

## 激光与光电子学进展

## 可调谐多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器

庞海越<sup>1,2\*</sup>, 秦湘杰<sup>1</sup>, 郑家腾<sup>1</sup>, 陶智勇<sup>1,2</sup>, 樊亚仙<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004;<sup>2</sup>桂林电子科技大学电子信息学院, 广西 北海 536000

**摘要** 实验研究了一种半开腔的可调谐多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器。该激光器利用长单模光纤中的后向瑞利散射提供随机分布反馈, 受激布里渊散射和掺铒光纤共同提供激光增益。该结构简单的激光装置获得了稳定的 13 阶斯托克斯光和 5 阶反斯托克斯光输出。通过调节布里渊泵浦的波长, 实现了 1550.5~1565.5 nm 范围内的随机激光波长可调谐输出。该激光器具有较高的波长和功率稳定性, 第 1~10 阶斯托克斯光的波长漂移范围为 0~0.008 nm, 其相应的峰值功率的波动范围为 0~2.28 dB。研究表明, 该激光器同时具备结构简单、波长数量多、波长可调谐范围宽和稳定性高等优点, 在密集波分复用光通信系统、微波光子学、精密计量和光纤传感等领域具有广阔的应用前景。

**关键词** 激光器; 受激布里渊散射; 瑞利散射; 随机分布反馈

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231351

## Tunable Multi-Wavelength Brillouin-Erbium-Doped Random Fiber Laser

Pang Haiyue<sup>1,2\*</sup>, Qin Xiangjie<sup>1</sup>, Zheng Jiateng<sup>1</sup>, Tao Zhiyong<sup>1,2</sup>, Fan Yaxian<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>Guangxi Key Laboratory of Wireless Broadband Communication and Signal Processing, School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;<sup>2</sup>College of Electronic Information, Guilin University of Electronic Technology, Beihai 536000, Guangxi, China

**Abstract** A tunable multi-wavelength Brillouin-erbium-doped random fiber laser with a half-open cavity is proposed and experimentally demonstrated. It uses the backward Rayleigh scattering in the long single-mode fiber to provide random distributed feedback, and the stimulated Brillouin scattering and erbium-doped fiber to provide laser gain. In this simple laser device, stabilized 13-order Stokes light and 5-order anti-Stokes light can be obtained. By adjusting the wavelength of Brillouin pump, the random laser wavelength tuning in the range of 1550.5–1565.5 nm is realized. In addition, the wavelength fluctuation range of 1–10 orders' Stokes light is 0–0.008 nm, and the corresponding peak power fluctuation range is 0–2.28 dB, which prove that the laser has high wavelength and power stability. The results show that the laser has the advantages of simple structure, large numbers of spectral line orders, wide tunable wavelength range and high stability, which makes it has broad application prospects in many fields, such as dense wavelength division multiplexing optical communication systems, microwave photonics, precision metrology, fiber sensing and so on.

**Key words** lasers; stimulated Brillouin scattering; Rayleigh scattering; random distributed feedback

## 1 引言

随机光纤激光器是一种利用光纤中的多重随机散射提供光学反馈, 且其谐振腔无明确界限的新型激光器, 因具有结构简单、稳定性好、可靠性高、寿命长、激射阈值低、腔体设计灵活等突出优点, 在光纤传感<sup>[1-2]</sup>、光通信<sup>[3-4]</sup>和光成像<sup>[5-6]</sup>等领域得到了广泛的应用, 有望

成为突破常规光纤激光器的新一代光纤激光光源。其中, 多波长随机光纤激光器因其独特的光谱特性<sup>[7-12]</sup>, 已展现出特有的优势, 在密集波分复用光通信系统、微波光子学、高分辨光谱学、精密计量和光纤传感等领域表现出巨大的应用潜力。

近几年来, 基于瑞利散射的多波长随机光纤激光器的研究方案被相继报道, 这些研究方案通常分为两

收稿日期: 2023-05-22; 修回日期: 2023-05-29; 录用日期: 2023-06-19; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(12064005)、广西自然科学基金(2021GXNSFAA220086, 2021GXNSFDA075006)、广西无线宽带通信与信号处理重点实验室 2023 年主任基金项目

