

# 观测光纤分布式反馈激光器偏振态的新方法

张震伟 张彩霞 单恩梅 郑万福 刘晓航 徐 贲 董新永 李 裔

(中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 提出并实现了一种基于光纤中受激布里渊散射放大原理来测量光纤分布式反馈(DFB)激光器输出偏振模的新方法。利用连续可调谐激光器(TLS)与 DFB 激光器输出光的相互作用,得到 DFB 的两个输出偏振模式的绝对波长、相对波长间隔以及两偏振模式的相对强度。利用该方法研究了侧向应力对 DFB 激光器的影响,实现了单偏振单纵模的激光输出。与之前使用的法布里-珀罗(FP)标准具以及 FP 干涉仪或者自拍频技术的检测方法相比,该技术可获得更多偏振模式的信息且简单直观。

**关键词** 光纤光学;分布式反馈光纤激光器;受激布里渊散射;单偏振态

**中图分类号** O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s106002

## New Method for Measurement of Polarization States of Fiber Distributed Feedback Lasers

Zhang Zhenwei Zhang Caixia Shan Enmei Zheng Wanfu Liu Xiaohang  
Xu Ben Dong Xinyong Li Yi

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** A novel method for the measurement of the polarization states of fiber distributed feedback (DFB) laser is proposed, which is based on stimulated Brillouin scattering (SBS) amplification effect in optical fibers. Based on the interaction of the outputs of a tunable laser source (TLS) and a DFB laser, the absolute wavelengths of the double polarization states, the relative wavelength interval and respective light power of the laser are obtained. The influence of lateral pressure to the DFB laser is studied, and the single-polarization single-mode output is realized. Compared with the method using Fabry-Perot (FP) etalon, FP interferometer and heterodyning in previous studies, this method is easier to operate and can acquire more informations about the polarization states.

**Key words** fiber optics; distributed feedback fiber lasers; stimulated Brillouin scattering; single-polarization state

**OCIS codes** 060.2310; 060.3510; 060.3735

## 1 引 言

分布式反馈光纤激光器(DFB)利用刻写在掺杂光纤上的相移光纤布拉格光栅(PS-FBG)作为光纤激光器的谐振腔,而 PS-FBG 是使用紫外光在光纤上刻写而产生  $\pi$  相移的光栅,此类激光器的 PS-FBG 长度可以只有 2~3 cm,使得其纵模间隔较大,

因此可以实现稳定的单纵模输出<sup>[1-3]</sup>。但是由于光纤几何结构及密度分布不均匀导致其存在两个正交偏振态,使得激光器运行在两正交偏振模式输出状态<sup>[4-6]</sup>。单纵模双偏振态激光输出仍然具有两个波长,对于需要单偏振单纵模激光器的应用来说是不够的<sup>[7-10]</sup>。根据光纤布拉格光栅(FBG)对温度和

**收稿日期**: 2013-11-15; **收到修改稿日期**: 2014-01-16

**基金项目**: 国家自然科学基金(61007051)、钱江人才项目(QJD1302016)、浙江省安全生产科技计划项目(2013A1004)、浙江省高等学校中青年学科带头人学术攀登项目、浙江省大学生科研创新团队资助项目(2013R409050)

**作者简介**: 张震伟(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感、光电仪器及应用等方面的研究。

E-mail: zzww7894@gmail.com

**导师简介**: 李 裔(1977—),男,博士,研究员,主要从事分布式光纤传感、微纳光纤以及光电测量及应用等方面的研究。

E-mail: yli@cjl.u.edu.cn(通信联系人)

应力的敏感特性,可以施加外部扰动,比如侧向应力和扭转力等方法改变DFB激光器的谐振腔参数来实现单纵模单偏振稳定激光输出<sup>[11-12]</sup>。

光纤DFB激光器的偏振模式的波长间隔最大只有十几皮米,而目前常用的光谱仪的最小光谱分辨率只有约20 pm。为监测到这两个偏振模式只能借助于拍频或者法布里-珀罗(FP)干涉仪技术。当激光器的输出光进入FP标准具,如果存在两套干涉条纹就表明激光器处在双偏振模式,而如果其中一套条纹消失则表明是单偏振输出<sup>[13]</sup>。也可以使用扫描FP干涉仪来检测,在示波器上观察输出强度峰值的个数来确定是否为单偏振<sup>[14]</sup>。以上两种方式虽然可以判断激光器的输出是否为单偏振,但只能检测模式间的相对波长而不能确定具体波长值。此外在基于DFB激光器偏振输出的传感应用中<sup>[15]</sup>,利用外差拍频技术检测相对波长间隔,得不到每个偏振的强度,更不可能得到绝对波长值。

