

## 频率间隔可切换多波长布里渊随机光纤激光器

杨茜, 周泽中, 刘恺, 张祖兴\*

南京邮电大学电子与光学工程学院先进光子技术实验室, 江苏 南京 210023

**摘要** 设计出一种宽带、频率间隔可切换的多波长布里渊随机光纤激光器。该激光器具有双开腔结构,通过调节前、后向布里渊泵浦功率比,可以实现输出多波长激光在单倍与双倍布里渊频移间隔之间切换。结果显示,当拉曼泵浦功率设置为 831.8 mW 时,得到了 44.5 nm(1528 ~1572.5 nm)输出带宽内共 253 阶双倍频移间隔( $\sim 0.176$  nm)的斯托克斯线,以及 42.5 nm(1532 ~1574.5 nm)输出带宽内共 483 阶单倍频移间隔( $\sim 0.088$  nm)的斯托克斯线。频率间隔可切换多波长布里渊随机光纤激光器有望拓宽多波长激光器在光通信和传感等领域的应用范围。

**关键词** 激光器; 随机激光; 频率间隔可切换; 受激布里渊散射

**中图分类号** TN248.1

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202249.1101003

## 1 引言

自 2010 年随机光纤激光器的结构被首次提出并研究以来,随机光纤激光器因具有高功率、高效率<sup>[1-5]</sup>、多波长<sup>[6-8]</sup>、可调谐<sup>[9-11]</sup>、窄线宽<sup>[12-15]</sup>和可变频宽<sup>[16-18]</sup>等突出优势,被国内外学者们广泛研究讨论。不同于传统光纤激光器具有确切的反馈谐振腔镜,随机光纤激光器没有传统意义上界限明确的谐振腔结构,而是依靠光纤内的随机散射进行光反馈,并且可以利用光纤内的各种非线性效应来实现级联,从而产生宽带多波长激光。目前,基于随机光纤激光器的多波长激光器因其自身结构简便、光谱质量好、成本低廉等诸多优于其他多波长激光器产生机制的优势,有望成为波分复用(WDM)系统和密集波分复用(DWDM)系统的理想光源<sup>[19-20]</sup>,且在未来的 5G 通信系统以及传感系统中也有着良好的发展前景。

近年来,关于随机激光器的多项研究应用了受激布里渊散射(SBS)与受激拉曼散射(SRS)效应,并通过瑞利散射所形成的随机分布式反馈来实现多波长级联输出。Zhang 等<sup>[21]</sup>设计出一种具有双分支结构的基于布里渊的随机光纤激光器,最终实现

了奇、偶阶布里渊斯托克斯线(BSL)的分离输出,分别获得了六阶具有双倍布里渊频移间距的奇、偶阶 BSL 分离输出。Mamdoohi 等<sup>[22]</sup>从具有不同耦合比的非线性放大光纤环路的简单结构出发,证明了输出的 BSL 的波长间隔可以在单倍和双倍布里渊波长间隔中切换。Mei 等<sup>[23]</sup>制备出一种全开腔结构的多波长布里渊-拉曼随机光纤激光器,该全开腔结构仅由一卷光纤组成,最终获得了 66 阶双倍布里渊频移间距的奇偶阶 BSL。因此,对于布里渊-拉曼随机光纤激光器,面临的一大挑战就是实现在更大的带宽范围内输出具有波长间隔可切换的 BSL。

本文利用一种将级联 SBS 效应作为理论基础的双开腔随机光纤激光器,通过调节正反向布里渊泵浦(BP)功率比,最终获得 44.5 nm(1528 ~1572.5 nm)输出范围内共 253 阶双倍频移间隔( $\sim 0.176$  nm)的 BSL,以及 42.5 nm(1532 ~1574.5 nm)输出范围内共 483 阶单倍频移间隔( $\sim 0.088$  nm)的 BSL。该结构搭建简便,可切换梳齿间隔的多波长布里渊随机光纤激光器满足了 DWDM 和光传感系统对多波长光源的需求,进一步拓展了多波长输出激光器的应用领域,在传感和未来光通信等领域有着非常广阔的应用前景。

收稿日期: 2021-09-30; 修回日期: 2021-11-01; 录用日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(62175116, 91950105)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJ CX21\_0276)

通信作者: \*zxzhang@njupt.edu.cn

## 2 激光器的结构及工作原理

图 1 为频率间隔可切换、具有双开腔结构的多波长布里渊随机光纤激光器的结构图,主要增益由拉曼泵浦(RP)激光器提供,其最大输出功率为 831.8 mW,工作波长为 1455 nm。在本实验结构中,1455/1550 nm 波分复用器(WDM)被用于将 1455 nm RP 激光引入到激光腔中,RP 激光器被用来泵浦一段 8 km 长的作为布里渊和拉曼混合非线性增益介质的色散补偿光纤(DCF),通过弱瑞利后向散射形成分布式激光反射。BP 光由腔外的

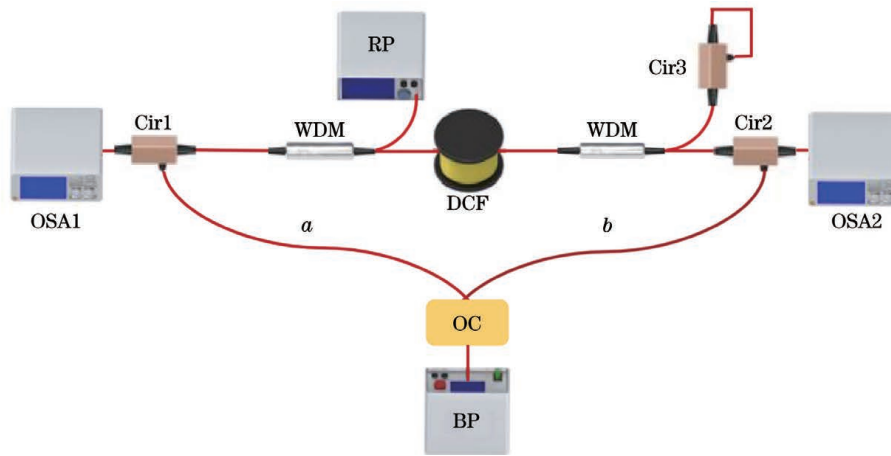


图 1 频率间隔可切换的多波长布里渊随机光纤激光器结构图

Fig. 1 Structure diagram of frequency interval switchable multi-wavelength Brillouin random fiber laser

