

异质光纤环腔中双向双波长布里渊激光及其陀螺效应论证

李宏亮 张 巍 黄翊东 彭江得

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 利用基于非对称的马赫-曾德尔干涉仪(UMZI)的异质光纤环腔实现了双向双波长多模布里渊激光, 激光光与抽运光拍频的中心频率分别约为 10.49 GHz 和 10.54 GHz。实验测量了该结构在不同转速下双向斯托克斯光拍频中纵模的频移量。实验结果表明, 频移量随转速线性变化, 在实验测量范围内没有观察到闭锁效应, 且根据环腔转动时拍频信号频率相对于环腔静止时拍频的频移可以明确判断环腔转动方向, 提供了一种实现布里渊光纤陀螺(BFOG)的新思路。实验测得陀螺效应标度为 $1.0305 \text{ kHz}/(^{\circ}\cdot\text{s}^{-1})$, 与理论分析吻合较好。

关键词 激光器; 光纤陀螺; 异质光纤环; 受激布里渊散射; 闭锁效应

中图分类号 V241.5⁺58 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0705008

Bi-directional Dual-wavelength Brillouin Lasing in Hybrid Fiber Ring Cavity and Demonstration of Its Gyroscope Effect

Li Hongliang Zhang Wei Huang Yidong Peng Jiange

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Bi-directional dual-wavelength multi-mode Brillouin lasing based on the unbalanced Mach-Zehnder interferometer (UMZI) hybrid fiber ring cavity is realized experimentally with frequencies of heterodyne spectrum between pump and Stokes lights being 10.49 GHz and 10.54 GHz, respectively. Frequency shift of bi-directional Stokes light's beat spectrum is measured, and results show that the frequency shift linearly increases with the increase of rotating speed of cavity. The lock-in effect is not observed in the range of measurement, and rotating direction of cavity can be clearly distinguished through relative frequency shift. This provides a novel way for designing Brillouin fiber-optic gyroscope (BFOG). The measured scale factor of gyroscope is $1.0305 \text{ kHz}/(^{\circ}\cdot\text{s}^{-1})$, which fits well with the result of theoretical analysis.

Key words lasers; fiber-optic gyroscope; hybrid fiber ring cavity; stimulated Brillouin scattering; lock-in effect

OCIS codes 290.5830; 140.3510; 060.2800

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)是光纤中的一种光学非线性过程^[1], 利用该效应可实现光纤激光器、分布式光纤传感、微波信号产生等^[2~4]。其中布里渊光纤陀螺(BFOG)因其独特的特性而受到广泛的关注^[5~9]。BFOG的概念在20世纪80年代初被提

出^[10], 它利用光纤环形谐振腔中的SBS效应, 抽运激光通过环形谐振腔的两端分别注入腔内, 当抽运光的功率达到阈值后, 便形成两束与抽运光传播方向相反的斯托克斯光。当环腔静止时, 两束斯托克斯光的频率相同; 当环腔以一定角速度旋转时, 由于环腔中的萨格纳克效应, 两束斯托克斯光之间将产

收稿日期: 2011-02-18; 收到修改稿日期: 2011-03-23

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327600)、国家自然科学基金(60777032)和北京市自然科学基金(4102028)资助课题。

作者简介: 李宏亮(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器及光纤陀螺等方面的研究。

E-mail: lhl08@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 张 巍(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微纳结构光电功能材料和器件等方面的研究。

E-mail: zwei@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

生正比于转速的频率差 $\Delta\nu$ 。通过探测不同转速下双向斯托克斯光拍频变化,即可实现角速度的探测。

BFOG 具有结构简单、体积小、重量轻、功耗小、检测精度高、线性度好和动态范围大等优点,其输出直接提供频率偏置信号,大大简化了信号处理系统^[11]。然而,由于其本身存在的诸多技术问题,BFOG 至今未进入实用化阶段。其中的两个核心问题是 BFOG 的闭锁效应和转向判别。所谓闭锁效应,是指当光纤环腔的转速低于一定值时,环腔中的两束斯托克斯光的谐振频率将趋于一致,使拍频锁定为零的现象。转向判别问题是指由于零转速下频率偏置点为零,不同的转动方向在输出激光信号拍频上无法区分。目前已提出了多种解决以上两个问题的方案,包括:1)采用声光调制器将双路抽运光移频,提供频率偏置^[12];2)采用两个不同波长的激光器作为环腔的双路抽运^[13];3)采用推拉式相位调制^[14];4)利用光纤谐振腔的克尔效应^[15]和加入机械抖动^[16]。其中前两种方案中声光调制器和两个激光器输出波长的稳定性大大制约着陀螺的性能;后两种方案中,附加的调制会在环腔内引入干扰,最终影响激光输出的稳定,利用克尔效应对锁区范围的控制也难以精确。几种方案都增加了系统的复杂性。

