

## 正交偏振分插复用多波长布里渊随机光纤激光器

吴科帅, 王春华\*, 谷祥

上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

**摘要** 相对于常见的多波长激光器, 正交偏振多波长激光器可输出相邻波长偏振正交的多波长激光, 可有效消除密集波分复用(DWDM)系统中相邻波长信道的干扰, 在光纤传感、光纤通信和光谱检测领域中具有广泛应用。基于保偏光纤(PMF)中的受激布里渊散射(SBS)的轴向偏振牵引效应, 设计并实现了具有单倍和 2 倍布里渊频移(BFS)间隔的偏振正交分插复用多波长布里渊随机光纤激光器(OPI-MWBRFL)。首先, 采用 3 km 长 PMF 布里渊随机激光腔, 实现了 7 个波长的单 BFS 间隔正交多波长激光输出, 相邻波长偏振消光比不低于 33 dB。其次, 通过级联 21 km 长距离单模光纤(SMF)布里渊随机激光腔和 3 km 长 PMF 随机腔, 实现了具有 2 倍 BFS 间隔的正交多波长(4 个波长)激光输出, 相邻波长偏振消光比可达 34 dB。所实现的偏振正交方案由 PMF 中的 SBS 轴向偏振牵引的物理机理决定, 因此不仅可以实现优良的波长间偏振正交, 而且对系统的偏振准直要求低, 具有良好的工作稳定性。系统监测实验验证了 OPI-MWBRFL 系统的良好稳定性。

**关键词** 激光器; 正交偏振分插复用; 保偏光纤; 非线性偏振牵引; 受激布里渊散射

**中图分类号** TN248.1

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL230582

## 1 引言

布里渊随机光纤激光器(BRFL)是基于光纤受激布里渊散射(SBS)效应和随机分布式反馈谐振腔的新型激光器。2007 年 De Matos 等<sup>[1]</sup>首次提出基于光纤的随机激光器, 光子在介质中的随机散射导致光的平均自由程增加, 且 SBS 效应具有增益高、阈值低<sup>[2]</sup>和增益谱宽窄等突出特性, 因此 BRFL 已成为了国内外学者的研究热点。其中, 由高阶 SBS 实现的多波长布里渊随机光纤激光器(MWBRFL)更是研究热点<sup>[3-6]</sup>。研究者通过结合四波混频及高非线性光纤, 已实现了多达 16 nm 带宽的 MWBRFL<sup>[7]</sup>。但目前关于 MWBRFL 的研究主要局限于激光输出功率、激光效率、线宽<sup>[8-10]</sup>、相对强度噪声<sup>[11-16]</sup>、相位噪声及实现和控制多波长激光<sup>[17]</sup>等非偏振参数或性能方面, 而关于 MWBRFL 的偏振特性相关方面的详细研究鲜有报道。此外, 由于 MWBRFL 的多波长是基于逐级激发的高阶 Stokes 光实现的, 故 MWBRFL 具有固定的波长间隔, 即布里渊频移(BFS)。对于石英光纤, SBS 在 1550 nm 波段的 BFS 约为 10.8 GHz。拓宽 MWBRFL 波长间隔具有重要意义<sup>[18-20]</sup>。

2008 年, Zadok 等<sup>[21]</sup>首次发现了 SBS 中的偏振牵引效应, 发现在实际单模光纤(SMF)SBS 效应中, 信号光增益不仅会被相向而行的泵浦光的 SBS 放大, 而且其偏振态(SOP)也会受泵浦光 SOP 的牵引。在理

想的 SMF 中, 信号光 SOP 会被牵引向泵浦光的入射偏振态, 而在实际存在随机双折射的 SMF 中, 信号光 SOP 的被牵引方向由输入泵浦光的偏振态和光纤双折射共同决定<sup>[22]</sup>。在随机分布的低双折射的 SMF 中, 信号光的偏振牵引方向与布里渊频移(BFS)、SBS 增益等其他 SBS 特性同样是不确定的<sup>[23-24]</sup>, 这种偏振牵引方向的不确定性严重限制了 SMF 偏振牵引效应的实际应用。2017 年本课题组理论发现并实验验证了在保偏光纤(PMF)中 SBS 具有确定的轴向偏振牵引效应<sup>[25]</sup>。我们发现在 PMF 中 SBS 偏振牵引方向是确定的, 总是被牵引向 PMF 的两个主轴之一。保偏光纤的这一轴向牵引特性解决了单模光纤中 SBS 偏振牵引方向不确定的问题, 为 SBS 非线性偏振牵引效应的实际应用提供了理论参考。利用此机理, 我们实现了基于 PMF 传统谐振腔的偏振正交切换布里渊激光器<sup>[26]</sup>、基于 PMF 随机激光腔的 BRFL<sup>[27]</sup>、单 BFS 间隔的正交偏振分插复用多波长布里渊随机光纤激光器(OPI-MWBRFL)。

本文首先基于 PMF 中 SBS 的轴向偏振牵引效应, 采用长度为 3 km 的 PMF 构建随机激光腔, 实现了稳定工作的具有高偏振消光比的单 BFS 间隔 OPI-MWBRFL。长 SMF 中随机低双折射的遍历效应会导致 SBS 偏振牵引方向与泵浦光入射 SOP 具有强相关性, 根据该特点, 在反馈环路上通过级联一个 21 km 长

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-04-19; 录用日期: 2023-04-28; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61575118, 62075123)

通信作者: \*lizawch@staff.shu.edu.cn

的 SMF 随机腔和一个 3 km 长的 PMF 随机腔,实现了具有高偏振消光比且稳定工作的双 BFS 间隔 OPI-MWRBFL。

## 2 单 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 实验系统与结果

单 BFS 间隔的正交偏振分插复用多波长布里渊随机光纤激光器的实验装置如图 1 所示,其中 ISO 为单向光隔离器。可调谐激光器(TLS)输出的中心波长为  $\lambda_0$  的泵浦光通过分光比为 30:70 的光纤耦合器(C1)后进入掺铒光纤放大器(EDFA)进行功率放大,之后利用偏振控制器 1(PC1)调节泵浦光的入射 SOP,对其与 PMF 的任一主轴进行粗略准直处理。泵浦光从环形器(Cir)的端口 1 进入由 3 km 长 PMF 构成的直线形随机腔。泵浦光沿 PMF 传播,首先激发反向的 Stokes 自发辐射光,该 Stokes 光反向传播,在 SBS 作