本文提出了一种基于光纤中受激布里渊散射放大效应,利用扫描激光器来探测DFB激光器偏振模式的新方法,并通过施加侧向应力的方法检测到了单偏振激光输出。测试结果中,不仅可以得到两偏振峰的强度变化,而且可以直接观察到偏振峰的绝对波长和相对波长间隔。

## 2 理 论

### 2.1 受激布里渊散射原理

布里渊散射可以使用抽运光、斯托克斯光和声学波的三波相互作用来描述,其中声学波是由于介质的折射率涨落产生的结果,也称之为布里渊频移。在一定长度的光纤中,如果存在相向传输的光束,而且两光束的频率差值等于此光纤的布里渊频移量,那么就会发生布里渊散射放大效应,此时频率较高的光作为抽运光通过声学波的散射作用将部分能量转移到作为斯托克斯光的频率较低光。光纤中的受激布里渊散射(SBS)有两种形式:1)只有抽运光来自于外部输入,而斯托克斯光和声学波都来自于相互作用区噪声,称为SBS生成相互作用;2)抽运光与斯托克光都来自于外部输入,当抽运光和斯托克斯光之间的频率差值近似等于相互作用介质的布里渊频移值时将发生强耦合效应,称为SBS放大相互作用<sup>[16]</sup>。本文使用的是SBS放大相互作用。

受激布里渊散射放大过程中的强度关系可使用三波作用方程来描述。在稳态近似条件下,简化为抽运光和斯托克斯光的强度微分方程,假定抽运光

的光强为 $I_p$ ,斯托克斯光的光强为 $I_s$ ,此方程表示为<sup>[17]</sup>

$$\frac{dI_p}{dz} = -\alpha I_p - g_B I_s I_p, \quad (1)$$

$$\frac{dI_s}{dz} = \alpha I_s - g_B I_p I_s, \quad (2)$$

式中 $\alpha$ 为光纤的衰减因子, $g_B$ 为布里渊增益系数。通过求解(1)式和(2)式,可以得到抽运光强 $I_p$ 和斯托克斯光强 $I_s$ 之间的对应关系,如果抽运光强确定不变,斯托克斯光强变化将产生相应强度的布里渊散射峰。另外,由于SBS放大效应遵循动量守恒定律,可得

$$\nu_s = \nu_p - \Omega, \quad (3)$$

式中 $\nu_s$ 和 $\nu_p$ 分别为斯托克斯光和抽运光的角频率, $\Omega$ 是声学波的角频率。布里渊频移量与光纤的介质材料特性以及所处环境的温度和应力有关,在确定的条件下布里渊频移量保持恒定。经过实验测量可知,所使用的光纤的布里渊散射频移值为10.45 GHz,在1550 nm波长处相当于83 pm,即声学波频率为固定值。如果可以确定相互作用过程中抽运光的波长(或者频率),则可以通过(3)式得到斯托克斯光的波长。

### 2.2 受激布里渊散射放大的检测原理

实验过程中,抽运光源为连续可调谐激光器(TLS),斯托克斯光为需要探测的DFB激光器的输出光<sup>[18]</sup>。TLS在目标波段连续扫描,在与激光器的输出波长相对应的波长位置处发生SBS效应,进行能量转移;当与激光器输出不符合SBS相互作用条件时不会有SBS效应发生,不会发生能量转移,光强各自保持恒定。通过测量抽运光或者斯托克斯光的输出强度变化就可以得到布里渊散射峰,并根据布里渊散射所在位置处的TLS输出波长就可以得到DFB激光器输出偏振模式的绝对波长值和两偏振模式之间的相对波长间隔。光纤中的布里渊增益谱宽很窄,在标准单模光纤(SMF)中约为30 MHz。根据瑞利判据,在1550 nm波长处相当于有0.24 pm的波长分辨率。此分辨率值远高于通用的基于衍射光栅光谱仪的分辨率,可以清晰分辨出两偏振模式。相对于使用FP标准具及扫描FP干涉仪或者基于两偏振峰拍频技术<sup>[19-20]</sup>,此方法能通过单次测量获得两偏振模式的绝对波长、波长间距和相对强度等详细信息。

单模光纤中的SBS相互作用的强度受到光纤双折射率的影响<sup>[21]</sup>。但是,由于其双折射率只有大

约  $10^{-7}$  量级,导致光纤中偏振态在在几米长度就变化  $2\pi$ ,因此在本文所使用的折射率为  $10^3$  量级的标准单模光纤上,SBS 相互作用光的偏振态随机分布并最终达到平均效果,从而使得测试结果稳定。

