

基于全光栅光纤的超窄线宽随机光纤激光器

许儒泉¹ 郭会勇¹ 黎 威² 梁 磊¹

¹武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

²武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070

摘要 设计并验证了一种采用全光栅光纤(AGF)作为随机反馈介质的窄线宽随机光纤激光器(RFL)。基于相位掩模法在利用拉丝塔在线制作的单模光纤纤芯上连续刻写长度为 0.3 mm 的布拉格光栅(FBG)约 4.3×10^5 支, 制作了长度为 130 m 的 AGF。利用光学环形器将 AGF 接入由掺铒光纤放大器、光纤隔离器和窄带光滤波器组成的环形激光腔中, 构成环形 RFL。结果表明, 通过窄带光滤波器选模, 基于 AGF 的 RFL 输出连续单模激光的最大功率为 1.26 mW, 阈值电流为 75 mA, 斜率效率为 56%。抽运电流恒定为 100 mA 时, 基于 AGF 的 RFL 线宽为 1.25 kHz, 光信噪比为 75 dB。当频率为 1 kHz 以上时, 激光器输出的相对强度噪声达到 -90 dB。相较于传统基于分立 FBG 的 RFL 反馈腔, 基于 AGF 的 RFL 反馈腔具有更多的随机反馈点和更均匀的随机性, 有利于 RFL 获得更窄的线宽。

关键词 激光器; 随机光纤激光器; 窄线宽; 光纤布拉格光栅; 全光栅光纤

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1201005

Ultra-Narrow Linewidth Random Fiber Laser Based on All Grating Fiber

Xu Ruquan¹ Guo Huiyong¹ Li Wei² Liang Lei¹

¹National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

²School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract A narrow linewidth random fiber laser (RFL) using all grating fiber (AGF) as the random feedback media is designed and verified. A 130 m AGF is fabricated on the single mode optical fiber core which is made online by the drawing tower based on the phase mask method. Total 4.3×10^5 fiber Bragg gratings (FBG) with 0.3 mm grating length are made on the 130 m AGF. The AGF is incorporated into a ring laser cavity consisting of an erbium-doped fiber amplifier, a fiber isolator and a narrow band optical filter via an optical circulator, and then a ring RFL is established. Results show that the RFL based on AGF can output continuous single mode laser with the maximum power of 1.26 mW when the RFL mode is selected by the narrowband optical filter. The threshold current is 75 mA and the slope efficiency is 56%. The RFL based on AGF with the narrow linewidth of 1.25 kHz and the optical signal-noise-rate of 75 dB is achieved with a 100 mA pump current. The relative intensity noise is -90 dB when the frequency is beyond 1 kHz. Compared with the traditional RFL feedback cavity which is based on discrete FBG, the RFL feedback cavity based on AGF can provide more random feedback points and more uniform randomness, which contributes to obtaining narrow linewidth for RFL.

Key words lasers; random fiber lasers; narrow linewidth; fiber Bragg grating; all grating fiber

OCIS codes 140.3460; 140.3490; 060.3735; 230.2285

1 引 言

近年来,因一维结构的光纤具有低阈值和高抽运效率的优点,随机光纤激光器(RFL)得到了广泛研

收稿日期: 2016-08-15; 收到修改稿日期: 2016-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61290311)、中国工程院重点咨询研究项目(2016-XZ-13)、中央高校基本科研业务费专项资金(2015III056)

作者简介: 许儒泉(1977—),男,博士,助理研究员,主要从事分布式光纤传感与光纤激光器等方面的研究。

E-mail: xuruquan@whut.edu.cn

究^[1-2]。不同于传统基于腔镜反馈的光纤激光器, RFL 基于光散射在光纤中的局域化效应^[3]。RFL 仅包括抽运源与增益介质两部分, 结构简单, 方向性好, 输出连续稳定, 具有分布式放大作用, 可实现窄线宽输出, 在相干通信、光纤传感与非线性光学等领域具有广阔的应用前景^[4-6]。de Matos 等^[7]在空心光子晶体光纤中填充包含二氧化钛颗粒的罗丹明 6G 溶液, 采用侧面抽运的方法获得了一维随机激光输出。Hu 等^[8]在空心光纤中填充包含纳米颗粒的有机溶液, 获得了相干随机激光输出。Turitsyn 等^[3]利用光纤中的分布式瑞利散射效应作为反馈机制, 利用拉曼效应作为增益机制, 实现了 RFL。