通信作者: \*phy@guet.edu.cn; \*\*yxfan@guet.edu.cn

大类。一类使用具有多个传输峰的光滤波器来产生多波长输出,如马赫-曾德尔干涉仪<sup>[13-14]</sup>、光纤 Sagnac 环形镜<sup>[15-16]</sup>、光纤布拉格光栅<sup>[17-18]</sup>、全光纤 Lyot 滤波器<sup>[19]</sup>等光滤波器件。2016 年, Liu 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于 Sagnac 环形镜的多波长掺铒随机分布反馈光纤激光器,在室温下实现了波长通道数在 2~8 范围内的可调激光输出。2021 年, Liu 等<sup>[13]</sup>提出了一种半开腔可调谐多波长掺铒随机分布反馈光纤激光器,将双通道马赫-曾德尔干涉仪作为半开腔中的反射镜,获得了 7 个波长的激光输出。该激光器通过调节压电换能器上的直流电压来实现多波长激光的调谐操作。另一类是基于受激布里渊散射或拉曼散射的多波长随机光纤激光器<sup>[20-28]</sup>。与基于光滤波器的随机光纤激光器相比,基于受激布里渊散射的多波长随机光纤激光器不仅具有布里渊光纤激光器带宽窄、阈值低和稳定性高等优点,还具备了随机光纤激光器的独特优势,因而受到了广泛关注和研究。2014 年, Huang 等<sup>[20]</sup>提出了一种将瑞利散射与啁啾光纤布拉格光栅相结合的多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器,在线性半开腔结构中成功地获得了 5 阶斯托克斯光的随机光纤激光输出。激光线间距约为 0.088 nm,线宽约为 0.02 nm,峰值功率差约为 4.3 dB。2018 年, Wu 等<sup>[27]</sup>提出了一种由光纤环形镜和随机分布瑞利散射组成的半开腔多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器,获得了间距约为 0.06 nm 的稳定的 6 阶布里渊斯托克斯光。2020 年, Wang 等<sup>[28]</sup>提出了一种采用高非线性光纤的半开腔多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器,获得了稳定的 11 阶斯托克斯光。该激光器的波长间距为 0.074 nm,最小光信噪比(OSNR)为 41.22 dB,此外还可以实现 1~11 阶斯托克斯光的切换。尽管基于受激布里渊散射的多波长随机光纤激光器的研究已经取得了不错的进展,然而,基于受激布里渊散射的多波长随机光纤激光器的输出特性及物理内涵的研究还有待完善,在激光器结构优化以及波长数量、波长可调谐范围和稳定性等性能方面还存在很大的提升空间。因此,开展同时具备波长数量多、波长可调谐范围宽和稳定性高等多种优势的多波长随机光纤激光器的研究具有

重要的意义和应用价值。

本文研究了一种波长可调谐的多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器。该激光器利用光纤反射镜和长单模光纤的后向瑞利散射形成线性半开腔结构,在掺铒光纤和受激布里渊散射的混合增益作用下,实现了同时具备波长数量多、可调谐范围宽和稳定性高等优势的多波长激光输出,为其在密集波分复用光通信系统、微波光子学、精密计量、光谱学和光纤传感等领域的发展和應用提供了一种有效的途径。

## 2 实验装置

可调谐多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器的实验装置示意图如图 1 所示。该激光器采用点式反射半开腔结构,主要由光纤反射镜(FRM)、波长可调谐窄线宽光源(TLS, LTL-1500, LaseGen, 美国)、90/10 的光纤耦合器(FC)、980 nm 半导体激光器(LD)、980/1550 nm 波分复用器(WDM)、一段长度约 9 m 的掺 Er<sup>3+</sup> 光纤(EDF)、一段长度约 30 km 的普通单模光纤(SMF)和两个光隔离器(ISO)组成。其中:FRM 作为点式反射镜,具有高反射率,它的中心波长位于 1550 nm,带宽约 30 nm,与 FC 的 90% 端口相连。TLS 的波长调谐范围为 1525.0~1565.5 nm,带宽小于 100 kHz,最大输出功率为 35 mW,其输出端依次连接 ISO 1 和 FC 的 10% 端口。ISO 1 的作用是为了避免激光从 FC 注入到 TLS 中影响其稳定性。最大输出功率为 325 mW 的 980 nm LD,通过 WDM 对 EDF 进行泵浦。LD 和 TLS 分别用作 EDF 的泵浦源和受激布里渊散射的泵浦源。长度为 30 km 的 SMF 中的后向瑞利散射和受激布里渊散射分别提供随机分布的光反馈和布里渊增益。FRM 和 SMF 中的后向瑞利散射形成了大量的边界不明确的激光谐振腔。ISO 2 的作用是避免不必要的激光从输出端反射回谐振腔中影响随机激光输出的稳定性。在激光器的输出端连接光谱分析仪(OA, AQ6370D, YOKOGAWA, 日本)和光功率计(HS1001, 上海斯动通信技术有限公司, 中国),分别对输出光谱和功率进行监测,其中,光谱分析仪的分辨率设置为 0.02 nm。