用下增益放大,并在反向传播过程中产生同频的一次瑞利背向散射,进而产生与 Stokes 光同向的二次瑞利散射,其在 SBS 作用下增益放大,由此在 PMF 中构建了随机激光腔。当泵浦光功率超过随机腔的激光发射阈值时,波长为  $\lambda_1 = \lambda_0 + 0.088$  nm 的一阶 Stokes 随机激光被激发出。随机激光经过耦合器 C2 分路后,能量比为 90% 的光被偏振控制器 2(PC2)调节,其偏振态与泵浦光偏振态粗略正交后合波,再经过 EDFA、PC1 和 Cir 进入 PMF 随机腔。当波长为  $\lambda_1$  的光强超过 PMF 随机腔的起振阈值时,波长为  $\lambda_2$  的二阶 Stokes 光被激发出。依次类推,只要被激发的高阶 Stokes 激光功率超过 PMF 随机腔的激光阈值,更高一阶的 Stokes 光会被激发出。部分多波长随机激光经过 C2 耦合输出,偏振控制器 PC3 和可旋转检偏器 P 分别检出沿 PMF 主轴的偏振分量,并将其送入光谱仪 (OSA) 进行光谱检测。

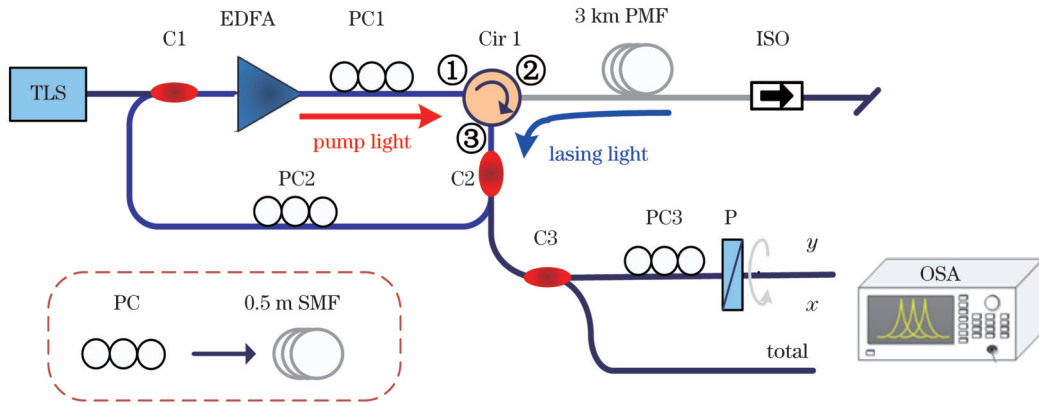


图 1 单 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 实验装置

Fig. 1 Experimental setup of OPI-MWRBFL with single BFS interval

在 PMF 谐振腔中, SBS 的轴向牵引效应和光纤传播方程<sup>[1,6,10]</sup>分别为

$$\frac{dI_s}{dz} = g_0 I_{p0} I_s \left[ 1 + (\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1)(\hat{s} \cdot \hat{\beta}_1) \right], \quad (1)$$

$$\frac{d(\hat{s} \cdot \hat{\beta}_1)}{dz} = g_0 I_{p0} \hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1 \left[ 1 - (\hat{s} \cdot \hat{\beta}_1)^2 \right], \quad (2)$$

式中:  $z$  为保偏光纤的主轴;  $g_0$  为 SBS 效应的增益系数;  $I_{p0}$  为入射泵浦光功率;  $I_s$  为信号光强度;  $\hat{p}_m$  为入射泵浦光的偏振态;  $\hat{s}$  为信号光 SOP;  $\hat{\beta}_1$  为保偏光纤的归一化偏振矢量。

求解式(1)可得长度为  $L$  的 PMF 的 SBS 增益为

$$G = \frac{1}{2} \left\{ (1 + \hat{s}_m \cdot \hat{\beta}_1) \exp \left[ g_0 I_{p0} (\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1) L \right] + (1 - \hat{s}_m \cdot \hat{\beta}_1) \exp \left[ -g_0 I_{p0} (\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1) L \right] \right\} \exp(g_0 I_{p0} L) \quad (3)$$

式中:  $\hat{s}_m$  为入射信号光的偏振态。式(2)表明,对于任意信号光,其输出偏振态将被牵引向  $\text{sign}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1) \hat{\beta}_1$  对应的光纤主轴方向,即只要  $\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1 \neq 0$ ,  $\hat{s}$  就会被牵引向

$\hat{p}_m$  对应的 PMF 主轴方向。其中,  $\text{sign}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1)$  表示入射泵浦光偏振态  $\hat{p}_m$  点乘保偏光纤归一化矢量  $\hat{\beta}_1$  的符号值。式(3)表明,对于任意  $\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1 \neq 0$ , 信号光在  $\text{sign}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1) \cdot (\hat{s} \cdot \hat{\beta}_1) = 1$  偏振态处有最大增益,在  $\text{sign}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1) \cdot (\hat{s} \cdot \hat{\beta}_1) = -1$  偏振态处有最小增益,其两偏振模互相正交。最大和最小 SBS 增益分别为

$$G_{\max/\min}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1) = \exp \left[ r_0 I_{p0} L (1 \pm |\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1|) \right], \quad (4)$$

式中:  $r_0$  为等效瑞利散射系数。

当泵浦偏振态  $\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1 = 0$  时,最大增益和最小增益相等,为  $G_{\max/\min}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1 = 0) = \exp(r_0 I_{p0} L)$ 。按照最大增益模式竞争原则,在 PMF 随机腔中,只有最大增益偏振模式维持振荡。因此调节入射泵浦光偏振态,使  $\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1 \approx \pm 1$ , 无须严格准直,即可在 PMF 随机腔中得到最大的 SBS 增益,并且激发的一阶 Stokes 激光的输出偏振态将被严格钳位于  $\text{sign}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1) \hat{\beta}_1$ 。当一阶 Stokes 光被送入反馈环时,调节 PC2 使其偏振态与  $\lambda_0$

泵浦光偏振态粗略正交,即可保证激发的二阶随机激光被严格钳位于 $-\text{sign}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1)\hat{\beta}_1$ 。依次类推,可得激发的奇数阶 Stokes 随机激光的偏振态将被严格钳位于 $\text{sign}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1)\hat{\beta}_1$ ,偶数阶 Stokes 随机激光的偏振态将被严格钳位于 $-\text{sign}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1)\hat{\beta}_1$ ,从而实现偏振正交多波长随机激光输出。

图 2 为单 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 实验系统的输出光谱测量结果,其中  $I_x$ 、 $I_y$  分别为检偏器检出的  $x$  方向偏振光和  $y$  方向偏振光。当泵浦激光器波长为 1553.72 nm, EDFA 的输出功率设置为 80 mW 时,由