现有的随机光纤激光器多数为基于单模光纤非线性增益(自激拉曼/布里渊散射放大效应)的瑞利散射分布式反馈激光器^[9-13]。然而, 由于通信波段光纤材料的瑞利背向散射系数非常小, 随机激光器需要数十千米的单模光纤来提供有效反馈, 并且抽运阈值高达瓦数量级。为缩短反馈光纤的长度、降低激光器阈值, Shapira 等^[14]采用随机间隔的全同布拉格光栅(FBG)阵列在实验中验证了光局域化现象, 并展示了其在随机激光器中的可能用途。Lizárraga 等^[15]于 2009 年实现了基于 976 nm 激光抽运含 31 支 FBG 的 150 cm 铒镱共掺的 RFL。之后, Gagné 等^[16]采用单个 20~30 cm 长的 FBG 代替随机光栅阵列的紧凑型 RFL, 获得线宽为 0.5 pm 的激光输出。FBG 引入了有效的光局域化效应及掺铒光纤的高增益, 使得 RFL 的增益阈值达到了 3~10 mW。袁俊伟等^[17]在单模光纤上制作了 20 支反射率为 5% 的 FBG 阵列, 利用作为反馈腔的 FBG 阵列构成 RFL, 也实现了 3 mW 的抽运阈值。Wang 等^[18]通过在铒镱共掺光纤上制作 25 mm 的多相移光栅, 使用波长为 980 nm 的激光进行抽运, 构成了超短反馈腔随机激光器。然而, 上述激光器在增益光纤上制作的光栅数量有限, 在打破原有光纤均匀随机性的同时, 引入的随机性不均匀^[19], 因此对输出激光的线宽压缩有限。

为了获得窄线宽随机激光, 本文提出了一种基于全光栅光纤(AGF)反馈的随机激光器。在利用光纤拉丝塔在线制作的单模纤芯上在线刻写全同波长的大容量连续光栅阵列, 然后涂敷制作成全光栅光纤。将全光栅光纤作为随机反馈介质, 使用窄带滤波器进行选模, 输出单模窄线宽随机激光。通过在单模光纤上制备连续大量的光栅, 提高了随机激光器反馈腔的随机性与均匀性。增益光纤无反馈光栅, 完全独立于随机反馈腔, 因此增强了激光器的稳定性。基于拉丝塔在线制作的全光栅光纤实现了随机激光器反馈介质的高效批量制作, 降低了激光器成本。

2 全光栅光纤的制作

在前期拉丝塔光栅制备的基础上, 采用 248 nm 准分子紫外(UV)激光器(CL5300 型, OptoSystems 公司)并利用相位掩模法在拉丝塔在线拉丝过程中制作全光栅光纤^[20], 实验装置如图 1 所示。实验过程主要包括预制棒加热、光纤光栅制备、光纤二次涂敷和光纤精密卷绕 4 部分。实验中通过工业计算机控制拉丝塔的在线拉丝速度为 5.4 m/min。在拉制光纤进行涂敷之前, 通过相位掩模法在线制作 FBG 阵列。光纤光栅

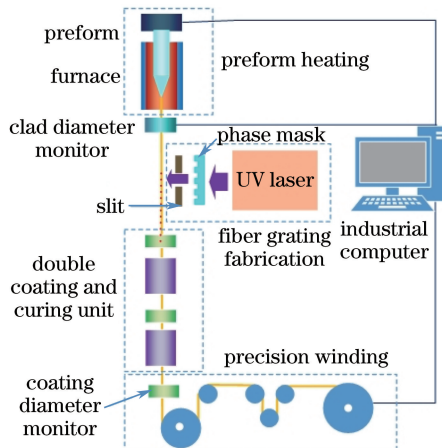


图 1 制作全光栅光纤的实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup diagram of AGF fabrication