为此,本课题组提出了一种异质光纤环形腔结构。先期工作表明它可以通过改变环腔中的布里渊增益介质特性实现双向双波长布里渊激光^[17]。本文在此基础上研究了该布里渊光纤激光器(BFL)的陀螺效应,实验结果表明这一结构为两方向的输出斯托克斯光引入了本征的频率偏置,提供了一种解决 BFOG 闭锁效应和转向判别问题的新思路。

2 异质光纤环腔双向双波长 BFL 的实验实现

2.1 异质光纤环腔

异质光纤环腔的结构如图 1 所示,它由异质光纤环和环腔耦合装置构成。异质光纤环由两段在相同抽运波长下具有不同布里渊频移和布里渊增益系数的光纤熔接形成。由于两段光纤的布里渊增益是独立的,因此异质光纤环可以作为具有布里渊增益双峰的特殊增介质,其布里渊增益谱将是两段光纤各自增益谱的叠加。合理搭配具有不同布里渊频移的光纤种类及长度,还可以灵活调节双峰布里渊谱中两增益峰的频差及增益大小,满足不同的双向双波长 BFL 的需求。

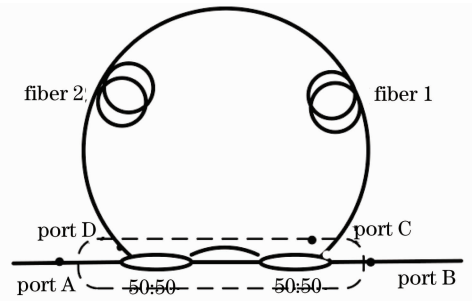


图 1 异质光纤环腔

Fig. 1 Hybrid fiber ring cavity

实验中的环腔耦合装置采用了非平衡马赫-曾德尔干涉仪(UMZI)结构^[18]。理想 UMZI 由两个耦合比为 50:50 的 2×2 光纤耦合器构成,如图 1 中的虚线框所示,共有 4 个输入/输出端口(port A~D)。连接两耦合器两臂的光纤长度差为 ΔL 。假设抽运光从 A 端口进入 UMZI,则在 B、C 两端口的输出谱可表示为

$$\begin{aligned} T_{A-B} &= \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{n\Delta L}{c} f\right) \right] \\ T_{A-C} &= \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(2\pi \frac{n\Delta L}{c} f\right) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

式中 c 为真空中光速, n 为 SiO_2 折射率, f 为抽运光频率。可以看到,UMZI 的透射谱是 f 的函数。通过调整合适的 ΔL ,可以使透射谱的半周期(即透射峰与相邻透射谷之间的频差)与异质光纤环的布里渊频移相近。若将 UMZI 的 C 和 D 端口通过异质光纤环相连,调谐从 A 端口进入 UMZI 的抽运光频率,使之对准透射谱中某一个透射峰,则在理想情况下,抽运光将 100% 从 C 端口进入异质环,并在通过 D 端口后 100% 由 B 端口输出。而对于光纤环中产生的反向斯托克斯光,由于其频率与 UMZI 透射谱的透射谷中心接近,大部分斯托克斯光将经由 C 端口进入 UMZI,并经过干涉臂,由 D 端口重新进入异质光纤环腔,少部分斯托克斯光经过干涉臂经由 A 端口输出。因此,UMZI 作为一种具有频率选择性的耦合装置,其作用是使抽运光只在环腔内往复一周,同时对于斯托克斯光,UMZI 等效于一个具有高分光比的耦合器,斯托克斯光在异质光纤环中循环放大谐振。

在实验中,异质光纤环采用抽运波长 $1.55 \mu\text{m}$ 下布里渊频移分别为 10.54 GHz 和 10.49 GHz 的两种 Truewave 光纤(TWF)构成,二者增益系数相近,两段光纤的长度都约为 80 m。环腔耦合装置采用两个耦合比分别为 50:50 和 49.5:50.5 的耦合