检偏器 P 检出的  $x$ 、 $y$  偏振方向的奇数阶(实线)和偶数阶(虚线)激光光谱如图 2(a)所示,此时共激发了 6 阶 Stokes 光,各阶激光频移间隔为 0.088 nm,相邻波长之间的偏振消光比可达 33.56 dB。图 2(b)给出了总输出激光光谱。当泵浦光功率设置为 100 mW 时,正交奇/偶数阶输出激光合成光谱和总输出激光光谱分别如图 2(c)、(d)所示,此时共激发 7 阶 Stokes 光,相邻波长的偏振消光比依然不低于 33 dB。理论上,偏振态天然地被钳位于 PMF 的两个正交主轴上,因此可实现更高的偏振消光比。测试结果中的偏振验证了本实验系统具有正交偏振分插复用多波长输出特性。

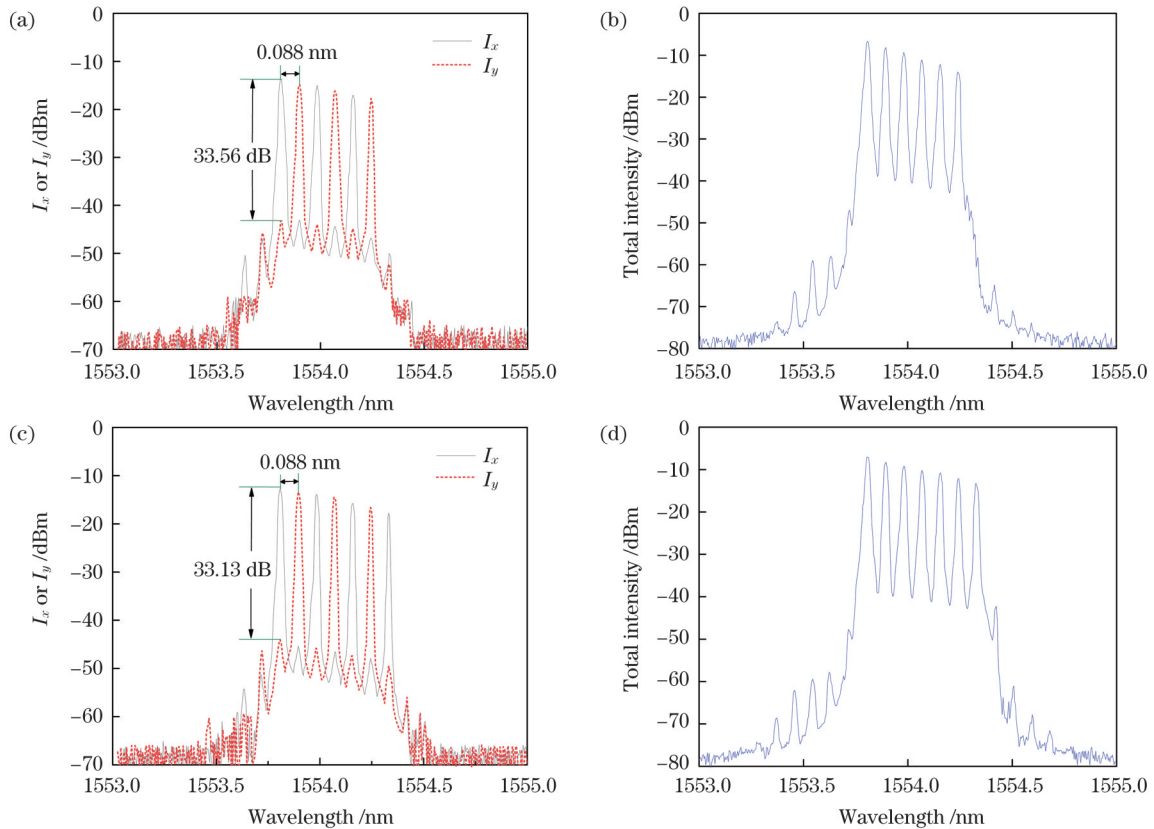


图 2 单 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 实验系统的输出光谱测量结果。(a) 泵浦光功率为 80 mW 时奇(实)/偶(虚)数阶 Stokes 激光的输出光谱;(b) 泵浦光功率为 80 mW 时的总输出光谱;(c) 泵浦光功率为 100 mW 时奇(实)/偶(虚)数阶 Stokes 激光的输出光谱;(d) 泵浦光功率为 100 mW 时的总输出光谱

Fig. 2 Measured results of output spectra of OPI-MWRBFL experimental system with single BFS interval. (a) Output spectra of odd (solid) / even (dotted) order Stokes lasers at pump power of 80 mW; (b) total output spectrum at pump power of 80 mW; (c) output spectra of odd (solid) / even (dotted) order Stokes lasers at pump power of 100 mW; (d) total output spectrum at pump power of 100 mW

为研究不同泵浦光功率对输出激光的影响,设置 EDFA 的输出功率在 80~170 mW 的范围内以 10 mW 间隔变化,观察测量多波长激光的输出光谱。从图 3 可以看出,当泵浦光功率为 80 mW 时,系统有 6 阶 Stokes 光输出。由于谐振腔的损耗,输出激光强度会随波长的增加而逐渐减小,第 6 阶 Stokes 光的光谱强度相对于第 1 阶衰减了 5.63 dB。随着泵浦光功率的增加,输出激光的波长数增加。当泵浦光功率达到

170 mW 时,系统可输出 11 阶 Stokes 光。

在调节泵浦光功率的过程中,多波长激光的输出光谱始终保持稳定。图 4 是泵浦光功率被设置为 100 mW 时输出的 7 阶 Stokes 光(#1~#7)的稳定性测量结果。在 1 h 内以 3 min 为间隔依次记录各阶 Stokes 光功率值和波长值。可以看出,最大功率波动和最大波长偏移分别小于 0.21 dB 和 0.02 nm。实验结果表明,该激光器具有良好的稳定性。