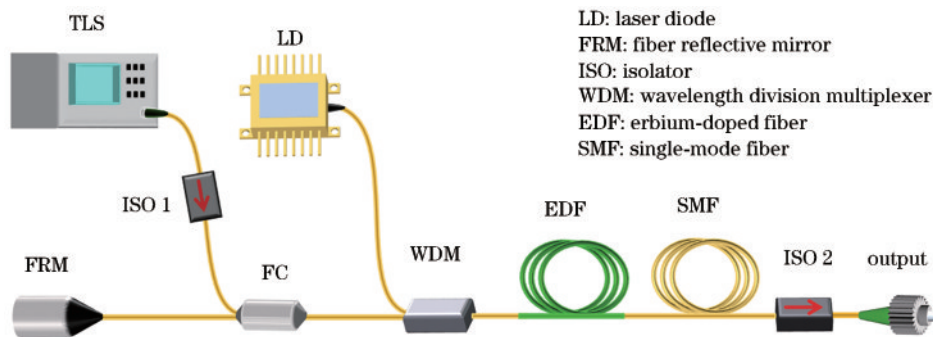


图 1 可调谐多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器的实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of the tunable multi-wavelength Brillouin-erbium-doped random fiber laser

### 3 实验结果与分析

首先,将LD的输出功率定义为 $P_{LD}$ ,TLS的输出功率和波长分别定义为 $P_{TLS}$ 和 $\lambda_{TLS}$ 。在实验中,先不向激光腔内输入 $P_{TLS}$ ,通过调节 $P_{LD}$ ,探究该随机激光器自由运行时的输出光谱特性。实验发现,该随机激光器自由运行时的输出光谱呈现出随机振荡模式,振荡幅度随 $P_{LD}$ 的增大而增大。图2(a)是当 $P_{LD}=325$  mW时,随机激光器输出的光谱图。可以看出,光谱的中心波长位于约1560 nm处,带宽约为6.3 nm,光谱中的功率分布呈随机波动,各波长波峰分离,这是典型的由多重瑞利散射作为随机分布反馈产生的随机激光光谱。接着,固定 $P_{LD}=325$  mW,将 $\lambda_{TLS}$ 设置为1559.97 nm(约等于该随机激光器自由运行时的中心波长),通过调节 $P_{TLS}$ ,探究激光输出光谱的变化情况。当 $P_{TLS}=5$  mW时,获得了稳定的多波长激光输出,如图2(b)所示。将

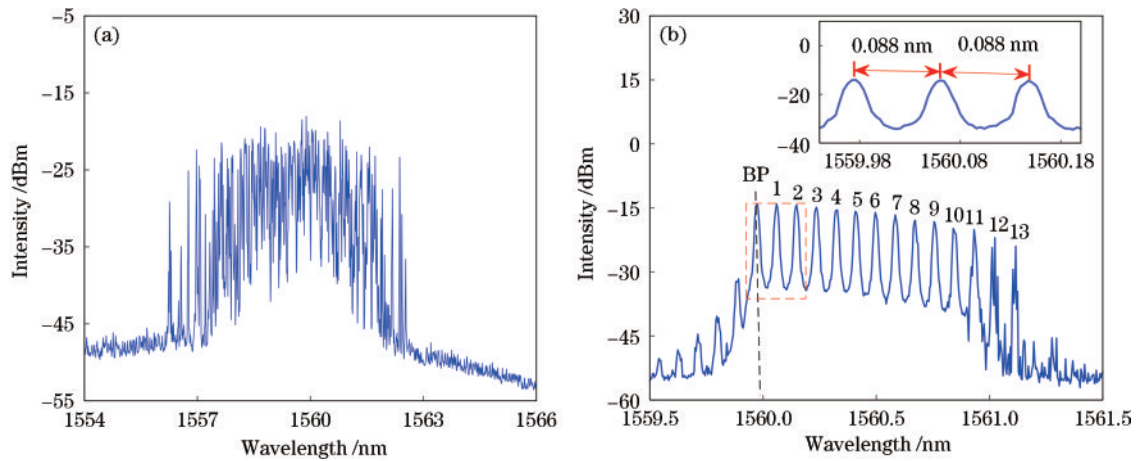


图2  $P_{TLS}$ 为0和5 mW时,布里渊-掺铒随机光纤激光器输出的光谱图。(a)  $P_{TLS}=0$ ; (b)  $P_{TLS}=5$  mW