制作时由准分子紫外激光器以 300 Hz 的脉冲频率输出波长为 248 nm、脉冲宽度为 10 ns、脉冲能量为 40 mJ 的紫外激光,通过 1554 nm 的相位掩模板后由 0.3 mm 带隙产生谱宽为 0.3 mm 激光光束,连续刻写长度为 0.3 mm 的光栅。考虑到拉丝速度为 5.4 m/min,激光器脉冲频率为 300 Hz,因此在拉丝塔拉制的纤芯上制作的光栅在空间上是连续的。

对 AGF 进行测量,反射谱与透射谱如图 2 所示。实验中扫描激光器(TSL-510 型,Santec 公司)以 1 pm 的步进从 1550 nm 扫描到 1560 nm。由图 2(a)可见,FBG 中心波长为 1555.4 nm,半峰全宽(FWHM)为 2 nm。图 2(b)的透射谱相对于反射谱变窄,表明产生了光的局域化效应。由于在拉丝塔在线制作光栅的过程中,每个 FBG 由单个激光脉冲刻写,而且在线制作的光纤无法载氢,因此,为了提高 FBG 刻写效率,采用掺锗光纤。由于掺锗光纤纤芯折射率高于普通单模光纤,制得的 FBG 中心波长向长波长平移。光栅内多个谐振腔产生的干涉效应导致光谱出现很多干涉峰。FBG 反射光谱不符合标准的辛格函数形状,Lizárraga 等^[15]认为 FBG 反射谱形状变化是由光局域化导致,而 Gagné 等^[16]推测 FBG 反射谱形状变化可能与光栅的制作过程有关。本课题组认为 FBG 反射谱形状变化是在拉丝塔在线制作光栅的过程中,拉丝塔振动与激光器振动不同步,使得光路受到了影响,光束在纤芯曝光时产生了部分折射,导致刻写的光栅光谱产生变化。拉丝塔制作的 AGF 长度为 130 m,考虑到单个 FBG 长度为 0.3 mm,所以 FBG 总共约为 4.3×10^5 支,比现有文献报道的光栅数量提高了 3~4 个数量级^[15-18]。

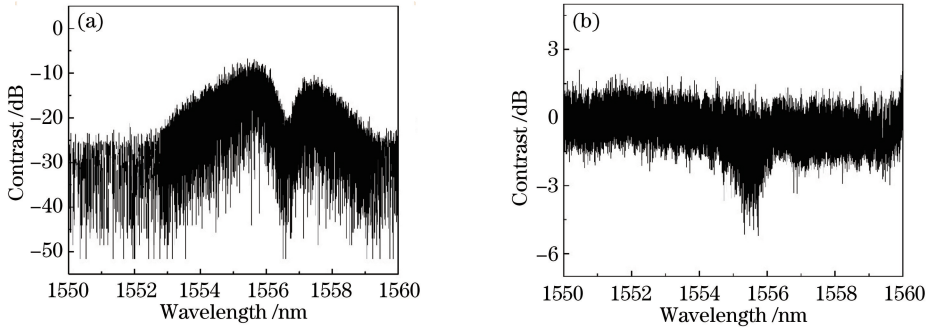


图 2 全光栅光纤的(a)反射谱和(b)透射谱

Fig. 2 (a) Reflection spectrum and (b) transmission spectrum of all grating fiber

实验中拉丝塔的拉丝速度受到环境温度以及拉丝塔的振动等因素的影响,因此光栅在空间上的随机性较大。拉丝塔的振动与准分子紫外激光器振动不完全一致,导致曝光到纤芯的激光光谱不一致,该现象可以看作是在光栅在线制作过程中引入了持续的随机相位波动^[21]。