器构成 UMZI, 两耦合臂长度差 ΔL 为 9.1 mm, 相应的透射谱半周期为 11.63 GHz。

2.2 实验系统

异质环腔双向双波长 BFL 的实验系统如图 2 所示。抽运光源采用波长可调谐分布反馈(DFB)半导体激光器(NEC NX8570SC541Q), 3 dB 线宽约 4.5 MHz, 输出功率和波长分别由 Newport 电流驱动控制器(model505)和温度控制器(model325)调节。其输出光经过 80:20 耦合器分为两路。80% 一路经过掺铒光纤放大器(EDFA)进行功率放大, 并经由环形器进入 50:50 耦合器, 分束后分别从异质光纤环腔的 A 端口(port A)和 B 端口(port B)输入形成双向抽运。由 SBS 产生的两束反向斯托克斯光在腔内循环谐振后分别由 A 端口和 B 端口输出, 经由耦合器返回环形器 3 端口。在两路抽运光路中, 分别加入偏振控制器 1 和 2(PC1 和 PC2), 对两路抽运光的偏振态进行调控, 以使进入环腔的抽运光的注入效率达到最大。另一路 20% 的抽运光通过偏振控制器 3(PC3), 与环形器 3 端口输出的斯托克斯光在 50:50 耦合器中合波后差拍, 拍频信号经过可调衰减器(VOA)后, 由带宽为 50 GHz 的光电探测器(PD, u²t Photonics XPDV2120R)探测, 在电频谱仪(HP Spectrum Analyzer 8593E)上进行观察。为了减少外部环境温度及机械振动对异质光纤环腔的影响, 环腔部分被置于隔热海绵中, 并将其整体放置于隔音材料盒内密封。通过以上封装措施, 可较好地消除温度和振动对环腔的扰动, 提高实验系统的稳定性。

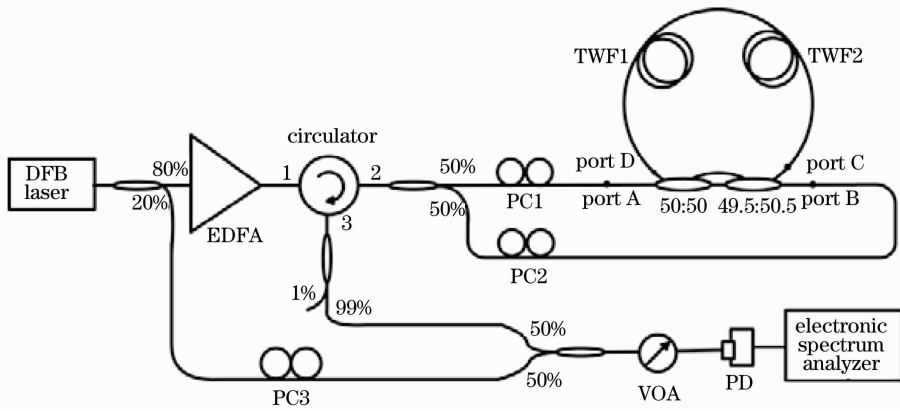


图 2 异质光纤环腔双向双波长 BFL 实验系统

Fig. 2 Experimental setup of bi-directional dual-wavelength BFL with hybrid fiber ring cavity

2.3 异质光纤环腔 BFL 的双向双波长激射

为了研究双向抽运 BFL 的激射状态, 实验中分别测试了抽运光由异质环腔两输入端口分别沿顺时针和逆时针方向单向注入时, 环腔的单向激射状态。

利用光功率计测试环形器 3 端口输出的斯托克斯光功率, 可以分别得到沿两个方向抽运时斯托克斯光功率随抽运光功率的变化曲线。图 3(a) 为抽运光沿逆时针(CCW)方向注入异质环腔 A 端口时, 斯托克斯