双开腔多波长布里渊随机光纤激光器的工作原理如下:将分束后的 BP 光分别从两个环形器(Cir1 和 Cir2)的端口 1 注入,并通过 1455/1550 nm WDM 注入 DCF。两束 BP 光在 DCF 中沿相反的方向传播,由于 DCF 中的 SRS 效应,两束 BP 光分别进行分布式拉曼放大,达到 SBS 阈值后,将会各自产生反向传播的一阶 BSL。类似地,一阶 BSL 也通过分布式拉曼效应被放大,并且充当新的泵浦源来产生相对于一阶 BSL 反向传播的二阶 BSL。因此,低阶 BSL 作为高阶 BSL 的泵浦源可以产生更多的高阶 BSL,这样的级联过程一直持续到某一阶的放大 BSL 受到拉曼放大效率的限制,而不能达到下一阶的 SBS 阈值,即当总体增益不足以抵消其损耗时,级联过程停止。此外,靠近 Cir2 的 1455/1550 nm WDM 连接了一个环形器 Cir3,该环形器的端口 2 和端口 3 相连,形成一个反射镜,使得从 DCF 出来的没被吸收的 RP 光能够返回腔内,继续对 BP 光和 BSL 进行拉曼放大,从而提高 RP 光的利用效率。在 DCF 中,瑞利散射、布里渊泵浦光的 SBS 和 SRS 效应同时产生,使得前向布里渊泵浦(FW-BP)产生

可调谐激光源(TLS)提供,其最大功率为 18.2 mW,线宽约为 200 kHz。在本激光器配置中,双向布里渊泵浦设计是利用分光比不同的光耦合器(OC)将 BP 光分成两部分,并通过两个环形器(Cir1 和 Cir2)的端口 1 耦合进腔内来实现的。这允许前向 BP 光和后向 BP 光分别以相反的方向进入线性腔内进行 SBS,进而继续参与级联过程。在两个环形器(Cir1 和 Cir2)输出端口 3 连接两个分辨率均为 0.02 nm 的光谱分析仪 OSA1 和 OSA2 来测量激光器的性能以及多波长输出激光的光谱图。

的偶数阶 BSL 和后向布里渊泵浦(BW-BP)产生的奇数阶 BSL 共同从右端 OSA2 输出。同理,FW-BP 产生的奇数阶 BSL 和 BW-BP 产生的偶数阶 BSL 共同从左端 OSA1 输出,这样可以实现从线性腔的两端都输出具有单倍布里渊频率间隔的多波长激光。

## 3 实验结果及讨论

在进行不同分光比耦合器实验前,为了验证双向布里渊泵浦可以实现频率间隔切换功能,固定布里渊泵浦波长,对单向泵浦生成奇数阶和偶数阶 BSL 的过程进行单独实验,如图 2 所示。图 2(a)中先单独采用 FW-BP,从右端输出的偶数阶斯托克斯线如图 2(b)所示;再在相同布里渊泵浦波长和功率大小的条件下,单独采用图 2(c)所示的 BW-BP,再次得到右端输出的奇数阶斯托克斯线,如图 2(d)所示。对于这两种单向泵浦情况,奇数阶和偶数阶斯托克斯线分别从两个端口输出,相邻斯托克斯线的频率间隔均为双倍布里渊频移间隔,即单向泵浦双开腔随机激光器产生双倍布里渊频移间隔斯托克斯