Fig. 2 Output spectrum of Brillouin-erbium-doped random fiber laser when  $P_{TLS}$  is 0 and 5 mW, respectively. (a)  $P_{TLS}=0$ ; (b)  $P_{TLS}=5$  mW

接着,固定 $\lambda_{TLS}$ 和 $P_{TLS}$ ,通过实验探究了 $P_{LD}$ 对布里渊-掺铒随机光纤激光器输出光谱特性和功率特性的影响。图3(a)是当 $\lambda_{TLS}$ 和 $P_{TLS}$ 分别固定为1559.97 nm和5 mW时,在不同 $P_{LD}$ 下,布里渊-掺铒随机光纤激光器输出的光谱图。由图3(a)可知,当 $P_{LD}=0$ 时,由于BP光功率较弱,未达到1阶BSLs的激发阈值,因此,未看到BSLs产生。通过增加 $P_{LD}$ 可以对BP光进行功率放大,当 $P_{LD}$ 分别为100、200、300 mW时,光谱中的BSLs的数量分别为5、9、12,并且BSLs的峰值功率随 $P_{LD}$ 的增大而增大。图3(b)是当 $\lambda_{TLS}$ 和 $P_{TLS}$ 分别固定为1559.97 nm和5 mW时,随着 $P_{LD}$ 从25 mW增大到325 mW,光谱中BSLs的数量和激光输出的平均功率随 $P_{LD}$ 的变化曲线。其中:带正方形标记的蓝色实线为BSLs的数量的变化曲线;带圆形标记的红色虚线为激光输出的平均功率的变化曲线。由图3(b)可知:光谱中BSLs的数量随 $P_{LD}$ 的增大而增加,当 $P_{LD}=325$  mW时,获得了13阶BSLs,这是实验中获得的最多的BSLs;此外,激光输出的平均功率随 $P_{LD}$ 的增大而

光谱中波长等于 $\lambda_{TLS}$ 的激光线称为布里渊泵浦(BP)光,在BP光两侧观察到稳定的13阶布里渊斯托克斯光和5阶布里渊反斯托克斯光,布里渊斯托克斯光也被称为布里渊斯托克斯线(BSLs)。由于反BSLs的峰值功率与BSLs的峰值功率相差较大,因此,主要研究BSLs。图2(b)右上角的插图是红色标记部分的放大视图。可以清楚地看到,第1阶BSLs与BP光、第2阶BSLs与第1阶BSLs之间的波长间隔均约为0.088 nm,对应单布里渊频移。对该激光器产生等间距BSLs和反BSLs的机理进行分析:由于该激光器采用线性半开腔结构,后向的BSLs经过光纤反射镜反射而向前传输,当被反射的低阶BSLs的功率达到布里渊阈值条件时,通过级联受激布里渊散射,产生了更高阶的BSLs。长SMF中的瑞利散射为受激布里渊散射过程提供了内反馈,进一步促进了受激布里渊散射的进行。此外,共同传输的BP光和BSLs的四波混频产生了反BSLs。

增大,与BSLs的数量随 $P_{LD}$ 的变化趋势大致相似,当 $P_{LD}=325$  mW时,激光输出获得的最大平均功率约为15 mW。因此,增加 $P_{LD}$ 不仅增加了光谱中BSLs的数量,还增加了BSLs的峰值功率以及激光输出的平均功率。

紧接着,研究了 $P_{TLS}$ 对布里渊-掺铒随机光纤激光器输出光谱特性和功率特性的影响。固定 $P_{LD}$ 和 $\lambda_{TLS}$ ,通过调节 $P_{TLS}$ ,探究了不同 $P_{TLS}$ 对布里渊-掺铒随机光纤激光器输出光谱及平均功率的影响。实验发现,越大的 $P_{LD}$ 越有利于激发更多的BSLs,因此,将 $P_{LD}$ 固定为325 mW。图4(a)是当 $P_{LD}=325$  mW、 $\lambda_{TLS}=1559.97$  nm时,在不同 $P_{TLS}$ 的情况下,布里渊-掺铒随机光纤激光器输出的光谱。由图4(a)可知,当 $P_{TLS}$ 分别为5、15、25、35 mW时,光谱中分别呈现13阶、7阶、6阶和5阶BSLs。此外,还探究了当 $P_{TLS}$ 从3 mW增大到35 mW时,BSLs的数量和激光输出的平均功率随 $P_{TLS}$ 的具体变化情况。图4(b)是当 $P_{LD}=325$  mW、 $\lambda_{TLS}=1559.97$  nm时,光谱中BSLs的数量和激光输出的平均



