2J-3-F2S, Gooch & Housego 公司) 中被移频 200 MHz。两路信号进入耦合器后由光探测器 (PD; Mode # 1414, Newport 公司) 接收拍频信号, 最后由频谱分析仪 (ESA; E4447A, Agilent 公司) 对拍频信号进行

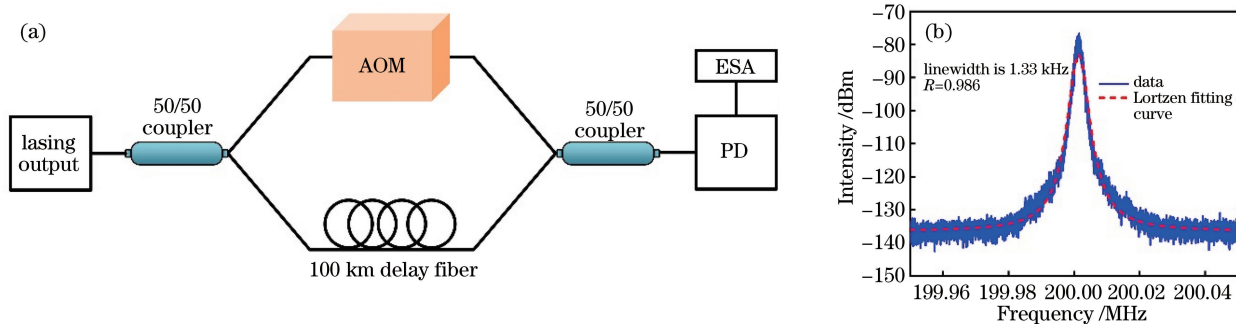


图 5 激光器线宽测试。(a)DSH 法原理图;(b)拍频信号频谱图

Fig. 5 Laser linewidth test. (a) Diagram of DSH method; (b) frequency spectrum of heterodyne beating signals

分析,得到如图 5(b)所示的频谱。由拍频信号可看出,洛伦兹线型拟合度较高(R 达到 0.986),测得激光器线宽约为 1.33 kHz。

将窄线宽随机激光器的腔长、起振阈值、斜率效率及线宽等参数列在表 1 中,对比可见,所提激光器在保证窄线宽激光输出的前提下,以短腔结构获得

了相对较低的起振阈值与较高的斜率效率,综合各项性能来看,是窄线宽随机光纤激光器中较优的选择。本文对随机光纤光栅阵列反馈实现窄线宽激光输出方案进行了初步的讨论,并未对腔内和随机光纤光栅阵列的参数进行严格的调控,因此相关参数仍有提升的空间。

表 1 不同窄线宽随机光纤激光器的输出性能

Table 1 Output properties of different narrow-linewidth random fiber lasers

Scheme	Pump threshold	Slop efficiency	Linewidth	Cavity length
EDF+RS ^[14]	100 mW	2%	<2 kHz	>5.7 km
BG+RS ^[15]	200 mW		1.5 kHz	>4.5 km
BG+ARSEP ^[16]	3.9 mW		<800 Hz	25 km
EDF+ARSEP ^[21]	100 mA (EDFA current)	0.9%	~2.1 kHz	<10 m
EDF+AGF ^[23]	75 mA	56%	1.25 kHz	>130 m
EDF+ARSEP ^[22]	92.8 mW	4.5%	~1 kHz	<10 m
This work	24.5 mW	10.05%	1.33 kHz	~4.44 m

4 结 论

基于随机分布光栅阵列的随机光纤光栅,实现窄线宽随机光纤激光输出。实验结果表明,该激光器的起振阈值为 24.5 mW,斜率效率为 10.05%,输出线宽为 1.33 kHz,对比现有的窄线宽随机光纤激光器,所提激光器具有起振阈值更低、斜率效率更高、激光器腔长相对较短、结构更简单的优点。因此,该激光器有望应用于高功率窄线宽种子源及压力与超声传感中。但本方案未对腔内各项参数进行严格控制,导致起振阈值与斜率效率未达到最优,下一步工作是对腔的结构及腔长进行优化,在保证激光输出稳定性的前提下优化腔长与腔内损耗。另外也需要进一步研究光栅刻写参数对随机光纤光栅的反射谱的影响,通过优化后得到滤波效果更好的光栅。