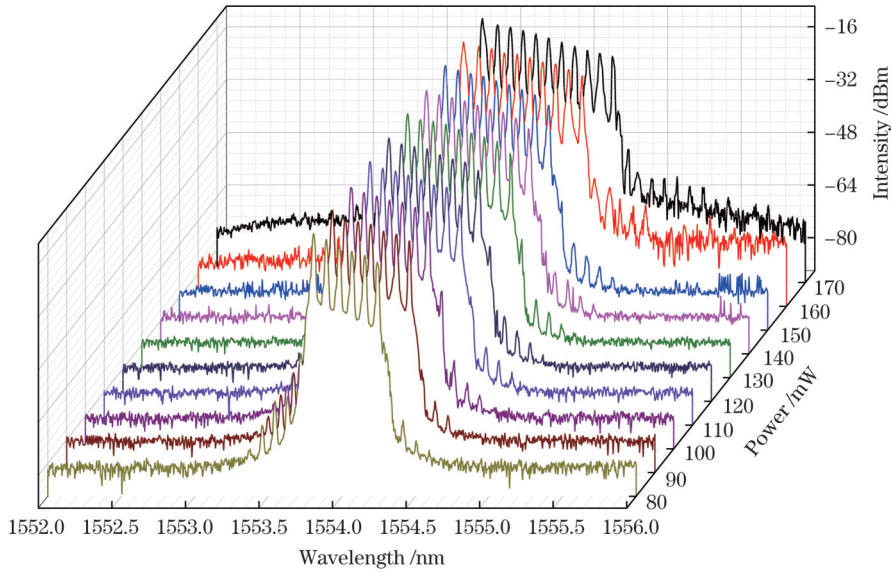


图 3 不同泵浦光功率下单 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 的输出光谱

Fig. 3 Output spectra of OPI-MWRBFL with single BFS interval at different pumping optical powers

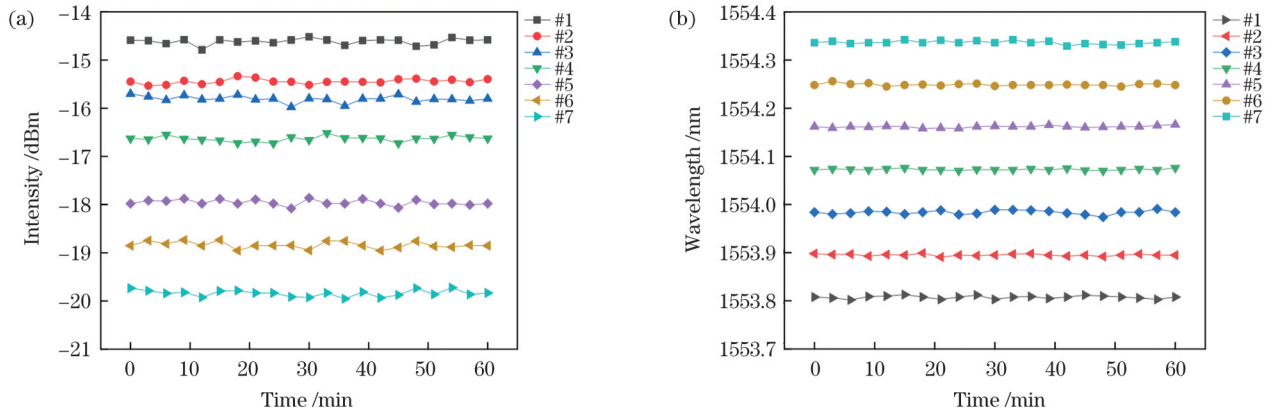


图 4 当 EDFA 输出功率被设置为 100 mW 时各阶输出激光的稳定性测量结果。(a) 功率稳定性; (b) 波长稳定性

Fig. 4 Stability measurement results of each order of output laser when EDFA output power is set to 100 mW. (a) Power stability; (b) wavelength stability

### 3 2 倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL

#### 3.1 实验系统

2 倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 实验系统如图 5 所示。在该系统中,我们对单倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 实验系统进行了改进,在反馈环路级联了一个 21 km 长的 SMF 随机腔和一个 3 km 长的 PMF 随机腔,实现了 2 倍 BFS 间隔的偏振正交多波长输出。在 SMF 随机腔中,由于长 SMF 的随机双折射波长具有良好的各态遍历性,即 SMF 的单位偏振矢量  $\hat{\beta}_1$  沿光纤随机变化,在庞加莱球面上均匀遍历各态,此时光纤中的信号光经历的最大和最小 SBS 增益与输入泵浦光偏振态无关<sup>[25-26]</sup>:

$$G_{\max/\min} = \exp\left[\left(1 \pm \frac{1}{3}\right)g_0 I_{p0} L\right] \quad (5)$$

基于激光模式竞争机理,SMF 随机腔中的激光振

荡将出现在最大增益的偏振模式上。由于长 SMF 随机双折射的各态遍历性,之前的研究表明,信号光偏振态的被牵引方向仅与入射泵浦光偏振态  $\hat{p}_{in}$  有关<sup>[22]</sup>,可表示为

$$\hat{s}_{out,smf}^{\max} = M\hat{p}_{in,smf} \quad (6)$$

式中: $\hat{p}_{in,smf}$  为单模光纤中入射泵浦光的偏振态; $M = \text{diag}(1, 1, -1)$  为对角线矩阵。这说明长 SMF 随机腔的输出激光的偏振态与  $\hat{p}_{in}$  呈线性关系。

此外,长 SMF 随机腔中 SBS 增益较高,因此可大大降低激光泵浦阈值。当进入 SMF 随机腔的  $\lambda_0$  泵浦光功率超过激光腔起振阈值时,SMF 随机腔输出波长为  $\lambda_1$  的一阶 Stokes 激光。大部分  $\lambda_1$  输出激光经 EDFA1 放大后,进入 PMF 随机腔作为泵浦光在 PMF 随机腔中激发出波长为  $\lambda_2$  的一阶 Stokes 激光。进入 PMF 随机腔的  $\lambda_1$  泵浦光偏振态  $\hat{p}_{in,\lambda_1}$  与  $\hat{p}_{in}$  具有线性关系,可利用 PC1 进行调节,使其与 PMF 的主轴粗略准