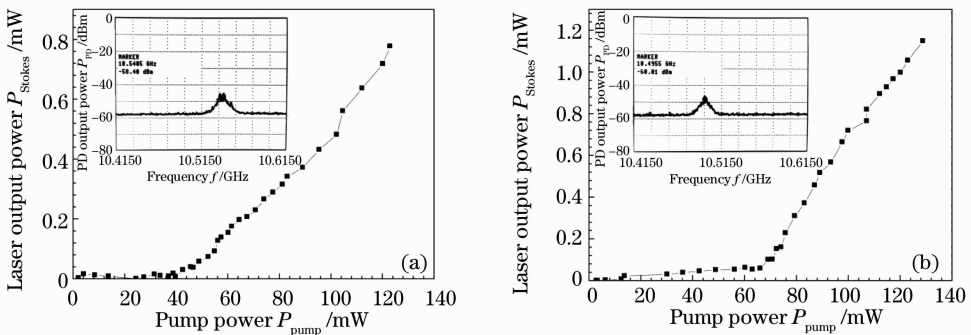


图 3 异质光纤环腔单向抽运阈值曲线。(a)逆时针方向抽运时, 输出斯托克斯光功率随抽运光功率的变化曲线及差拍频谱, (b)顺时针方向抽运时, 输出斯托克斯光功率随抽运光功率的变化曲线及差拍频谱

Fig. 3 Lasing threshold of single directional pump on hybrid fiber ring cavity. (a) Output Stokes wave power with increasing pump power along CCW direction and measured heterodyne spectrum of lasing Stokes waves; (b) output Stokes wave power with increasing pump power along CW direction and measured heterodyne spectrum of lasing Stokes waves

光的阈值曲线及其与抽运光的差拍频谱。图 3(b)为抽运光沿顺时针(CW)方向注入异质环腔 B 端口时,斯托克斯光的阈值曲线及其与抽运光的差拍频谱。可以看到,两段曲线都有一个明显的阈值,分别约为 40 mW 和 65 mW。当抽运功率高于这两个阈值时,斯托克斯光功率随抽运功率的增加而迅速线性增加,表现出明显的激射特性。差拍频谱显示激射中心频率分别约为 10.54 GHz 和 10.49 GHz,对应着 1.55 μm 抽运波长附近 TWF1 和 TWF2 的布里渊频移。实验表明,注入环腔的两路抽运光分别使其率先经过的一段光纤单独激射,这是利用异质光纤环中的增益竞争现象^[14],通过控制双向抽运功率实

现的。

图 4(a)是在 EDFA 输出总抽运功率为 20.4 dBm 时,抽运光沿顺时针和逆时针双向注入异质环腔后,双向激射产生的斯托克斯光与抽运光之间的差拍频谱,可以看到在频率为 10.54 GHz 和 10.49 GHz 处,有两个不同的激射峰,实验上实现了双向双波长布里渊激光。图 4(b)是双向激射产生的两束反向斯托克斯光之间的差拍频谱,拍频信号出现在 50 MHz 附近,与异质环中两段光纤的布里渊频移之差相吻合。双向激射为多纵模输出,拍频信号具有明显的纵模结构。纵模间隔约为 1.25 MHz,与 160 m 的异质环腔长对应。

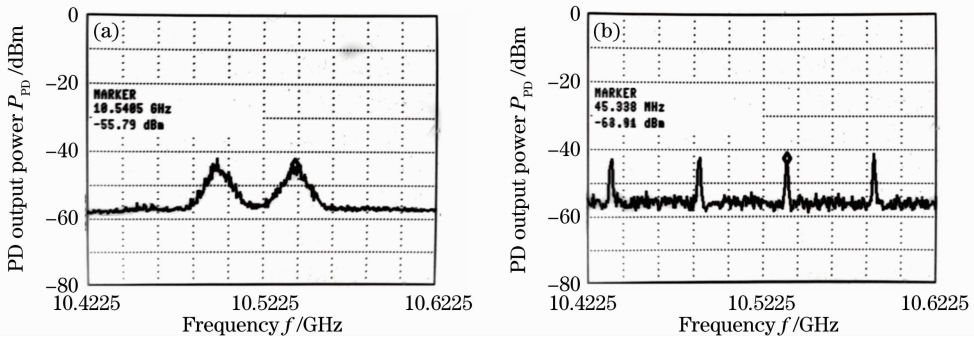


图 4 异质环腔 BFL 双向激射的实验结果。(a)双向斯托克斯光与抽运光的差拍频谱, (b)双向斯托克斯光之间的拍频信号谱

Fig. 4 Experimental results for bi-directional lasing of BFL with hybrid fiber ring cavity. (a) Measured heterodyne spectrum between pump light and Stokes waves; (b) beating spectrum of two Stokes waves in opposite directions