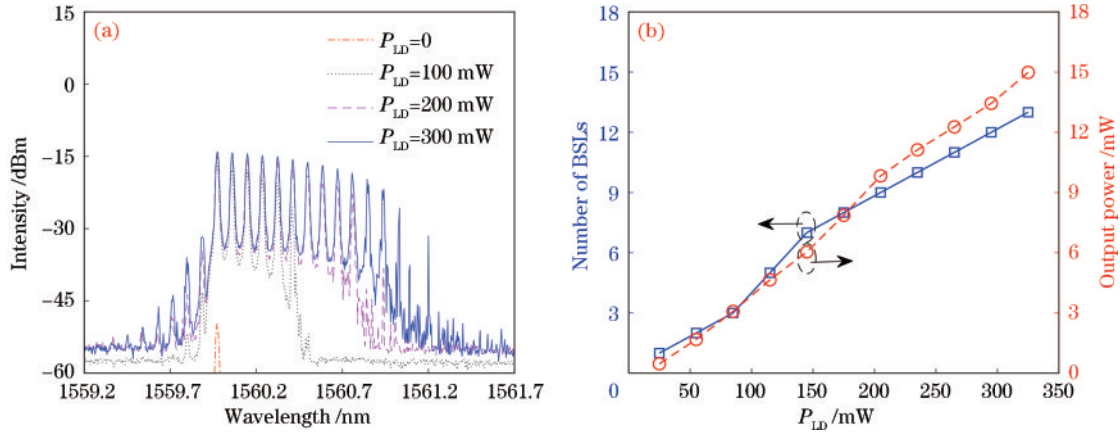


图3 在不同的  $P_{LD}$  条件下,布里渊-掺铒随机光纤激光器输出的光谱以及BSLs的数量和激光输出的平均功率随  $P_{LD}$  的变化曲线。

(a)输出光谱;(b)BSLs的数量和激光输出的平均功率随  $P_{LD}$  的变化情况

Fig. 3 Output spectrum of Brillouin-erbium-doped random fiber laser under different  $P_{LD}$ , and the variation curves of the number of BSLs and the average power of the laser with the change of  $P_{LD}$ . (a) Output spectrum; (b) variation curves of the number of BSLs and the average power of the laser with the change of  $P_{LD}$ .

功率随  $P_{TLS}$  的变化曲线。其中:带正方形标记的蓝色实线为BSLs的数量变化曲线;带圆形标记的虚线为激光输出的平均功率的变化曲线。从图4(b)中可以看出:当  $P_{TLS}$  从3 mW增大到35 mW时,光谱中BSLs的数量随  $P_{TLS}$  的增大先增加后非单调减少;当  $P_{TLS} = 5$  mW时,光谱中有13阶BSLs;当  $P_{TLS} > 5$  mW时,光谱中BSLs的数量随  $P_{TLS}$  的增加而减少;当  $P_{TLS} = 35$  mW时,光谱中有5阶BSLs。这与图4(a)中的光谱的变化情况一致。激光输出的平均功率随  $P_{TLS}$  的增大

先增大后减小,与光谱中BSLs的数量变化情况相似。在一定的  $P_{TLS}$  范围内,随着  $P_{TLS}$  的增大,光谱中的BSLs的数量和激光输出的平均功率却在减小,主要原因是BP光设置了多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器中布里渊增益的起始值,为BSLs成为BP光设置了一个阈值,该阈值取决于BP光的强度。BP光功率越大,BSLs成为BP光的阈值越高<sup>[29]</sup>,因此,在固定的LD泵浦功率下,BSLs的数量和激光输出的平均功率曲线均随着TLS输出功率  $P_{TLS}$  的增大而呈现下降趋势。