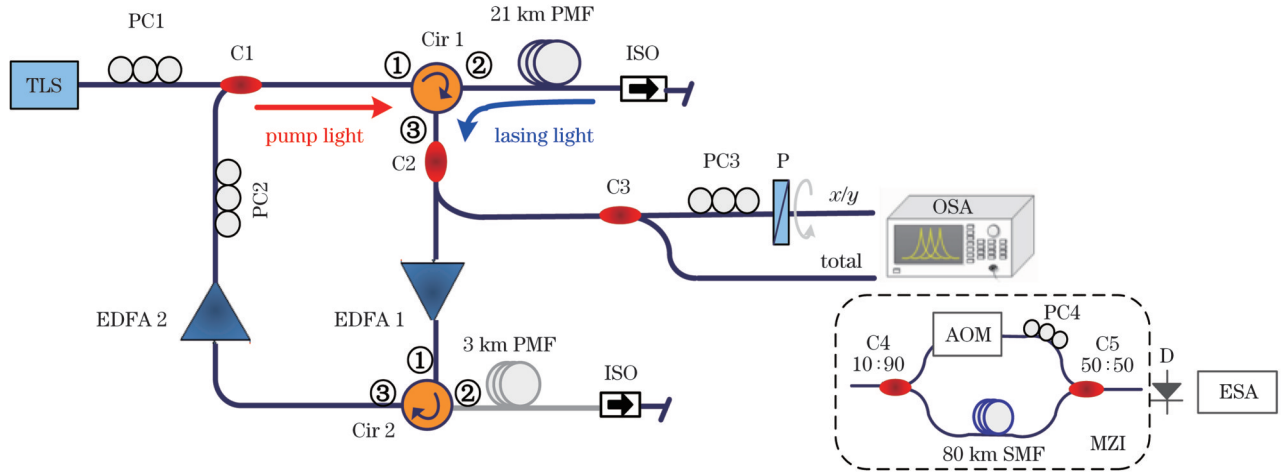


图 5 2 倍 BFS 间隔的 OPI-MWRBFL 实验装置

Fig. 5 Experimental setup of OPI-MWRBFL with double BFS interval

直, 则  $\lambda_2$  激光输出的偏振态将被稳定地锚位于 PMF 随机腔的  $\text{sign}(\hat{p}_{m,\lambda_1} \cdot \hat{\beta}_1) \hat{\beta}_1$ 。  $\lambda_2$  输出激光经 EDFA2 放大, 再由 PC2 进行偏振调节,  $\lambda_2$  激光偏振态与  $\lambda_0$  泵浦光偏振态粗略正交后, 经耦合器 C1 合波后进入反馈环, 进行第二轮激光激发。  $\lambda_2$  光进入 SMF 随机腔激发波长为  $\lambda_3$  的二阶 Stokes 激光输出;  $\lambda_3$  激光经过 EDFA1 放大后, 进入 PMF 随机腔, 激发波长为  $\lambda_4$  的二阶 Stokes 激光输出,  $\lambda_4$  激光的输出偏振态将被严格锚位于  $-\text{sign}(\hat{p}_{m,\lambda_1} \cdot \hat{\beta}_1) \hat{\beta}_1$ 。 以此类推, 在满足激光功率阈值条件下, 可分别在 SMF 和 PMF 随机腔中激发出更高级的 Stokes 激光。

在 SMF 随机腔之后, 耦合器 C2 从环内耦合出少量多波长激光, 利用偏振控制器和检偏器 P 分别分离出  $\pm \hat{\beta}_1$  两正交偏振方向的光进行光谱检测, 其中  $\lambda_{i+1}$  和  $\lambda_{i+3}$  ( $i=0, 1, 2, \dots$ ) 波长的光将分别被锚位于  $\pm \hat{\beta}_1$ 。

### 3.2 实验结果

图 6 为 2 倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 实验系统的输出光谱测量结果。 将 EDFA1 和 EDFA2 的输出光功率均设置为 60 mW, 对输出的随机激光进行正交偏振分离后, 我们对光谱进行了检测, 快轴(实)和慢轴(虚)偏振方向的激光输出的光谱如图 6(a) 所示。 此时在 SMF 随机腔中共激发了 2 阶 Stokes 光, 两激光波长间隔为 2 倍 BFS, 为 0.176 nm, 两者间的偏振消光比可达 34.06 dB。 总输出激光光谱如图 6(b) 所示。 当泵浦光功率被设置为 130 mW 时, 我们可以观察到有 4 个激光波长输出。 分离出的两正交偏振方向的激光分量的光谱如图 6(c) 所示, 各阶激光频移间隔为 0.176 nm, 相邻波长的正交偏振模式的消光比高达 32.59 dB。 总输出激光光谱由图 6(d) 给出。

本实验系统的偏振正交由 PMF 中 SBS 轴向偏振牵引的物理机理决定, 对系统中的偏振准直要求

低。 在系统中只要调节 PC1, 保证反馈环路中 PMF 随机腔的泵浦光满足  $|\hat{p}_{m,\lambda_1} \cdot \hat{\beta}_1| \approx 1$ , 且在耦合器 C1 合波处,  $\lambda_2$  波长激光的偏振态与泵浦光偏振态  $\hat{p}_m$  粗略正交, 相邻波长激光偏振态就可被严格锚位于两个互相正交的 PMF 主轴方向上。 因此系统的工作稳定性非常高。 在本文实验过程中, 没有对系统中长 SMF 和 PMF 裸纤圆盘进行任何机械或温度平稳控制措施。

接下来, 我们对 2 倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 实验系统的稳定性进行了检测。 在 1 h 以内以 3 min 为间隔依次记录各波长激光的光功率值和波长值。 图 7 是泵浦光功率被设置为 130 mW 时输出的 4 波长输出激光稳定性的测量结果。 可以看出, 最大功率波动和最大波长偏移分别小于 0.19 dB 和 0.02 nm。 实验结果表明, 2 倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 系统输出的偏振正交多波长激光同样具有良好的稳定性。

进而我们采用自外差检测技术, 对 2 倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 输出激光的线宽进行了测量。 自外差检测系统由干涉光程差为 80 km 的 SMF 马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 实现, 如图 5 所示。 在 MZI 一个干涉臂上加入声光调制器 (AOM), 引入 50 MHz 干涉频偏, 并加入偏振控制器 PC4, 以保证良好的信号干涉。 我们分别采用两个中心波长为 1553.8 nm 和 1554.1 nm、带宽为 0.3 nm 的光纤 Bragg 光栅 (FBG) 将两个波长滤出, 并送入 MZI。 MZI 的干涉输出信号由探测器 D 接收后送入频谱仪 (ESA), 由测得的干涉频谱得出各波长对应的激光线宽。 图 8 给出了 EDFA1 和 EDFA2 输出功率皆为 130 mW 时, 波长 1553.8 nm (实) 和 1554.1 nm (虚) 对应的线宽测量结果。 可以看出, 对于 1553.8 nm 波长, 其 20 dB 线宽为 31.2 kHz; 对于 1554.1 nm 波长, 其 20 dB 线宽为 40.3 kHz, 因此可