3 异质光纤环腔双向双波长 BFL 中陀螺效应的实验论证

3.1 实验结果

在光纤激光陀螺中,假设环腔总长度为 L ,按照直径为 D 、面积为 S 的单环盘绕为 N 匝,两束工作激光频差 $\Delta\nu$ 与环腔转速 Ω 的关系可表示为^[19]

$$\Delta\nu = \frac{4NS}{\lambda n L} \Omega = \frac{D}{\lambda n} \Omega, \quad (2)$$

式中 λ 为激光波长, n 为光纤介质的等效折射率。由 (2) 式可见,激光陀螺中两束激光的频差与光纤环的旋转角速度成正比,标度因数由光纤环的本征参数决定。异质光纤环腔双向双波长 BFL 输出的双向斯托克斯光的拍频信号具有本征的频率偏置,在异质光纤环腔转动情况下由 (2) 式决定的频差直接加载在此频率偏置上。一方面较大的频率偏置在原理上可以避免闭锁效应,另一方面不同的转向将对应不同的拍频信号频率变化方向,从而可以解决转向判别的问题。

实验中,光纤环直径 $D \approx 13$ cm,激光中心波长 $\lambda \approx 1.552$ μm , 1.55 μm 处 SiO_2 的折射率 $n \approx 1.444$,理论预计陀螺效应标度因数为 1.01 $\text{kHz}/(\text{°} \cdot \text{s}^{-1})$ 。异质光纤环腔部分被放置于简易的旋转平台上模拟陀螺转动。简易旋转平台的主体由直流电机和固定于其转子上的小型光学平板构成,平台旋转方向和转速可通过改变加载于电机上的直流电压的极性和电压大小进行控制。为了避免电机在不同驱动电压下转速的不均匀性,在测试陀螺效应前,对电机在顺、逆时针两方向不同电压下的转速分别进行了标定。

实验测量了异质光纤环腔 BFL 输出的双向斯托克斯光的拍频信号在不同转速下的频移量。首先使 BFL 稳定工作在双向激射状态,通过调节抽运光路中的偏振控制器,使抽运注入效率达到最大,相应的斯托克斯光功率也达到最大。此时通过电频谱仪选择双向激射拍频多纵模结构中的某一个纵模,记录该纵模在环腔转动下的频移变化。为保证测量条件的一致,测试中需根据输出状态的变化,随时调整抽运光的偏振态,保证双向激射始终处于功率最大状态。

图5是实验结果。对应于两个旋转方向,分别在10组不同的转速下,测量了静止情况下频率约为45 MHz的某一纵模拍频信号的频移变化。可以看到,斯托克斯光拍频的纵模频移随环腔转速线性增加,实验数据线性拟合得到的陀螺效应标度因数为 $1.0305 \text{ kHz}/(^{\circ}\cdot\text{s}^{-1})$,与理论分析吻合很好。同时,根据环腔转动时拍频信号频率相对于环腔静止时拍频的频移,可以明确判断环腔转动方向。受限于简易转台所用电机的额定最低转速及多纵模输出情况下依靠频谱仪对频移测量的实验方法局限,实验中测试的最低转速为 $3^{\circ}/\text{s}$,可分辨的最小频移变化约为3 kHz,在实验可测量范围内,没有观察到闭锁效应。

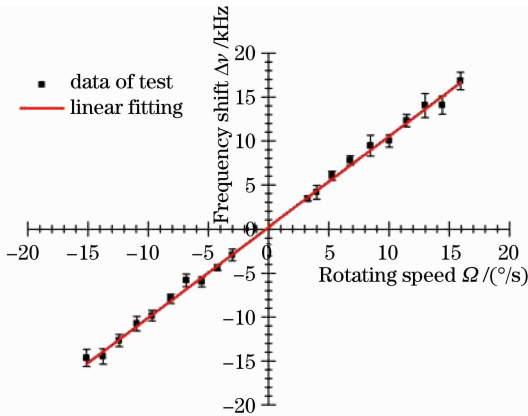


图5 异质环腔双向双波长 BFL 陀螺效应的转速频移标定曲线

Fig. 5 Frequency shift of single mode of beating spectrum between bi-directional Stokes waves under different rotating speeds of BFOG with hybrid fiber ring cavity