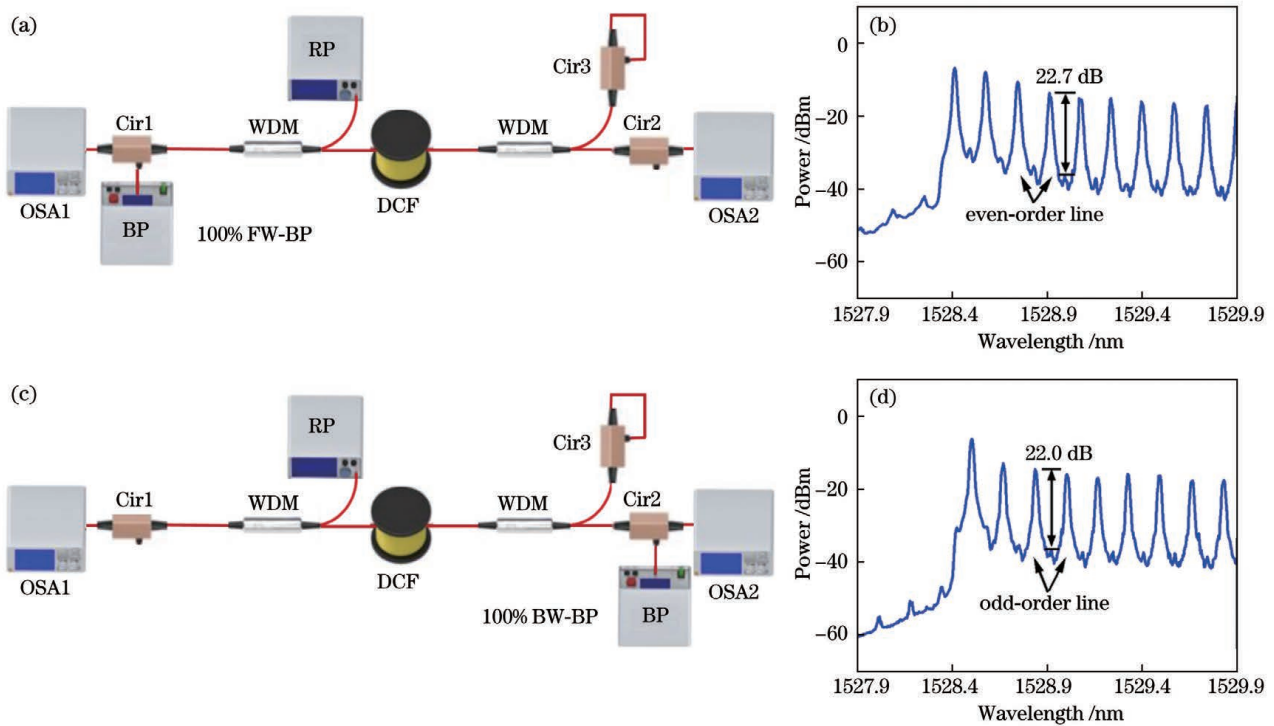


图 2 布里渊泵浦实验结构图及斯托克斯线。(a)单向 FW-BP 实验结构图及(b)从其右端 OSA2 测得的偶数阶斯托克斯线；(c)单向 BW-BP 实验结构图及(d)从其右端 OSA2 测得的奇数阶斯托克斯线

Fig. 2 Structure diagrams of BP experiment and Stokes lines. (a) Structure diagram of single FW-BP experiment and (b) even-order Stokes lines measured from OSA2 on the right; (c) structure diagram of single BW-BP and (d) odd-order Stokes lines measured from OSA2 on the right

线。图 3 所示为将上述两种单向泵浦情况下测得的偶数阶和奇数阶斯托克斯线合并后得到的多波长激光谱,此时的频率间隔为单倍布里渊频移。因此可以推测,如果 FW-BP 和 BW-BP 光同时注入腔内即采用双向泵浦,并且都满足 SBS 阈值,则会在同一输出端口处将奇数和偶数阶斯托克斯线组合在一起,形成频率间距为单倍布里渊频移间隔的输出光谱。

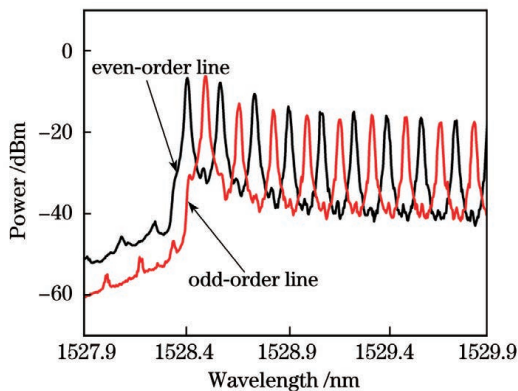


图 3 单向前向和后向泵浦输出斯托克斯线的合并光谱  
Fig. 3 Combined spectra of Stokes lines output by single FW-BP and BW-BP

下面通过设置不同分光比耦合器(OC)来控制 FW-BP 和 BW-BP 的功率比例,实现不同波长间隔和不同信噪比的多波长布里渊随机激光输出。假设 OC 连接 Cir1 端口与连接 Cir2 端口的功率分配比例为  $a:b$ ,实验测量不同 OC 分光比条件下的输出光谱。

### 3.1 分光比为 10:90 或 90:10

当设置分光比  $a:b = 10:90$  时,相当于输入的布里渊泵浦信号光大部分经过右侧 Cir2 环形器进入激光腔内,与前向传输的拉曼泵浦光相互作用,在 DCF 内出现 SBS、SRS 和瑞利散射效应,产生多波长布里渊随机激光。实验中,设置拉曼泵浦功率为最大输出功率 831.8 mW,用作布里渊泵浦的 TLS 波长为 1528 nm,最大输出功率为 18.2 mW,在 OSA1 和 OSA2 输出端使用分辨率为 0.02 nm 的光谱仪进行观测。图 4 所示为由左、右输出端的 OSA1 和 OSA2 测得最大带宽为 44.5 nm(1528~1572.5 nm)的多波长布里渊随机激光输出,且从两个输出端获得的皆为双倍频移间隔的多波长布里渊随机激光输出,即相邻梳齿的间距约为 0.176 nm。具体地,如图 4(b)所示,OSA2 输出端为奇数阶 BSL,