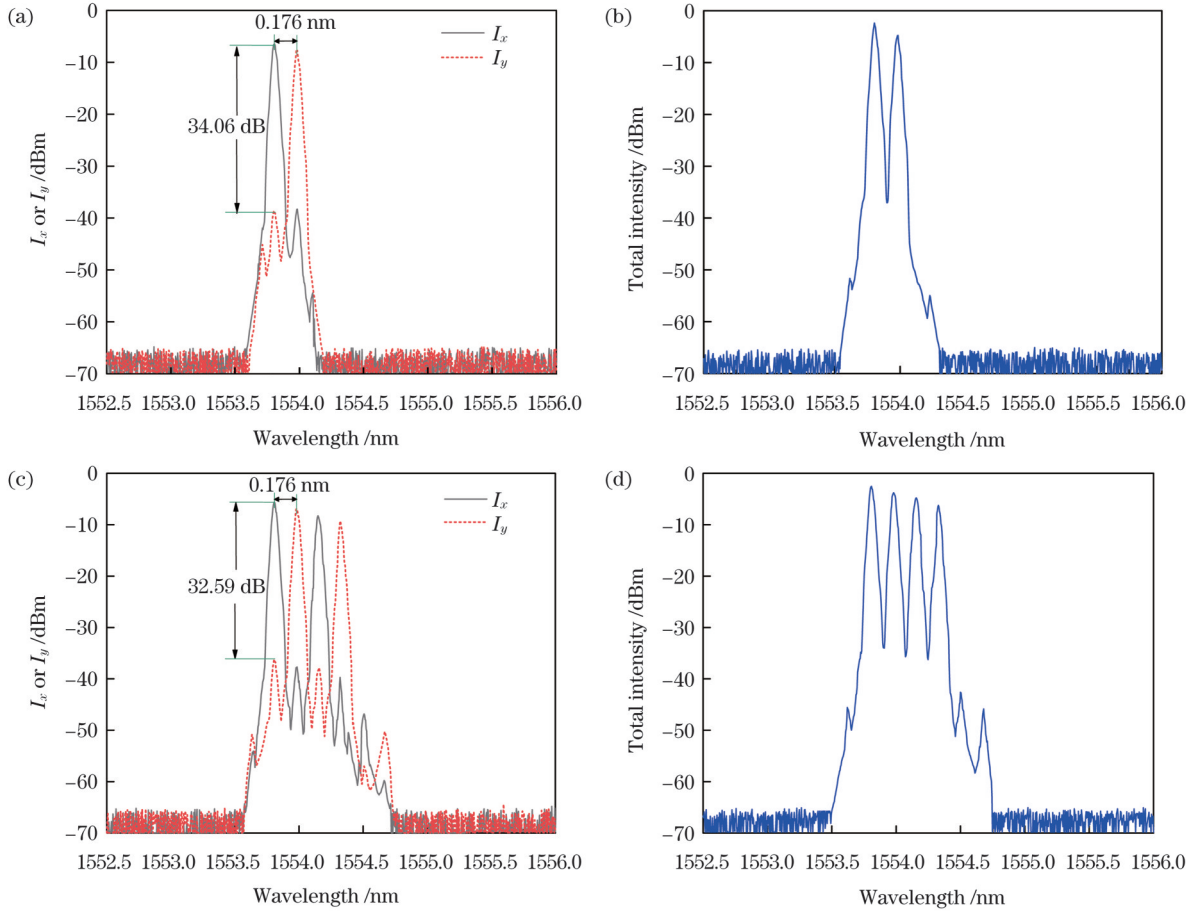


图 6 2 倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 实验系统的输出光谱测量结果。EDFA1 和 EDFA2 输出功率皆为 60 mW 时 (a) 快轴和慢轴偏振方向的激光输出光谱及 (b) 总激光输出光谱; EDFA1 和 EDFA2 输出功率皆为 130 mW 时 (c) 快轴和慢轴偏振方向的激光输出光谱及 (d) 总激光输出光谱

Fig. 6 Measured results of output spectra of OPI-MWRBFL experimental system with double BFS interval. When output powers of both EDFA1 and EDFA2 are 60 mW, (a) output spectra of laser in fast and slow axis polarization directions and (b) total laser output spectrum; when output powers of both EDFA1 and EDFA2 are 130 mW, (c) output spectra of laser in fast and slow axis polarization directions and (d) total laser output spectrum

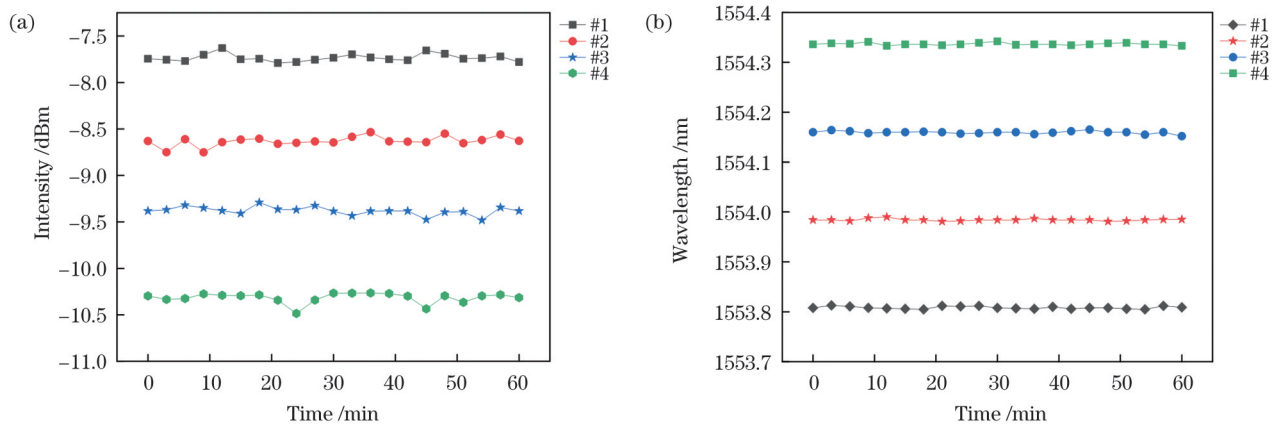


图 7 当 EDFA1 和 EDFA2 功率被设置为 130 mW 时各阶输出激光的稳定性测量。(a) 功率稳定性; (b) 波长稳定性

Fig. 7 Stability measurement results of each order of output laser when powers of both EDFA1 and EDFA2 are set to 130 mW.