3.2 陀螺效应测试结果的讨论

异质环腔双向双波长 BFL 激光实验及其陀螺效应的论证表明,异质光纤环腔可以实现双向双波长布里渊激光,基于该结构的 BFOG 在消除闭锁效应和转向判别方面具有潜在优势。目前实验的局限在于:异质光纤环腔 BFL 产生的双向斯托克斯光均为多纵模输出,由于多纵模之间存在模分配噪声,各纵模的强度存在抖动,造成纵模拍频信号的不稳定和展宽,恶化陀螺性能。另外,抽运激光器的波长漂移、异质环腔光纤器件随温度的慢漂也对实验测量的精度造成一定影响。

提升异质环腔 BFOG 工作性能的关键是实现 BFL 双向双频稳定单模输出。预期可以通过以下几方面的改进实现该目标:1)缩短腔长至 30 m 左右,使腔纵模间隔等于或小于布里渊增益带宽;2)采用更窄线宽的激光器作抽运光源;3)在环腔中加入

相位调制器,通过主动反馈控制系统动态调节腔长,使布里渊增益中心始终锁定某一单纵模。

4 结 论

提出利用异质光纤环腔结构实现双向双波长布里渊激光,为 BFL 双方向输出光引入本征的频率偏置,从而解决 BFOG 闭锁效应和转向判别问题。实验中利用基于 UMZI 的异质光纤环腔实现了双向双波长多模布里渊激光,并实验测量了该结构在不同转速下双向斯托克斯光拍频中纵模的频移量。实验表明,频移量随转速线性变化,实验测得其陀螺效应标度为 $1.0305 \text{ kHz}/(^{\circ}\cdot\text{s}^{-1})$,与理论分析很好地吻合。在实验可测量范围内,没有观察到闭锁效应,且根据环腔转动时拍频信号频率相对于环腔静止时拍频的频移可以明确判断环腔转动方向。

参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics[M]. Boston: Elsevier/Academic Press, 2007. 329~362
- 2 Chen Hongwei, Wang Xiaolin, Yang Chunbo *et al.*. 4.5 W all-fiber narrow-linewidth two-tone fiber laser based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2477~2481
- 3 谌鸿伟, 王小林, 杨春波 等. 基于受激布里渊散射效应的 4.5 W 全光纤窄线宽双波长激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2477~2481
- 3 Hong Xiaobin, Guo Hongxiang, Wu Jian. A Brillouin optical time domain analysis based distributed fiber optic intrusion sensor system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1037~1041
- 洪小斌, 郭宏翔, 伍 剑. 基于布里渊时域分析的分布式光纤传感入侵定位系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1037~1041
- 4 Shen Ying, Wang Rong, Pu Tao. A novel technique to generate high-frequency microwave signal based on high-order stimulated Brillouin scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1571~1575
- 沈 颖, 王 荣, 蒲 涛. 基于高阶受激布里渊散射的高频微波信号产生技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1571~1575
- 5 Y. Tanaka, S. Yamasaki, K. Hotate. Two-color Brillouin ring laser gyro with gyro-compassing capability[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18): 1492~1494
- 6 Y. Tanaka, S. Yamasaki, K. Hotate. Brillouin fiber-optic gyro with directional sensitivity[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(10): 1367~1369
- 7 Yan Fengping, Shan Ying, Jian Shuisheng. Study on polarization property in stimulated Brillouin scattering fiber optical gyros[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10): 913~917
- 延风平, 单 英, 简水生. 受激布里渊散射光纤陀螺中光偏振特性的研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10): 913~917
- 8 Wan Shengpeng, He Xingdao. Temperature effects in a Brillouin fiber-optic gyroscope [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 162~165
- 万生鹏, 何兴道. 温度对布里渊光纤陀螺的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 162~165
- 9 X. Y. Li, W. Hong, Z. He *et al.*. Frequency stabilization research of Brillouin fiber-optic gyroscope [C]. *IEEE ICIA*, 2010, 1544~1547
- 10 P. J. Thomas, H. M. van Driel, G. I. A. Stegeman.