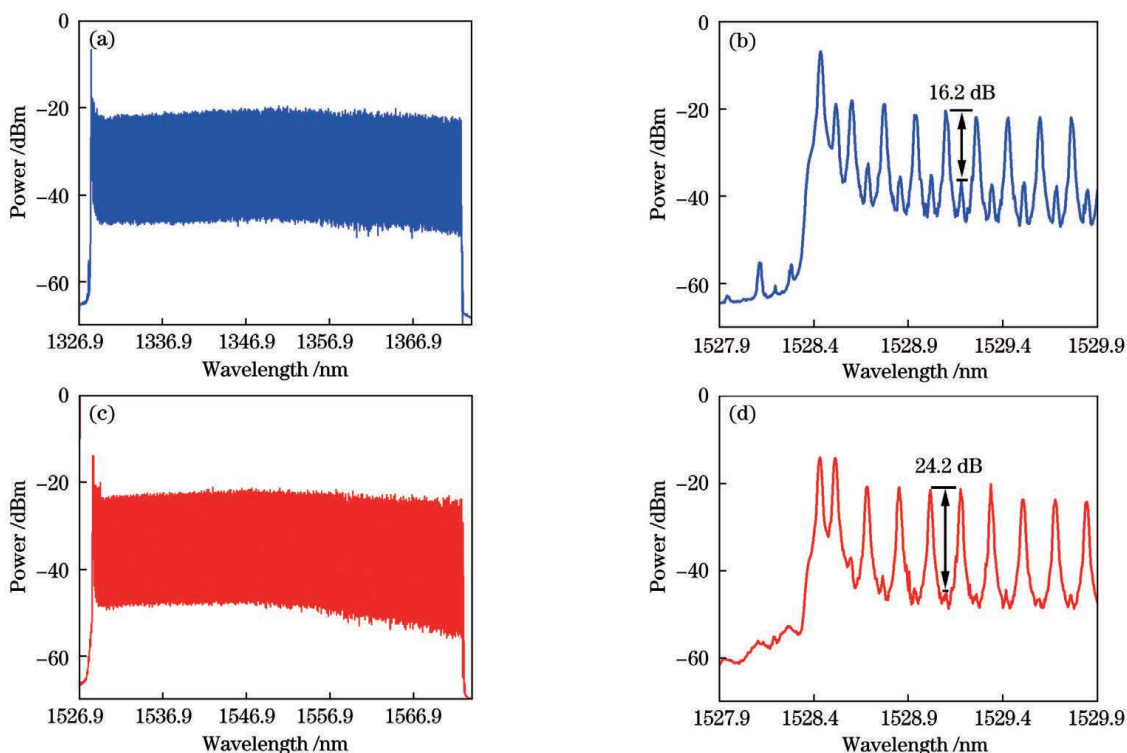


图 4 分光比为 10:90 时,不同输出端测得的光谱及其细节放大图。(a) OSA2 测得光谱及其(b)细节放大图;(c) OSA1 测得光谱及其(d)细节放大图

Fig. 4 Measured spectra and their detailed enlarged graphs when splitting ratio is 10:90. (a) Spectrum measured from OSA2 and (b) its detailed enlarged graph; (c) spectrum measured from OSA1 and (d) its detailed enlarged graph

最左端的高峰为 BP 信号光,奇数阶与偶数阶之间的落差即光信噪比(OSNR),约为 16.2 dB。由于 BW-BP 的功率比 FW-BP 的功率高得多,因此 OSA2 输出端的奇数阶 BSL 比偶数阶 BSL 具有更高的功率。同理,如图 4(d)所示,从 OSA1 输出端得到的是偶数阶 BSL,OSNR 约为 24.2 dB。

当设置分光比  $a:b=90:10$  时,相当于输入的布里渊泵浦信号光主要经过 Cir1 环形器进入激光腔内,其他实验参数设置同上。此时后向传输的奇数阶 BSL 从 OSA1 输出端口输出,前向传输的偶数阶 BSL 从 OSA2 输出端口输出,输出的多波长布里渊随机激光光谱如图 5 所示。

从图 5 所示的 BSL 光谱可以看到,当设置 BP 光的波长为 1528 nm 时获得了带宽约为 44.5 nm (1528~1572.5 nm) 的多波长布里渊随机激光输出。可见,当采用分光比为 90:10 的耦合器时,从两个输出端获得的多波长布里渊随机激光相邻的 BSL 具有双倍布里渊频移间隔,且有较高的 OSNR (16.4 dB 和 22.4 dB),即得到的是双倍布里渊频移间隔多波长布里渊随机激光。

综上,采用分光比为 10:90 或 90:10 的耦合器

时,低功率的 BP 端没有达到 SBS 阈值,激光操作完全由高功率 BP 端主导,即激光系统等效为单端泵浦,输出光谱为具有双倍布里渊频率间隔的斯托克斯线。在这种泵浦条件下,布里渊频率梳中较低功率的斯托克斯线是由高功率斯托克斯线的瑞利散射导致的。

### 3.2 分光比为 30:70 或 70:30

当设置分光比  $a:b=30:70$  时,增大 FW-BP 的功率,观察两端环形器端口 3 所接 OSA1 和 OSA2 检测到的多波长布里渊随机激光,输出波形如图 6(a)、(c)所示,输出光谱放大细节如图 6(b)、(d)所示。可以看到,当 BP 光波长设置为 1533 nm 时,获得带宽为 39.8 nm (1533~1572.8 nm) 的多波长布里渊随机激光输出。如图 6(b)、(d)所示,两个输出端的 OSNR 与分光比为 10:90 时的 OSNR 相比有所降低(7.6 dB 和 8.8 dB)。

当设置分光比  $a:b=70:30$  时,获得的多波长布里渊随机激光光谱如图 7(a)、(c)所示,输出光谱的放大细节如图 7(b)、(d)所示。观察 OSA1 和 OSA2 接收到的输出波形,发现其奇数阶与偶数阶斯托克斯线之间的 OSNR 相较于分光比为 10:90