(a) Power stability; (b) wavelength stability

得两个波长的 Lorentz 线宽分别为 1.55 kHz 和 2.02 kHz。可见随着 Stokes 光的阶数提高, 线宽有所增加。究其原因可能是高阶波长的泵浦光会经

历更多次的 EDFA 的循环放大, 因此放大噪声的积累将导致被激发的高一阶 Stokes 波长对应的线宽展宽。

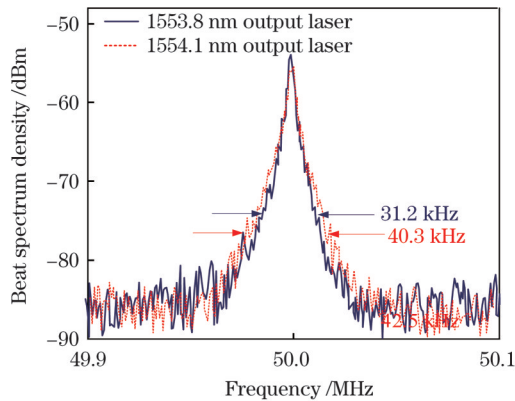


图 8 2 倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 输出激光的线宽测量结果  
Fig. 8 Measured result of linewidth of output laser from OPI-MWRBFL with double BFS interval

## 4 结 论

设计并实现了基于 PMF 的具有单倍和 2 倍 BFS 间隔的 OPI-MWRBFL 系统。输出激光相邻波长的偏振正交由 PMF 中 SBS 轴向偏振牵引的物理机理决定,输出激光的偏振态可被天然地锚位于 PMF 的两个主轴方向上,因此系统可以实现良好的波长间偏振消光比,且系统对偏振准直的要求低,具有良好的偏振稳定性。在单倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 系统中,采用 3 km 长的 PMF 随机腔,实现了 7 波长偏振正交激光输出,波长间偏振消光比可达 33 dB 以上。进一步地在单倍 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 反馈环路级联了 21 km 长的 SMF 随机腔与 PMF 随机腔,实现了 2 倍 BFS 间隔偏振正交多波长激光输出。其中由于长 SMF 光纤中随机双折射的各态遍历特性,SMF 随机腔的激光输出偏振态仅与入射泵浦光偏振态线性相关,而与光纤中双折射的动态随机慢变化无关,故长 SMF 随机激光腔的引入不会损伤系统的偏振稳定性。当设置 EDFA1 和 EDFA2 的输出功率为 130 mW 时,实现了偏振消光比高达 34 dB 的 4 波长偏振正交多波长输出。此外,在无任何机械和温度稳定措施的情况下,监测测量了 1 h 内两种方案的输出激光的功率波动和波长偏移情况,观测到最大功率波动和最大波长偏移均在 0.21 dB 和 0.02 nm 以内,表明系统具有良好的稳定性。研究结果表明,通过级联多级 SMF 随机激光腔和一级 PMF 随机腔,可实现更多 BFS 间隔 OPI-MWRBFL 系统,并且稳定输出具有高消光比的任意 BFS 间隔的正交多波长激光。所提方法在光纤传感、密集波分复用光纤通信和光谱检测领域中具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] de Matos C J S, de S Menezes L, Brito-Silva A M, et al. Random fiber laser[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(15): 153903.
- [2] 柳辰琛, 高乘春, 杨合, 等. 受激布里渊散射及其在集成化光学陀螺中的应用[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1906004.  
Liu C C, Gao C C, Yang H, et al. Stimulated Brillouin scattering and its application in integrated optical gyro[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1906004.
- [3] Bravo M, de Miguel Soto V, Cayetano A O, et al. Fully switchable multi-wavelength fiber lasers based on random distributed feedback for sensors interrogation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2598-2604.
- [4] Ajiya M, Mahdi M A, Al-Mansoori M H, et al. Seamless tuning range based-on available gain bandwidth in multiwavelength Brillouin fiber laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(8): 5944-5952.
- [5] Xie H, Sun J Q, Feng D Q, et al. Compact multiwavelength Brillouin fiber laser by utilizing EDF as hybrid gain media[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1504110.
- [6] 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. Multi-wavelength Brillouin random fiber laser with switchable frequency interval[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(11): 1101003.
- [7] Al-Alimi A W, Cholan N A, Yaacob M H, et al. Wide bandwidth and flat multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19382-19390.
- [8] 李奕哈, 陈善卓, 郭浩. 基于受激布里渊散射的多波长光载波生成及应用[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1906003.  
Li Y H, Chen S Z, Guo H. Generation and application of multi-wavelength optical carrier based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1906003.
- [9] Pang M, Bao X Y, Chen L, et al. Frequency stabilized coherent Brillouin random fiber laser: theory and experiments[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27155-27168.
- [10] Pang M, Bao X Y, Chen L A. Observation of narrow linewidth spikes in the coherent Brillouin random fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1866-1868.
- [11] Tehranchi A, Kashyap R. Theoretical investigations of power fluctuations statistics in Brillouin erbium-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 37508-37515.
- [12] Zhou Z C, Chen L A, Bao X Y. Mode characteristic manipulation of random feedback interferometers in Brillouin random fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3): 678-681.
- [13] Zhang L A, Xu Y P, Gao S, et al. Linearly polarized low-noise Brillouin random fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 739-741.
- [14] Zhang L A, Wang C, Li Z Y, et al. High-efficiency Brillouin random fiber laser using all-polarization maintaining ring cavity[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11306-11314.
- [15] Zhou Z C, Chen L A, Bao X Y. High efficiency Brillouin random fiber laser with replica symmetry breaking enabled by random fiber grating[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 6532-6541.
- [16] 印蓉, 胡亮, 吴龟灵, 等. 基于高 Q 值光纤环形谐振腔的布里渊激光器[J]. *光学学报*, 2022, 42(19): 1914002.  
Yin R, Hu L, Wu G L, et al. Brillouin laser based on high Q fiber ring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1914002.
- [17] Zhou X F, Liu Y Q, Yuan S. A novel double-Brillouin-frequency spaced multi-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser based on non-linear amplified fiber loop mirror[J]. *Optik*, 2014, 125(18): 5218-5220.
- [18] Al-Alimi A W, Al-Mansoori M H, Sarmani A R, et al. A wide flat triple Brillouin frequency spacing multiwavelength fiber laser assisted by four wave mixing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(23): 6648-6654.
- [19] Gan G K W, Yeo K S, Adikan F R M, et al. Four-wave-mixing-assisted Brillouin fiber laser with double-Brillouin-frequency spacing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 21: 198-201.
- [20] Wang X R, Yang Y F, Liu M, et al. Frequency spacing switchable multiwavelength Brillouin erbium fiber laser utilizing cascaded Brillouin gain fibers[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6475-6479.
- [21] Zadok A, Zilka E, Eyal A, et al. Vector analysis of stimulated Brillouin scattering amplification in standard single-mode fibers[J].