随机激光的获取必须满足介质长度(即全光栅光纤的长度)大于局域化长度^[22]。光栅的平均透射率可以表示为 $T(L) \approx \exp(-L/2\zeta)$,其中 L 为全光栅光纤的长度($L=130$ m), ζ 为局域化长度。由图 2(a)可得,光栅的平均透射率约为 0.2, $\zeta=40.3$ m,局域化长度远小于全光栅光纤的长度。因此,制作的全光栅光纤满足随机激光器的光局域化条件。

3 激光器性能测试与分析

图 3 给出了基于全光栅光纤的随机激光器原理框图。长度为 130 m 的 AGF 通过光纤环形器接入环形配置的激光器中。环形腔中的掺铒光纤放大器(EDFA)提供宽带增益谱,光纤隔离器控制环形腔内光的单向传输。带通光滤波器用于激光模式选择,可实现单模随机激光输出。全光栅光纤尾端通过光纤隔离器输出随机激光,阻止外界反射光进入反馈腔,以确保随机反馈完全由全光栅光纤上的光栅阵列提供。在激光器工作中,反射光与透射光在 AGF 中不同随机光栅之间以及 AGF 中任意两个不同折射率面之间会发生法布里-珀罗干涉(FPI)。干涉峰波长间隔 $\Delta\lambda \approx \lambda^2/2nl$,其中 λ 为 RFL 的工作波长, n 为 AGF 纤芯的有效折射率, l 为腔长。腔长为 530 nm 时,FPI 峰值波长间隔为 1500 nm;腔长为 130 m 时,FPI 峰值波长间隔为 6.3 pm。因此,AGF 是由众多 FPI 叠加而成的窄带光滤波器。由于 AGF 中具有大量的随机光栅,激光进入 AGF 后经历相干背向散射。AGF 的反射率远高于光纤瑞利背向散射,如前文所述 AGF 长度大于光局域化

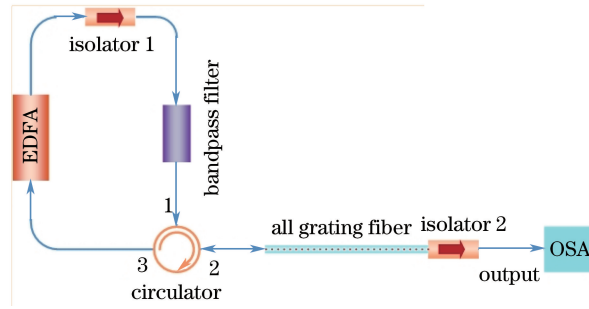


图 3 基于 AGF 的随机光纤激光器原理图

Fig. 3 Diagram of random fiber laser based on AGF

长度,因此 AGF 可为环形激光器提供有效反馈。

实验中采用光谱分析仪(AQ6370C 型,OSA 公司)直接测量激光器的输出光谱。移除带通光学滤波器后,激光器的输出模式完全取决于全光栅光纤上所有滤波器光谱叠加的包络。由于跳模的原因,多模激光输出占据主要地位,实验中几乎未出现单模激光。当窄带通光滤波器接入激光器的环形腔时,激光输出模式取决于 EDFA、AGF 和带通滤波器。由于窄带光滤波器只能容纳 AGF 上有限的低精细度滤波器,对激光器起到了模式选择作用。图 4(a)为激光器的模式锁定在 1555 nm 附近时输出功率与 EDFA 抽运电流的关系曲线。可见,激光器输出功率在抽运电流大于 200 mA 后呈现明显的非线性,这是由于 AGF 中含有大量的随机反馈点,因此输出激光中包含具有不同阈值功率与斜率效率的多种随机空间模式。同时,较强的模式间相互作用导致单个模式强度相对于抽运功率具有非线性^[18]。激光器的阈值电流为 75 mA,在抽运电流为 300 mA 时,激光器的最大输出功率为 1.26 mW,斜率效率为 56%,与现有研究相比,激光器阈值电流偏高。导致上述现象的原因为:采用拉丝塔在线制作光栅是在光纤不载氢的条件下进行的,此时光栅的反射率极低;同时,由于带通滤波器产生 4 dB 的插入损耗,降低了激光器的输出效率,并且提高了阈值电流。由图 4(b)可知,激光器输出激光仍具有高达 75 dB 的光信噪比。