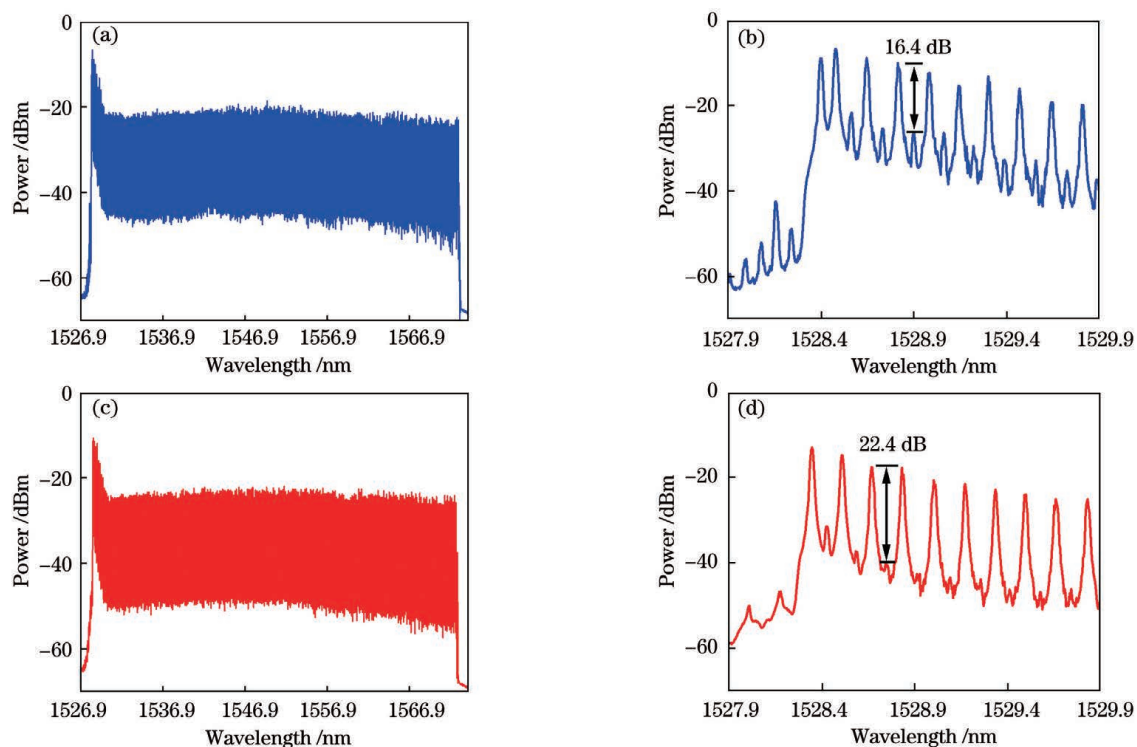


图 5 当分光比为 90:10 时, 不同输出端测得的光谱及其细节放大图。(a) OSA1 测得的光谱及其(b)细节放大图;  
(c) OSA2 测得的光谱及其(d)细节放大图

Fig. 5 Measured spectra and their detailed enlarged graphs when splitting ratio is 90:10. (a) Spectrum measured from OSA1 and (b) its detailed enlarged graph; (c) spectrum measured from OSA2 and (d) its detailed enlarged graph

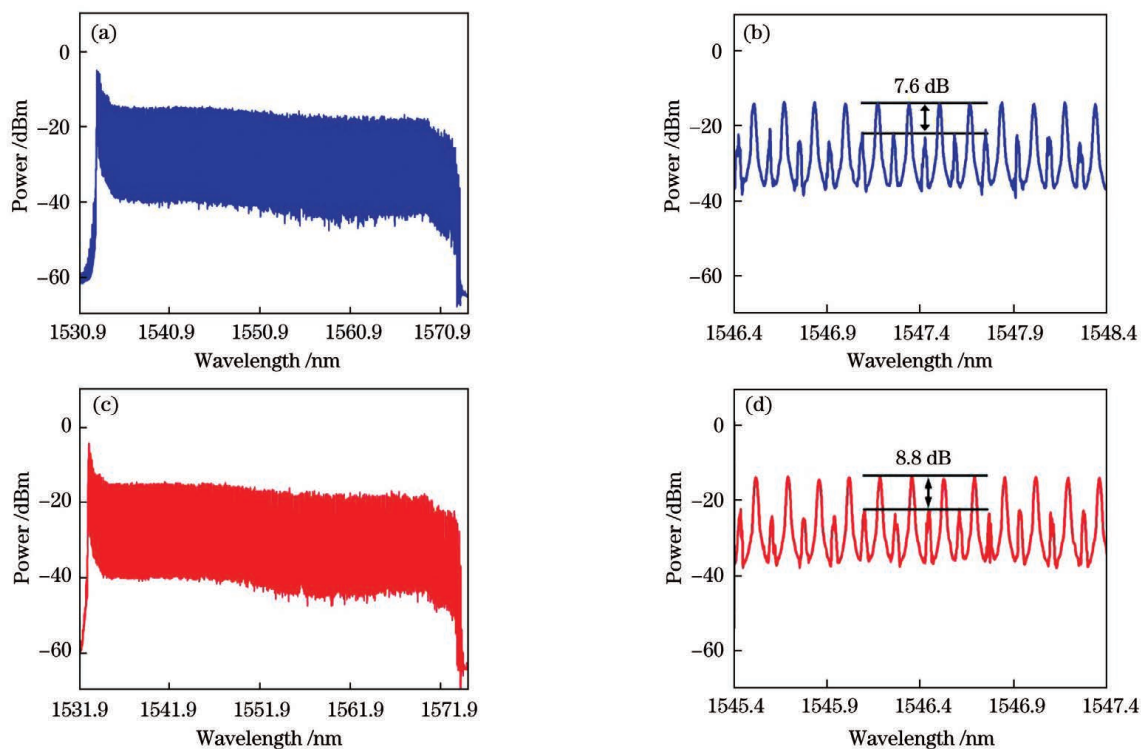


图 6 当分光比为 30:70 时, 不同输出端测得的光谱及其细节放大图。(a) OSA1 测得的光谱及其(b)细节放大图;  
(c) OSA2 测得的光谱及其(d)细节放大图

Fig. 6 Measured spectra and their detailed enlarged graphs when splitting ratio is 30:70. (a) Spectrum measured from OSA1 and (b) its detailed enlarged graph; (c) spectrum measured from OSA2 and (d) its detailed enlarged graph