Possibility of using an optical fiber Brillouin ring laser for inertial sensing[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(12): 1906~1908

11 Pei Jincheng, Yang Xichun, Zhu Rude *et al.*. Stimulated Brillouin optical fiber gyroscope [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(11): 53~60
裴金成, 杨熙春, 朱汝德 等. 受激布里渊光纤陀螺[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(11): 53~60

12 F. Zarinetchi, S. P. Smith, S. Ezekiel. Stimulated Brillouin fiber-optic laser gyroscope [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4): 229~231

13 S. P. Smith, F. Zarinetchi, S. Ezekiel. Narrow-linewidth stimulated Brillouin fiber laser and applications[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6): 393~395

14 S. Huang, P. A. Nicati, K. Toyama *et al.*. Synthetic heterodyne detection in a fiber-optic ring-laser gyro [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1): 81~83

15 K. Hotate, S. Yamashita. Grasp of the behavior of lock-in phenomenon and a manner to overcome it in Brillouin fiber optic gyro[C]. *SPIE*, 1998, **3541**: 57~65

16 F. Aronowitz. Single-isotope laser gyro[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(2): 405~412

17 Y. Huang, W. Zhang, X. Feng *et al.*. Bi-directional dual-wavelength Brillouin lasing in a hybrid fiber ring cavity[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(14): 2990~2994

18 J. C. Yong, L. Thevenaz, B. Y. Kim. Brillouin fiber laser pumped by a DFB laser diode[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(2): 546~554

19 H. C. Lefevre. Fiber Optical Gyro[M]. Zhang Guicai, Wang Wei Transl. Beijing: National Defence Industrial Press, 2004. 11~15
H. C. 勒弗雷. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才, 王 巍 译. 北京: 国防工业出版社, 2004. 11~15

9 路光纤激光相干合成实现 1.56 kW 高功率输出

高功率光纤激光相干合成是国际上激光技术领域的研究热点之一,最近,国防科技大学光电科学与工程学院新体系结构固态激光实验室成功实现了主动相位控制的 9 路百瓦级全光纤放大器的相干合成,输出功率达 1.56 kW。系统由自行研制的 9 路百瓦级全光纤放大器组成,单路光纤放大器采用三级级联放大技术,将 10 mW 的窄线宽种子光放大至百瓦级输出(窄线宽激光器由华南理工大学杨中民教授、徐善辉副研究员课题组提供)。在总抽运功率为 1900 W 时,9 路放大器的总输出功率为 1.56 kW,光光转换效率达 82.1%。采用自行提出的单频抖动法对各路光纤放大器进行主动相位控制,实现了 9 路光纤放大器锁相输出,闭环控制残差小于 $\lambda/15$,远场光斑对比度高达 85%。此前,美国空军实验室曾于 2009 年实现了 5 路百瓦级光纤放大器相干合成,输出功率为 725 W,本课题组曾于 2010 年实现了 9 路百瓦级光纤放大器相干合成,输出功率为 1082 W。实验中千瓦级高功率输出功率的相干合成效果与瓦量级低功率下相干合成效果基本一致。目前系统总输出功率仅受限于抽运功率,表明该技术具有进一步提升输出功率的能力。

致谢 感谢马阎星,韩凯,朱家健,杜文博,董小林,许将明在实验中的帮助。

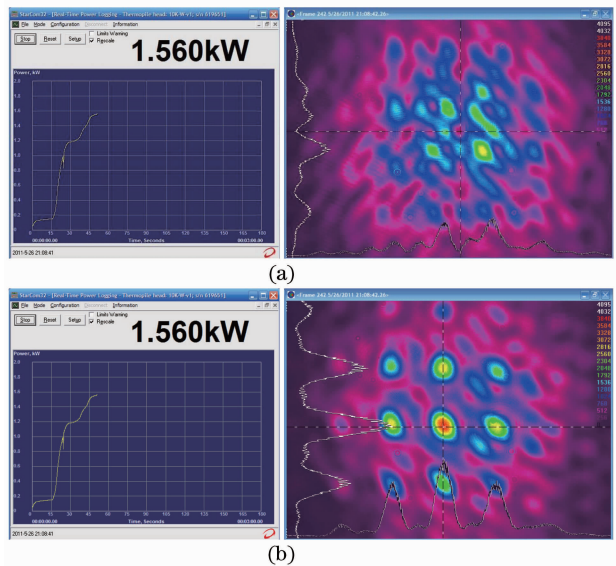


图 1 (a) 系统开环时输出功率与激光远场光斑; (b) 系统闭环时输出功率与激光远场光斑
Fig. 1 (a) Output power of the experimental system and the far field intensity pattern in the open loop; (b) output power and the far field intensity pattern in the close loop

刘泽金 王小林 周 朴* 冷进勇
肖 虎 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,
湖南长沙 410073)

* 通信联系人。E-mail: zhoupu203@163.com