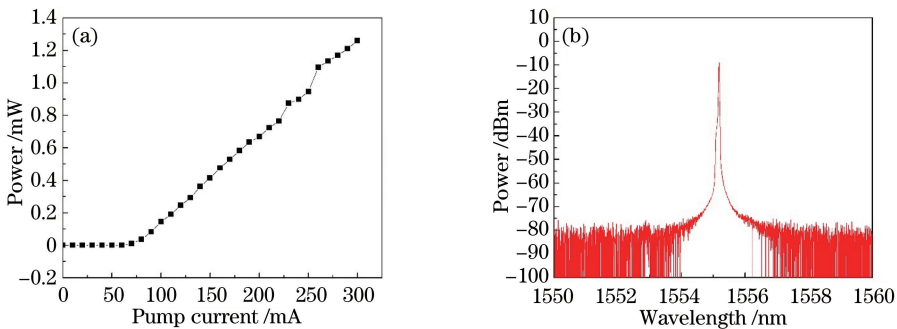


图 4 (a)激光器输出功率与 EDFA 抽运电流的关系曲线;(b)激光器输出光谱

Fig. 4 (a) Relationship between output power of laser and EDFA pump current; (b) output spectrum of laser

实验中,采用延迟自外差法测量 RFL 的线宽,该测量方法的原理图如图 5(a)所示。采用 100 km 单模光纤作为延时臂,假设激光器的谱型为洛伦兹型,满足频率小于 1 kHz 的线宽测量^[23]。RFL 的输出激光经过分光比为 10:90 的耦合器后,其中 10% 的输出激光通过声光移频器(AOM, AMF-80 型, Brimrose 公司)进行 80 MHz 的上移频,这里使用 80 MHz 的射频(RF)信号源驱动 AOM;90% 的输出激光通过 100 km 延时光纤后,与 AOM 移频输出信号在 50:50 的耦合器中发生干涉。干涉信号经过带宽为 150 MHz 的光电探测器(PDB150C 型, Thorlabs 公司)的光电转换后,输入到电子频谱分析仪(ESA, R&S FSV 型)。ESA 测得的拍频信号如图 5(b)所示,输出的单模激光具有 75 dB 的边模抑制比。实验测得距离信号最大 20 dB 处的激光器线宽为 25 kHz,对应 3 dB 的洛伦兹线宽为 1.25 kHz。相对于采用 31 支 FBG 获得的 20 pm 激光器线宽和采用 30 cm 光栅获得的 0.5 pm 激光器线宽,将包含 4.3×10^5 支 FBG 的 AGF 作为随机反馈腔时,激光器线宽得到较好的压缩^[15-16],这主要得益于 AGF 具有更高的随机性。通过拉丝塔制作的 AGF 上具有高密度、大容量 FBG,为 RFL 提供了更多的随机散射点。因此,RFL 反馈腔中激光强度波动得到了抑制,光局

域化更加接近理想情况^[16]。接近理想情况的光局域化使得能量进入主要的光模式,提高了输出激光的相干性^[24],从而迫使激光器工作于单频模式^[25]。利用拉丝塔制作 AGF 时,由于受到振动、温度等外界环境的影响,FBG 的随机性得到增加。在后续工作中,将继续研究在制作过程中对振动与紫外曝光频率的控制是否会进一步增加光栅的随机性,并希望通过优化 AGF 长度、反射率与光局域化长度来获得更窄线宽的 RFL^[16]。