参 考 文 献

- [1] Polson R C, Vardeny Z V. Random lasing in human tissues[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(7): 1289-1291.
- [2] Redding B, Choma M A, Cao H. Speckle-free laser imaging using random laser illumination[J]. Nature Photonics, 2012, 6(6): 355-359.
- [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] Sugavanam S, Tarasov N, Shu X W, et al. Narrow-band generation in random distributed feedback fiber laser[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 16466.
- [5] Gagné M, Kashyap R. Demonstration of a 3 mW threshold Er-doped random fiber laser based on a unique fiber Bragg grating [J]. Optics Express, 2009, 17(21): 19067-19074.
- [6] Lizárraga N, Puente N P, Chaikina E I, et al. Single-mode Er-doped fiber random laser with distributed Bragg grating feedback [J]. Optics Express, 2009, 17(2): 395-404.
- [7] Saxena B, Bao X Y, Chen L. Suppression of thermal frequency noise in erbium-doped fiber random lasers

[1] Polson R C, Vardeny Z V. Random lasing in human

- [J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 1038.
- [8] Xu Y P, Lu P, Mihailov S, et al. Real-time physical random bit generation at Gbps based on random fiber lasers [J]. Optics Letters, 2017, 42 (23): 4796-4799.
- [9] Wang Z N, Rao Y J, Wu H, et al. Long-distance fiber-optic point-sensing systems based on random fiber lasers [J]. Optics Express, 2012, 20 (16): 17695-17770.
- [10] Leandro D, Perez-Herrera R, Bravo M, et al. Time and wavelength division multiplexing scheme for ultra-long sensing based on a cavity-modulated random DFB fiber laser [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9634: 963415.
- [11] Wang Z N, Wu H, Fan M Q, et al. High power random fiber laser with short cavity length: theoretical and experimental investigations [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 10-15.
- [12] 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.
- [13] Rao Y J. Research advances of random fiber lasers and its applications [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11): 1148002.
饶云江. 光纤随机激光器及其应用研究进展 [J]. 光子学报, 2019, 48(11): 1148002.
- [14] Zhu T, Bao X Y, Chen L. A single longitudinal-mode tunable fiber ring laser based on stimulated Rayleigh scattering in a nonuniform optical fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29 (12): 1802-1807.
- [15] Zhang L, Wang Y, Xu Y P, et al. Linearly polarized multi-wavelength fiber laser comb via Brillouin random lasing oscillation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(11): 1005-1008.
- [16] Zhang L, Xu Y P, Lu P, et al. Multi-wavelength Brillouin random fiber laser via distributed feedback from a random fiber grating [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(11): 2122-2128.
- [17] Xu Y P, Lu P, Gao S, et al. Optical fiber random grating-based multiparameter sensor [J]. Optics Letters, 2015, 40(23): 5514-5517.
- [18] Xu Y P, Zhang L, Gao S, et al. Highly sensitive fiber random-grating-based random laser sensor for ultrasound detection [J]. Optics Letters, 2017, 42 (7): 1353-1356.
- [19] Deng J C, Han M M, Xu Z W, et al. Stable and low-threshold random fiber laser via Anderson localization [J]. Optics Express, 2019, 27(9): 12987-12997.
- [20] Wang L L, Dong X Y, Shum P P, et al. Random laser with multiphase-shifted Bragg grating in Er/Yb-codoped fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(1): 95-99.
- [21] Li Y, Lu P, Baset F, et al. Narrow linewidth low frequency noise Er-doped fiber ring laser based on femtosecond laser induced random feedback [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(10): 101105.
- [22] Zhang L, Lu P, Zhou Z C, et al. High-efficiency random fiber laser based on strong random fiber grating for MHz ultrasonic sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(11): 5885-5892.
- [23] Xu R Q, Guo H Y, Li W, et al. Ultra-narrow linewidth random fiber laser based on all grating fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (12): 1201005.
许儒泉, 郭会勇, 黎威, 等. 基于全光栅光纤的超窄线宽随机光纤激光器 [J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1201005.
- [24] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.