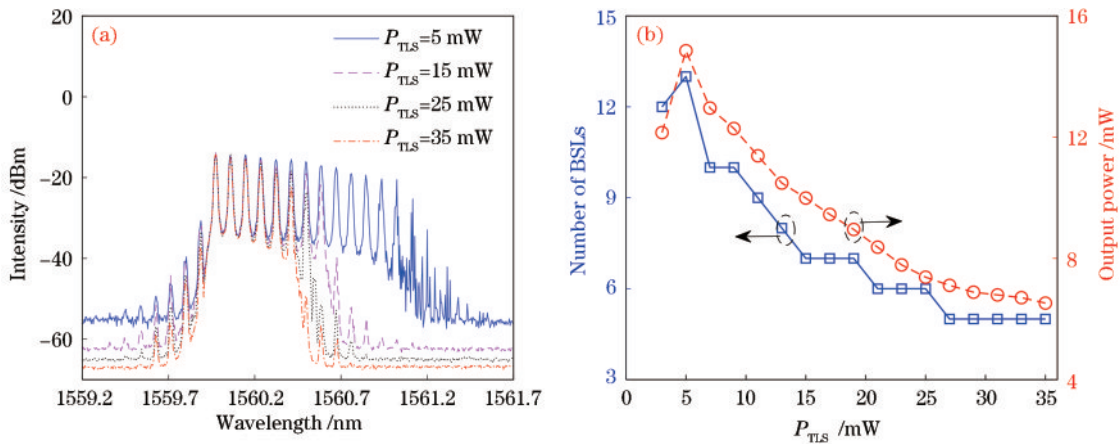


图4 在不同  $P_{TLS}$  条件下,布里渊-掺铒随机光纤激光器输出的光谱以及BSLs的数量和激光输出的平均功率随  $P_{TLS}$  的变化曲线。

(a)输出光谱;(b)BSLs的数量和激光输出的平均功率随  $P_{TLS}$  的变化情况

Fig. 4 Output spectrum of Brillouin-erbium-doped random fiber laser under different  $P_{TLS}$ , and the variation curves of the number of BSLs and the average power of the laser with the change of  $P_{TLS}$ . (a) Output spectrum; (b) variation curves of the number of BSLs and the average power of the laser with the change of  $P_{TLS}$ .

随后,对布里渊-掺铒随机光纤激光器的波长可调谐性进行了探究。探究过程中,将  $P_{TLS}$  固定为10 mW,  $P_{LD}$  固定为325 mW,通过改变  $\lambda_{TLS}$ ,观测激光器输出的光谱情况。图5是当BP光的波长分别为1550.5、1553.5、1556.5、1559.5、1562.5、1565.5 nm时,该激光器输出的光谱。从图5中可以看出,该激光器的波

长调谐范围可达~15 nm,并且在此调谐范围内,光谱始终保持波长间距约0.088 nm。此外,对不同BP光波长  $\lambda_{TLS}$  下的多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器输出的OSNR进行分析,结果如图6所示。从图6中可以看出,激光输出的OSNR与BP光波长密切相关。当BP光波长位于1556~1563 nm范围,即随机光纤激光

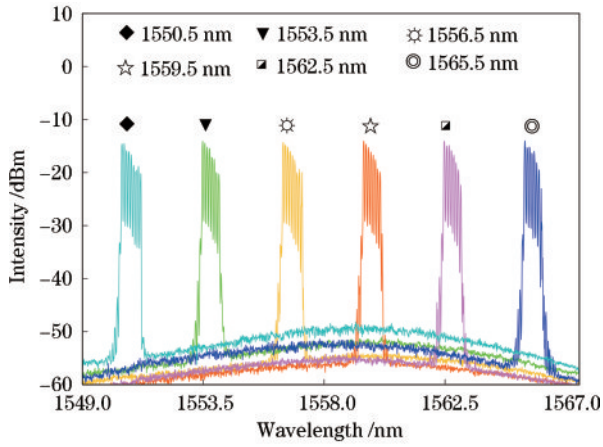


图 5 在不同的  $\lambda_{\text{TLS}}$  条件下,多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器输出的光谱

Fig. 5 Spectrum of multi-wavelength Brillouin-erbium-doped random fiber laser under different  $\lambda_{\text{TLS}}$

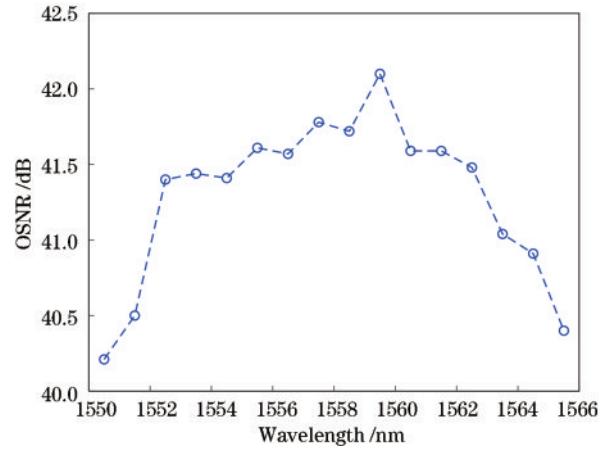


图 6 在不同的  $\lambda_{\text{TLS}}$  下,多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器输出的 OSNR

Fig. 6 OSNR of the multi-wavelength Brillouin-erbium-doped random fiber laser at different  $\lambda_{\text{TLS}}$