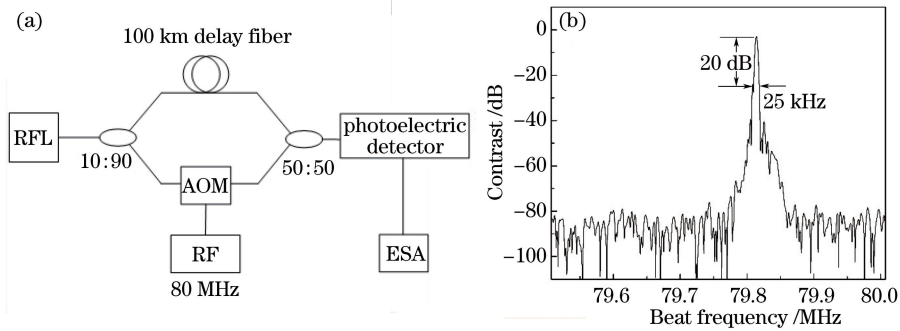


图 5 (a)延迟自外差测量原理图;(b) ESA 测得的拍频信号(抽运电流 100 mA)
Fig. 5 (a) Schematic of delayed self-heterodyne measurement; (b) beat frequency signal obtained by ESA (pump current is 100 mA)

为测试激光器的输出功率稳定性与相对强度噪声(RIN),将抽运电流稳定在 100 mA,并将输出激光耦合到带宽为 150 MHz 的光电转换器(PDB150C 型,Thorlabs 公司)中。图 6(a)、(b)分别为激光器输出功率在 0.06 s 内的高速采样结果和在 120 min 内的慢速采样结果。从图中可以看出,激光器输出功率在时域上基本稳定,功率波动小于 2%。激光器的 RIN 功率谱如图 6(c)所示,频率在 1 kHz 以上时,RIN 为 -90 dB;频率在 1 kHz 以内时,RIN 具有明显的噪声。考虑到采用的 AGF 反馈腔较长,易受到外界环境的干扰,实验中将 AGF 放在隔音箱中并作减震处理。

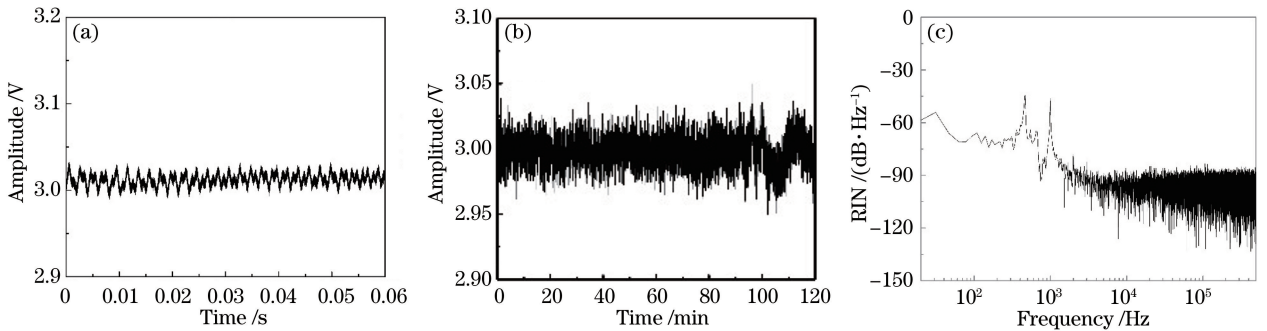


图 6 (a) 0.06 s 内的 RIN 时域图;(b) 120 min 内的 RIN 时域图;(c) RIN 频谱图

Fig. 6 (a) RIN time-domain figure in 0.06 s; (b) RIN time-domain figure in 120 min; (c) RIN frequency spectrum

4 结 论

与将分立 FBG 阵列作为反馈介质相比,将采用光纤拉丝塔在线制作的 AGF 作为窄带 RFL 的反馈介质可增加反馈点数和反馈随机性,进一步压缩了激光器线宽。实验结果表明,当抽运电流为 100 mA 时,随机激光器输出线宽为 1.25 kHz 的单模激光具有 75 dB 的光信噪比。激光器的 RIN 在频率 1 kHz 以上时可达 -90 dB。激光器具有窄线宽和高相干性,在相干通信和光纤传感领域具有潜在的应用价值。采用拉丝塔批量制作 AGF,提高了激光器的制作效率,降低了激光器的制作成本。基于 AGF 的 RFL 因具有较长的反馈腔,易受到外界环境的干扰,如何减少这种干扰将是下一步研究的重点工作。

参 考 文 献

1 Turitsyn S K, Babin S A, Churkin D V, *et al.* Random distributed feedback fiber lasers[J]. Physics Reports, 2014, 542 (2): 133-193.