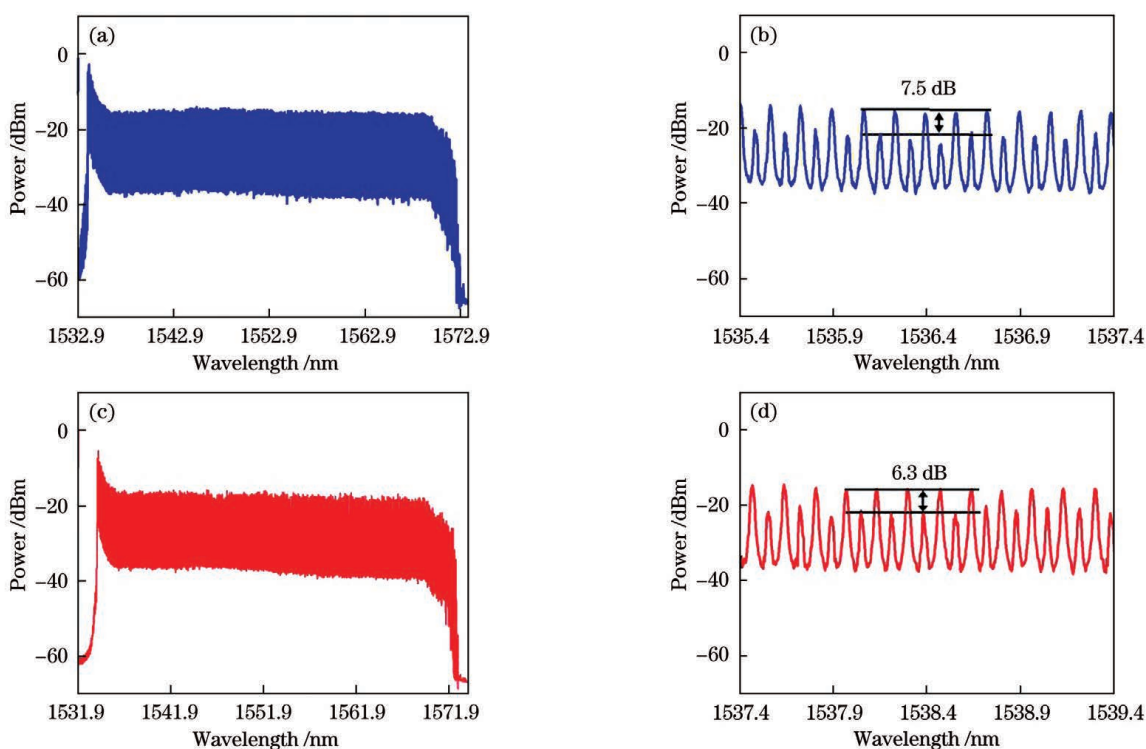


图 7 当分光比为 70:30 时, 不同输出端测得的光谱及其细节放大图。(a) OSA1 测得的光谱及其(b)细节放大图; (c) OSA2 测得的光谱及其(d)细节放大图

Fig. 7 Measured spectra and their detailed enlarged graphs when splitting ratio is 70:30. (a) Spectrum measured from OSA1 and (b) its detailed enlarged graph; (c) spectrum measured from OSA2 and (d) its detailed enlarged graph

或 90:10 的情况也有所降低。这是因为此时低功率的 BP 信号可以达到 SBS 阈值, 产生级联斯托克斯线, 但正向和反向 BP 功率相差较大, 导致产生的多波长布里渊随机激光的奇数阶和偶数阶斯托克斯线在功率上有所差异。对比分光比为 10:90 或 90:10 和分光比为 30:70 或 70:30 的情况, 发现降低两个输入端的功率差, 会导致奇数阶与偶数阶斯托克斯线之间的 OSNR 降低, 从而实现相邻 BSL 频率间隔从双倍向单倍布里渊频移间隔过渡。

### 3.3 分光比为 50:50

通过上述分光比的调整测试, 可以推断: 随着两个输入端 BP 的功率差降低, 相邻输出 BSL 的功率差减小, 频率间隔会从双倍频率间隔过渡到单倍频率间隔, 即由  $\sim 20$  GHz 减小到  $\sim 10$  GHz。因此, 设置分光比  $a:b=50:50$ , 相当于将相同功率的 FW-BP 和 BW-BP 同时注入腔内, 观测 OSA1 和 OSA2 端口的输出光谱, 结果如图 8 所示。

如图 8 所示, 当设置 TLS 输出的 BP 光波长为 1532 nm 时, 可以获得带宽约为 42.5 nm (1532 ~ 1574.5 nm) 的多波长布里渊随机激光输出。可以观察到相邻 BSL 间隔约为 0.088 nm, 即此时输出的多波长布里渊随机激光是具有单倍布里渊频率

间隔的 BSL。然而, 单倍频率间隔 BSL 频率梳多波长布里渊随机激光输出的获得是在牺牲带宽和 OSNR 的基础上完成的。RP 和 TLS 最大输出功率的限制, 以及腔内的固定损耗等导致输出频率梳带宽受限, 后续将考虑对泵浦功率进行补偿, 进一步降低腔内损耗等, 从而获得带宽更大、信号质量更好的单倍频率间隔多波长布里渊随机激光输出。

上述结果表明, 通过设置不同分光比的耦合器可以实现多波长布里渊随机光纤激光器频率间隔切换功能。当设置分光比为 10:90 或 90:10 时, 相当于输入的布里渊泵浦信号光主要经过其中一个输入端进入激光腔内, 因此输出端的相邻 BSL 频率间隔为双倍布里渊频移, 即  $\sim 20$  GHz。当设置分光比为 30:70 或 70:30 时, 两个输入端的功率差降低, 导致偶数阶斯托克斯线对奇数阶斯托克斯线的抑制作用有所减弱, 奇数阶同理。此时输出端的相邻 BSL 频率间隔呈现出从双倍布里渊频移间隔向单倍布里渊频移间隔转变的趋势, 即由  $\sim 20$  GHz 降低到  $\sim 10$  GHz。当设置分光比为 50:50 时, FW-BP 和 BW-BP 同时注入腔内, 并且都满足 SBS 阈值, 在输出端口处将奇数阶和偶数阶斯托克斯线组合在