- Optics Express, 2008, 16(26): 21692-21707.
- [22] Wang C H, Zhang Y L, Liu G, et al. Orthogonal polarization switchable lasing based on axial polarization pulling of SBS in polarization-maintaining fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28385-28395.
- [23] Galtarossa A, Palmieri L, Schiano M, et al. Statistical characterization of fiber random birefringence[J]. Optics Letters, 2000, 25(18): 1322-1324.
- [24] Cao S, Zhang M. Polarized and birefringence-dependent stimulated Brillouin scattering in single mode fiber[J]. Optik, 2017, 131: 374-382.
- [25] Wang C H, Zhang Q W, Mou C B, et al. Spectral polarization spreading behaviors in stimulated Brillouin scattering of fibers[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 6100111.
- [26] Wang C H, Gao R J, Fang N, et al. Orthogonal polarization clamping and interleaving in polarization maintaining fiber random Brillouin lasers[J]. Optics Communications, 2022, 509: 127697.
- [27] 宁金星, 王春华, 方捻, 等. 实现正交偏振嵌位的受激布里渊随机光纤激光器[J]. 中国激光, 2023, 50(10): 1001002.
- Ning J X, Wang C H, Fang N, et al. Brillouin random fiber laser with orthogonal polarization clamping[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(10): 1001002.

## Orthogonal Polarization Interleaving Multi-wavelength Brillouin Random Fiber Laser

Wu Keshuai, Wang Chunhua\*, Gu Xiang

*Key Laboratory of Specially Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China*

### Abstract

**Objective** Multi-wavelength Brillouin random fiber lasers (MBRFLs) are a new type of laser based on a random distributed feedback resonant cavity and the gain of the stimulated Brillouin scattering (SBS) effect. Because the SBS effect in MBRFLs have excellent properties, such as higher gain, lower threshold, narrower gain spectrum width, and higher sensitivity to environmental factors, it has been widely utilized in the study of fiber lasers. However, most studies are limited to non-polarization parameters, including wavelength, laser linewidth, intensity noise, and phase noise, and are rarely related to the polarization characteristics. In this study, we propose two novel orthogonal polarization interleaving multi-wavelength Brillouin random fiber lasers (OPI-MWRFLs) that emit orthogonally polarized multi-wavelength light with single and double Brillouin frequency shift (BFS) intervals, based on the axial polarization pulling property of the SBS effect in polarization-maintaining fibers (PMFs). This system yields highly stable orthogonally polarized light, with an adjacent polarization extinction ratio as high as 33 dB. Compared with conventional MBRFLs, OPI-MWRFLs can provide multi-wavelength lasing light with orthogonal polarizations between adjacent wavelengths, thus effectively eliminating inter-channel interference in dense wavelength division multiplexing (DWDM) systems with potential application in the fields of fiber sensing, optical fiber communication, and optical spectrum analysis.

**Methods** In this study, we design two novel OPI-MWRFLs that emit orthogonally polarized multi-wavelength light with single and double BFS intervals. First, based on the polarization vector propagation equation and the simplified intensity equation of the pump and signal lights of the SBS effect in PMFs, which theoretically indicate that the SBS effect in the PMF has an explicit axial polarization-pulling behavior. Second, we deduce the relationship between the traction direction and the state of polarization(SOP)of incident pump light, SBS gain, pump light polarization state, and pump light power. Finally, we realize a single BFS OPI-MWRFL using a 3 km long PMF as the SBS gain medium, and demonstrate a double BFS OPI-MWRFL by cascading a 21 km long single mode fiber(SMF)random cavity and a 3 km long PMF random cavity in the feedback loop of the single BFS OPI-MWRFLs. In the double-BFS OPI-MWRFL, we use a tunable laser (TLS) to output the pump light with a center wavelength of 1553.73 nm, then the pump light is adjusted by a polarization controller (PC1) and launched into 21 km long SMF through an ordinary SMF circulator (Cir1). In the random cavity, the SMF acts as a Brillouin gain medium and excitation of even-order Stokes light occurs in the opposite direction, of which 10% is output through the optical coupler (C2), and the rest is amplified by an erbium-doped fiber amplifier (EDFA1) and launched into a 3 km long PMF to stimulate higher-order Stokes light. Thus, by controlling the polarization state of the triggered Stokes light in the feedback loop, orthogonally polarized multi-wavelength lasers with single and double BFS intervals are output.

**Results and Discussions** For single BFS OPI-MWRFLs, the number of output Stokes light wavelengths is positively correlated with the pump optical power. The total output spectrum when the EDFA is in the range of 80–170 mW is measured (Fig. 3). When the output power of the EDFA is set to 80 mW and 100 mW, six and seven wavelengths, respectively, are observed with a space of 0.088 nm (Fig. 2). Under these power settings, four odd-orders of Stokes lights resonating at  $\text{sign}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1)\hat{\beta}_1$  are measured, and the even-order Stokes light resonating at  $-\text{sign}(\hat{p}_m \cdot \hat{\beta}_1)\hat{\beta}_1$  are measured. Further, the extinction ratio of the polarization component exceeds 33 dB [Fig. 2(c)]. In contrast, a double BFS OPI-MWRFL is demonstrated by cascading a 21 km long SMF random cavity and a 3 km long PMF random cavity in the feedback loop of a single BFS OPI-MWRFL. An orthogonally polarized 4-wavelength lasing light with a double BFS interval is observed, and the adjacent polarization extinction ratio is as high as



34 dB (Fig. 6). Finally, after monitoring and measuring the power fluctuation and wavelength shift of the output laser of both schemes for 1 h without any mechanical and temperature stabilization measures, we observe that the maximum power fluctuation and maximum wavelength shift are within 0.21 dB and 0.02 nm (Figs. 4 and 7), respectively, indicating the good stability of the system.

**Conclusions** In this study, two novel OPI-MWBRFLs are proposed and implemented based on the axial polarization pulling effect of the SBS in PMFs. First, we analyze and discuss the polarization-mode operating region of the PMF-BRFL system and the corresponding operating conditions. Second, two experimental systems that can output polarization multi-wavelength light are realized using different random laser cavities, and the polarization extinction ratio is higher than 33 dB. Finally, the polarization orthogonality of these systems is guaranteed by the natural nonlinear axial polarization pulling effect of the SBS in the PMFs, rather than by the artificial precise polarization control of the systems; thus, the two OPI-MWBRFLs exhibit excellent working stability in experiments in the absence of mechanical or temperature control. The results of these experiments are highly consistent with expectations and have broad application prospects in the fields of optical fiber sensing, DWDM optical fiber communication, and spectral detection.

**Key words** lasers; orthogonal polarization interleaving; polarization maintaining fiber; nonlinear polarization traction; stimulated Brillouin scattering