- 2 Zhu Junmei, Zhang Weili, Rao Yunjiang, *et al.* Output characteristics of low-threshold random distributed feedback fiber laser[J]. Chinese J Laser, 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.
- 3 Turitsyn S K, Babin S A, El-Taher A E, *et al.* Random distributed feedback fiber laser[J]. Nature Photonics, 2010, 4(4): 231-235.
- 4 Jiang Yun, Jia Xinhong, Wang Zinan, *et al.* 100 km Brillouin optical time domain analyzer based on random distributed feedback fiber laser pumping[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(1): 45-49.
姜 芸, 贾新鸿, 王子南, 等. 基于随机分布式反馈光纤激光器的 100 km 布里渊光时域分析系统[J]. 光电子 • 激光, 2013, 24(1): 45-49.
- 5 Pinto A M R, Lopez-Amo M, Kobelke J, *et al.* Temperature fiber laser sensor based on a hybrid cavity and a random mirror[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1168-1172.
- 6 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.
- 7 de Matos C J S, Menezes S L, Brito-Silva A M, *et al.* Random fiber laser[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(15): 153903.
- 8 Hu Z J, Zhang Q, Miao B, *et al.* Coherent random fiber laser based on nanoparticles scattering in the extremely weakly scattering regime[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(25): 253901.
- 9 Pang M, Xie S R, Bao X Y, *et al.* Rayleigh scattering-assisted narrow linewidth Brillouin lasing in cascaded fiber[J]. Optics Letters, 2012, 37(15): 3129-3131.
- 10 Sugavanam S, Tarasov N, Shu X W, *et al.* Narrow-band generation in random distributed feedback fiber laser[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 16466-16472.
- 11 Ahmad H, Zulkifli M Z, Jemangin M H, *et al.* Distributed feedback multimode Brillouin-Raman random fiber laser in the S-band[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(5): 055102.
- 12 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.
- 13 Wang L L, Dong X Y, Shum P P, *et al.* Tunable erbium-doped fiber laser based on random distributed feedback[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 1501705.
- 14 Shapira O, Fischer B. Localization of light in a random-grating array in a single-mode fiber[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 22(12): 2542-2552.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 Yuan Junwei, Dong Xinyong, Wang Lulu, *et al.* Weak reflectivity FBG array based random distributed feedback Er-doped fiber laser[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(1): 20-24.
袁俊伟, 董新永, 王鹿鹿, 等. 基于弱反射 FBG 串的随机分布反馈掺铒光纤激光器[J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(1): 20-24.
- 18 Wang L L, Dong X Y, Shum P P. Random laser with multiphase-shifted Bragg grating in Er/Yb-codoped fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(1): 95-99.
- 19 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): 176-181.
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): 176-181.
- 20 Guo H Y, Tang J G, Li X F, *et al.* On-line writing identical and weak fiber Bragg grating arrays[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 030602.
- 21 Guo H Y, Liu F, Yuan Y Q. Ultra-weak FBG and its refractive index distribution in the drawing optical fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4829-4838.
- 22 Milner V, Genack A. Photon localization laser: low-threshold lasing in a random amplifying layered medium via wave localization[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(7): 073901.
- 23 Gallion P, Debarge G. Quantum phase noise and field correlation in single frequency semiconductor laser systems[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1984, 20(4): 343-349.
- 24 Kostko I A, Kashyap R. Dynamics of ultimate spectral narrowing in a semiconductor fiber-grating laser with an intracavity saturable absorber[J]. Optics Express, 2006, 14(7): 2706-2714.
- 25 Timofeev F N, Kashyap R. High-power, ultra-stable, single-frequency operation of a long, doped-fiber external-cavity, grating-semiconductor laser[J]. Optics Express, 2003, 11(6): 515-520.