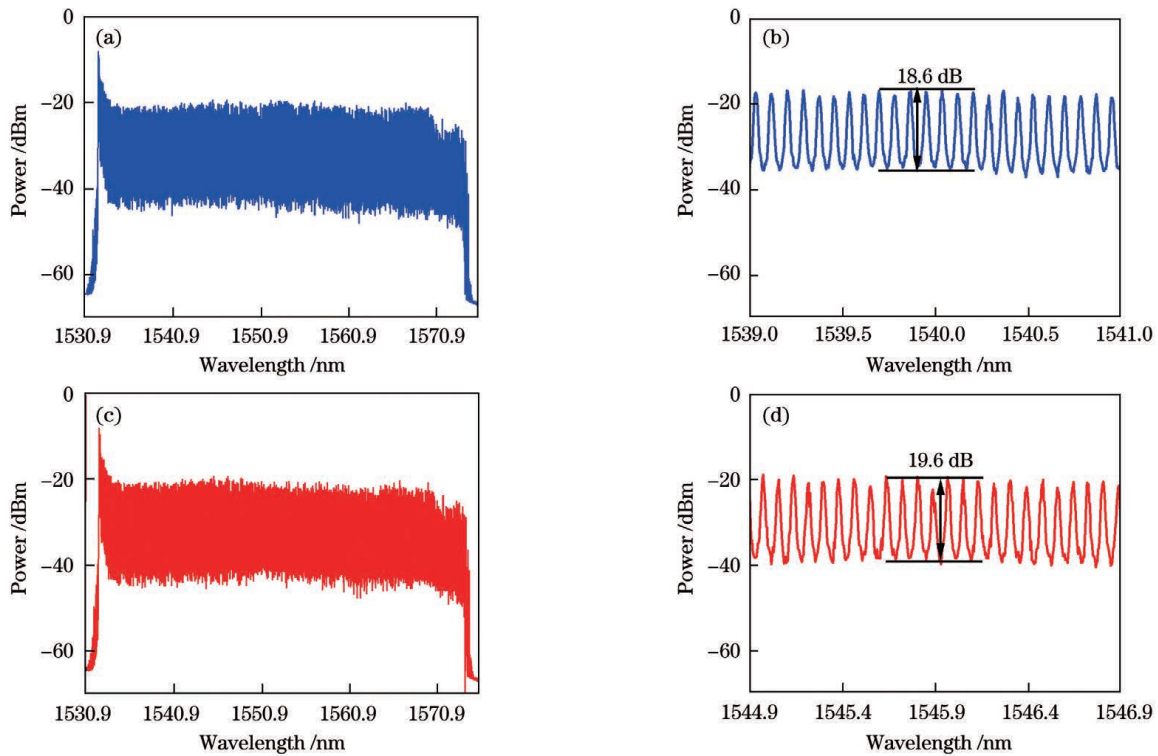


图 8 当分光比为 50:50 时, 不同输出端测得的光谱及其细节放大图。(a) OSA1 测得的光谱及其(b)细节放大图; (c) OSA2 测得的光谱及其(d)细节放大图

Fig. 8 Measured spectra and their detailed enlarged graphs when splitting ratio is 50:50. (a) Spectrum measured from OSA1 and (b) its detailed enlarged graph; (c) spectrum measured from OSA2 and (d) its detailed enlarged graph

一起,形成的相邻输出光谱的频率间距为单倍布里渊频移间隔,即 $\sim 10$  GHz。

## 4 结 论

设计出一种宽带、频率间距可切换的多波长布里渊随机光纤激光器,通过调节前、后向 BP 的耦合比,可以实现多波长布里渊随机激光输出在单倍与双倍布里渊频移间隔之间的切换,最终得到在 44.5 nm(1528~1572.5 nm)范围内共 253 阶双倍频移间隔( $\sim 0.176$  nm)的斯托克斯线,以及 42.5 nm(1532~1574.5 nm)范围内共 483 阶单倍频移间隔( $\sim 0.088$  nm)的斯托克斯线。宽带、频率间距可切换的多波长布里渊随机光纤激光器在光通信和传感等领域具有更高的灵活性和更大的应用范围。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang H, Zhou P, Xiao H, et al. Efficient Raman fiber laser based on random Rayleigh distributed feedback with record high power[J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(7): 075104.
- [2] 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.

- [3] Vatnik I D, Churkin D V, Podivilov E V, et al. High-efficiency generation in a short random fiber laser[J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(7): 075101.
- [4] Wang Z, Fan H W M, Rao Y, et al. Random fiber laser: simpler and brighter[J]. Optics & Photonics News, 2014, 25(12): 30.
- [5] 谢海伦, 贾可昕, 陈佳文, 等. 基于耦合射频信号和单个马赫-曾德尔调制器的可调光学频率梳[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0706002.  
Xie H L, Jia K X, Chen J W, et al. Tunable optical frequency comb based on coupled radio frequency signal and single Mach-Zehnder modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0706002.
- [6] El-Taher A E, Harper P, Babin S A, et al. Effect of Rayleigh-scattering distributed feedback on multiwavelength Raman fiber laser generation [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7914: 791433.
- [7] 张鹏, 贾青松, 王天枢, 等. 间隔 0.173 nm 的可调谐多波长布里渊掺铒光纤激光器[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 0614002.

- Zhang P, Jia Q S, Wang T S, et al. Tunable multi-wavelength Brillouin Er-doped fiber laser with 0.173 nm spacing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 0614002.
- [8] 焦磊, 宋跃江, 张旭苹. 四波混频增强多波长布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0214007.
- Jiao L, Song Y J, Zhang X P. Four-wave-mixing enhanced multi-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0214007.
- [9] Li Y, Lu P, Bao X Y, et al. Random spaced index modulation for a narrow linewidth tunable fiber laser with low intensity noise[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2294-2297.
- [10] 樊利, 郑小梅, 夏光琼, 等. 基于正交光注入增益开关 850 nm-VCSEL 获取双路宽带光学频率梳的方案[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701022.
- Fan L, Zheng X M, Xia G Q, et al. Generation of two-channel broadband optical frequency comb using gain-switched 850 nm-VCSEL under orthogonal optical injection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701022.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Pang M, Bao X Y, Chen L. Observation of narrow linewidth spikes in the coherent Brillouin random fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1866-1868.
- [14] 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.
- [15] Zhu T, Bao X Y, Chen L. A self-gain random distributed feedback fiber laser based on stimulated Rayleigh scattering[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 1371-1374.
- [16] Teng R X, Ding Y C, Chen L L. Random fiber laser operating at 1115 nm[J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(2): 169-172.
- [17] Chen L L, Ding Y C. Random distributed feedback fiber laser pumped by an ytterbium doped fiber laser[J]. *Optik*, 2014, 125(14): 3663-3665.
- [18] Zhang H W, Xiao H, Zhou P, et al. High-power random distributed feedback Raman fiber laser operating at 1.2- $\mu\text{m}$ [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(s2): S21410.
- [19] Smith S P, Zarinetchi F, Ezekiel S. Narrow-linewidth stimulated Brillouin fiber laser and applications[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(6): 393-395.
- [20] Dey B, Aubry S. New suggestion concerning the origin of sonoluminescence[J]. *Physica D*, 2006, 216(1): 136-156.
- [21] 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.
- [22] Mamdoohi G, Sarmani A R, Bakar M H A, et al. Switchable multiwavelength Brillouin-Raman fiber laser utilizing an enhanced nonlinear amplifying fiber loop design[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 7201011.
- [23] 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.