器放大自发辐射(ASE)的峰值附近时,会获得较大的 OSNR;当 BP 光波长位于 1559.5 nm,即随机光纤激光器 ASE 的峰值处时,会获得最大的 OSNR,约为 42.1 dB。

最后,对多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器的稳定性进行探究。将  $P_{\text{LD}}$  固定为 325 mW,  $P_{\text{TLS}}$  固定为 5 mW,  $\lambda_{\text{TLS}}$  固定为 1559.97 nm,对 BP 光及第 1 阶至第

10 阶 BSLs 的波长及其峰值功率进行监测,在 1 h 内每隔 10 min 记录相关数据。图 7(a)、(b)分别为各阶波长及其峰值功率随时间的变化情况。从图 7 中可以看出,BP 光及第 1 阶至第 10 阶 BSLs 的波长在 1 h 内的漂移范围为 0~0.008 nm,其相应的峰值功率的波动范围为 0~2.28 dB,证明了该激光器具有较高的波长和功率稳定性。

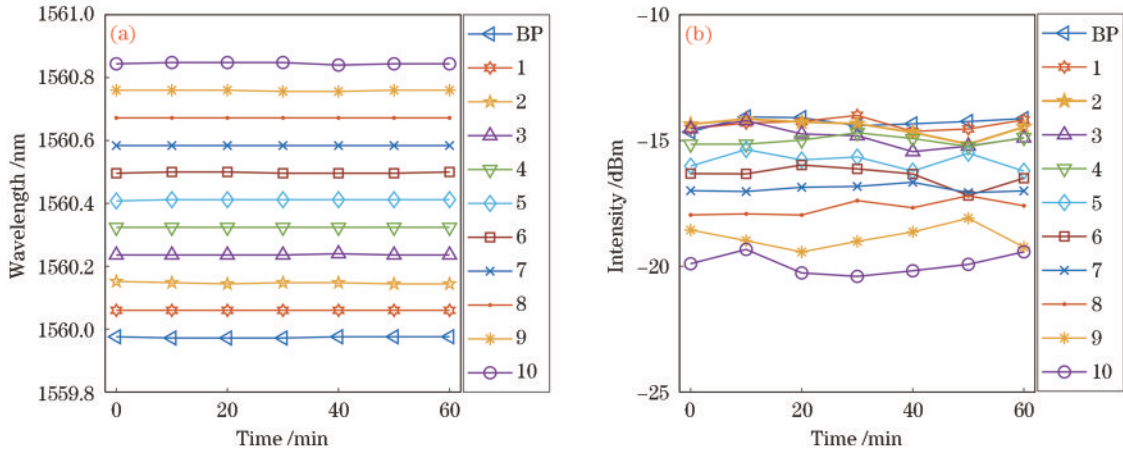


图 7 激光器在 1 h 内的波长漂移和峰值功率波动情况。(a)波长漂移;(b)峰值功率波动

Fig. 7 Wavelength shift and peak power fluctuation of the laser in 1 h duration. (a) Wavelength shift; (b) peak power fluctuation

## 4 结 论

研究了一种半开腔的可调谐多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器。该激光器利用长 SMF 的后向瑞利散射提供随机分布的光学反馈,并与光纤反射镜构成半开腔结构;进一步利用掺铒光纤和长 SMF 的受激布里渊散射提供激光增益。在如此结构简单的半开腔激光装置中,通过调节和优化 LD 的输出功率、TLS 的输出波长和功率,获得了稳定的 13 阶 BSLs 和 5 阶反