## Frequency Interval Switchable Multi-Wavelength Brillouin Random Fiber Laser

Yang Qian, Zhou Zezhong, Liu Kai, Zhang Zuxing\*

*Advanced Photonic Technology Lab, College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China*

### Abstract

**Objective** The multi-wavelength laser using random fiber lasers promises to become an ideal light source for wavelength division multiplexing (WDM) and dense wavelength division multiplexing (DWDM), with broad



application prospects in 5G communication systems and sensing systems. Recently, the combination of stimulated Brillouin scattering (SBS) and stimulated Raman scattering (SRS) and random distributed feedback using Rayleigh scattering have achieved a multi-wavelength cascade output, which has been widely used in many research on random lasers. However, one main challenge of Brillouin Raman random fiber lasers is to realize Brillouin Stokes light (BSL) output with switchable wavelength intervals in a wider bandwidth. In this paper, we propose a double open cavity random fiber laser using the cascaded SBS to obtain BSLs of 253 double shift intervals ( $\sim 0.176$  nm) in the output range of 44.5 nm (1528–1572.5 nm) and 483 single shift intervals ( $\sim 0.08$  nm) in the range of 42.5 nm (1532–1574.5 nm) by adjusting the forward and reverse BP power ratio. This easy-to-build, interval switchable multi-wavelength Brillouin random fiber laser meets the demand for multi-wavelength sources in DWDM and optical sensing systems, further expanding the application area and increasing the flexibility of multi-wavelength output. They have good application prospects in the fields of sensing and optical communications.

**Methods** In the current laser configuration, the bi-directional Brillouin pump design is obtained using optical couplers (OCs) with different splitting ratios to divide BP light into two parts, which are coupled into the cavity through port 1 of two circulators (Cir1 and Cir2). This allows the forward and backward BPs to enter the linear cavity in opposite directions, and experience SBS in a DCF pumped by the RP, which continues the cascade process. The cascade process continues until the BSL amplified in a certain order is limited by the Raman amplification efficiency, and does not reach the SBS threshold for the next order. Additionally, a circulator (Cir3) is connected to the 1455/1550 nm WDM near Cir2, and has connected ports 2 and 3 to form a reflector, allowing the remaining unabsorbed RP from DCF to return to the cavity, and continue Raman amplification of BP and BSL, thus improving the RP efficiency. In DCF, Rayleigh scattering, SBS, and SRS occur simultaneously, allowing even-order and odd-order BSLs from forward and backward Brillouin pumped lights, respectively, to be output from the right end of OSA2 together. Similarly, odd-order and even-order BSLs generated by the forward and backward Brillouin pump lights are output from the left OSA1 together. Thus, by controlling the splitting ratio of the OCs, multi-wavelength lasers with single or double Brillouin frequency intervals can be output at both ends of the linear cavity.

**Results and Discussions** The frequency interval of multi-wavelength Brillouin random fiber laser can be switched by setting different couplers with different splitting ratios. When the splitting ratio is set to 10:90 or 90:10, this corresponds to the input Brillouin pump signal mainly entering the laser cavity through an input, so that the adjacent BSLs at the output end are separated by a double Brillouin frequency shift, that is,  $\sim 20$  GHz (Figs. 4 and 5). When the beam splitting ratio is set to 30:70 or 70:30, the power difference between the two inputs decreases, resulting in a low-power BP signal that can overcome the SBS threshold. Thus, the adjacent BSL frequency spacing at the output port can transition from a double Brillouin frequency shift spacing to a single Brillouin frequency shift spacing, that is, from  $\sim 20$  GHz to  $\sim 10$  GHz (Figs. 6 and 7). Finally, at a splitting ratio of 50:50, both FW-BP and BW-BP are simultaneously injected into the cavity and both satisfy the SBS threshold. This combines the odd and even order Stokes lines at the output port to form an output spectrum with a frequency spacing of a single Brillouin frequency shift interval, that is,  $\sim 10$  GHz (Fig. 8).

**Conclusions** In this paper, we propose a broadband and frequency interval switchable multi-wavelength Brillouin random fiber laser. Due to the dual-open cavity configuration, the frequency interval of the output multi-wavelength laser can be switched between single and double Brillouin frequency shifts by adjusting the power ratio between the forward and backward BPs. The results show that when RP power is 831.8 mW, 253 Stokes lines with double Brillouin frequency shift interval ( $\sim 0.176$  nm) in a wavelength range of 44.5 nm (1528–1572.5 nm) and 483 Stokes lines with single Brillouin frequency shift interval ( $\sim 0.088$  nm) in a wavelength range of 42.5 nm (1532–1574.5 nm) are obtained. The frequency interval switchable multi-wavelength Brillouin random fiber laser is expected to greatly broaden the application and increase the flexibility of multi-wavelength laser in fields such as optical communication and sensing.

**Key words** lasers; random laser; frequency interval switching; stimulated Brillouin scattering