BSLs 激光输出。多波长随机光纤激光器输出的波长在 1550.5~1565.5 nm 范围内可调谐,并且在此调谐范围内,光谱中的多波长光谱线数量几乎保持不变,波长间距始终稳定保持在约 0.088 nm。此外,通过稳定性测试证明了该激光器具有非常高的波长稳定性和功率稳定性。该半开腔可调谐多波长布里渊-掺铒随机光纤激光器具有结构简单、波长数量多、波长可调谐范围宽和稳定性高等优点,在光通信、微波光子学、精密计量和光纤传感等领域有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Miao S J, Zhang W T, Song Y, et al. High-resolution random fiber laser acoustic emission sensor[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 12699-12708.
- [2] Wang Z N, Sun W, Wu H, et al. Long-distance random fiber laser point sensing system incorporating active fiber [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22448-22453.
- [3] Rosa P, Rizzelli G, Tan M M, et al. Characterisation of random DFB Raman laser amplifier for WDM transmission[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28634-28639.
- [4] Tan M, Rosa P, Le S T, et al. Transmission performance improvement using random DFB laser based Raman amplification and bidirectional second-order pumping[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2215-2221.
- [5] Ma R, Zhang W L, Guo J Y, et al. Decoherence of fiber supercontinuum light source for speckle-free imaging[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26758-26765.
- [6] Wu H, Han B, Wang Z N, et al. Temporal ghost imaging with random fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9957-9964.
- [7] 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.  
Huang C Q, Liu M S, Che T Y, et al. A tunable multi-wavelength random fiber laser based on half-open cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0302001.
- [8] 吉照宇, 邓宇翔, 张祖兴. 可调谐多波长布里渊随机光纤激光器[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0901002.  
Ji Z Y, Deng Y X, Zhang Z X. Tunable multiwavelength Brillouin random fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0901002.
- [9] Zhu Y Y, Zhang W L, Jiang Y. Tunable multi-wavelength fiber laser based on random Rayleigh back-scattering[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(16): 1559-1561.
- [10] Zhu X X, Xiao P P, Yuan W. Multi-wavelength Brillouin Raman random fiber laser with double Brillouin frequency shift[J]. *Optik*, 2021, 227: 166085.
- [11] Zhu D, Sun X D, Zhao J F, et al. Switchable multi-wavelength random distributed feedback fiber laser[J]. *Optik*, 2019, 189: 103-108.
- [12] 杨茜, 周泽中, 刘恺, 等. 频率间隔可切换多波长布里渊随机光纤激光器[J]. *中国激光*, 2022, 49(11): 1101003.  
Yang Q, Zhou Z Z, Liu K, et al. Frequency interval switchable multi-wavelength Brillouin random fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(11): 1101003.
- [13] Liu J W, Tong Z R, Zhang W H, et al. Tunable multi-wavelength random distributed feedback fiber laser based on dual-pass MZI[J]. *Applied Physics B*, 2021, 127(2): 20.
- [14] Liu J W, Tong Z R, Zhang W H, et al. Switchable and tunable multi-wavelength erbium-doped random distributed feedback fiber laser based on a compound filter [J]. *Optik*, 2021, 241: 167015.
- [15] Saleh S, Cholan N A, Sulaiman A H, et al. Stable multiwavelength erbium-doped random fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0902106.
- [16] Liu Y Y, Dong X Y, Jiang M, et al. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on random distributed feedback[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(9): 240.
- [17] Feng T, Jiang M L, Ren Y T, et al. High stability multiwavelength random erbium-doped fiber laser with a reflecting-filter of six-superimposed fiber-Bragg-gratings [J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(9): 2526-2538.
- [18] Leandro D, Rota-Rodrigo S, Ardanaz D, et al. Narrow-linewidth multi-wavelength random distributed feedback laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(17): 3591-3596.
- [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]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 2839-2844.
- [20] Huang C Q, Dong X Y, Zhang N, et al. Multiwavelength Brillouin-erbium random fiber laser incorporating a chirped fiber Bragg grating[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 294-298.
- [21] Huang P, Shu X W, Zhang Z X. Multi-wavelength random fiber laser with switchable wavelength interval[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 28686-28695.
- [22] Mei J, Jiang Q, Liu S, et al. Full-open cavity multi-wavelength random fiber laser with double Brillouin frequency spacing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(18): 1215-1218.
- [23] Pang M, Bao X Y, Chen L A, et al. Frequency stabilized coherent Brillouin random fiber laser: theory and experiments[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27155-27168.
- [24] Zhang L, Xu Y P, Gao S, et al. Multiwavelength coherent Brillouin random fiber laser with ultrahigh optical signal-to-noise ratio[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0900308.
- [25] Ye J, Zhang Y, Xu J M, et al. Broadband pumping enabled flat-amplitude multi-wavelength random Raman fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1786-1789.
- [26] Zhang H, Shu X W, Xu Z W, et al. Tunable multiwavelength random fiber laser with odd and even order stokes separated[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(5): 455-458.
- [27] Wu H, Wang Z N, Fan M Q, et al. Multiwavelength ytterbium-Brillouin random Rayleigh feedback fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(3): 035105.
- [28] Wang F, Gong Y F. Tunable and switchable multi-wavelength erbium-Brillouin random fiber laser incorporating a highly nonlinear fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(15): 4093-4099.
- [29] Al-Mansoori M H, Abd-Rahman M K, Adikan F R M, et al. Widely tunable linear cavity multiwavelength Brillouin-erbium-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2005, 13(9): 3471-3476.