### 3 实验及分析

本文所使用的 DFB 激光器由使用 194 nm 紫外氩离子激光器刻写在 24 mm 长度的铥铒共掺单包层单模光纤上的 PS-FBG 组成,相移点大致在光栅的中心位置处。PS-FBG 测试结果如图 1 所示,从图中可知相移光栅的相移量不是严格的  $\pi$  值,且相位位置两侧的光栅反射率不一致。

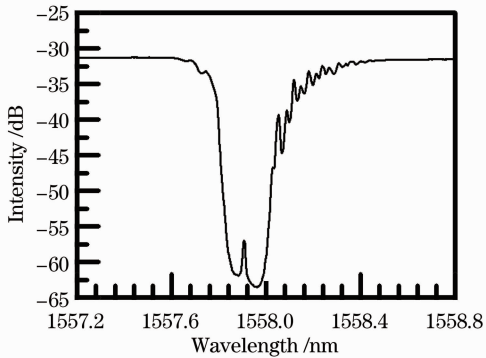


图 1 刻写在铥铒共掺单包层光纤之上的相移光纤布拉格光栅的透射频谱

Fig. 1 Transmission spectrum of PS-FBG inscribed on Yb/Er co-doped single-coating fiber

测量 DFB 激光器输出的实验装置示意图如图 2 所示,980 nm 波长的抽运激光器的输出光通过波分复用器(WDM)来抽运 DFB 激光器,激光器的出射

光经过 WDM 通过隔离器(ISO)进入作为 SBS 相互作用介质的 SMF 中。而 TLS 的输出光通过环形器(CO)从 SMF 的另一端输入,并在环形器的输出端口放置光电探测器(PD)来接收 DFB 激光器输出光及发生 SBS 效应时的背向散射光,并使用计算机(PC)来采集 PD 的输出信号。最后,在计算机上处理并显示所采集的信号。所使用的 SMF 长度为 1 km,在此作为受激布里渊散射的介质。测量过程中 PC 控制 TLS 按照所设定的参数扫描,并同步采集 PD 输出的电信号。根据 TLS 的扫描速率和扫描起始波长可以得到所采集的光强信号所对应的 TLS 波长值。没有 SBS 效应发生时,PD 探测到的是 DFB 激光器的输出光强,并随着波长扫描而保持不变,当符合 SBS 条件时,背向散射的斯托克斯光使得 PD 所接收到的信号增大,出现斯托克斯峰。而且斯托克斯峰的强度受到相互作用光强度的影响,而 TLS 输出光强度保持不变,所以斯托克斯峰的强度与偏振模式的强度呈比例关系。接下来,将通过 DFB 激光器施加侧向应力的方式实现单偏振单纵模输出。将 DFB 光纤放置在光滑铝板之上,并在间隔一段距离位置上平行放置相同外径的参考光纤;在两根光纤之上放置一片玻璃载玻片,并在载玻片上放置不同重量的砝码。需要强调的是,由于 DFB 激光器的两偏振峰输出对侧向应力施加方向存在依赖性,故使用光纤旋转器来固定光纤的旋转角度<sup>[22-23]</sup>,并调整优化侧向应力的方向与两偏振模式方向之间的夹角。图 2 的虚线框内为对 DFB 激光器施加侧向应力的示意图。

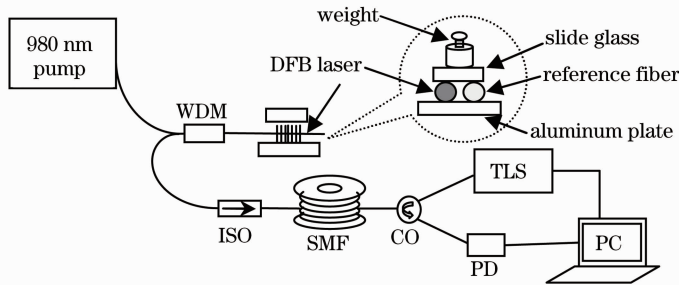


图 2 实验装置结构框图

Fig. 2 Block diagram of the experimental setup

通过放置不同质量的砝码所得到的 DFB 激光器的两偏振峰输出强度的变化情况如图 3 所示。图 3(a)为不放置砝码时 DFB 激光器两偏振输出模式的强度分布,可以观察到两偏振模式的强度相差较小,相对波长间隔为 13.3 pm,绝对波长分别为

1557.8318 nm 和 1557.8451 nm;图 3(b)为放置 20 g 砝码时激光器偏振模式输出的强度分布,两偏振模式强度差别较大,且位于 1557.8318 nm 波长处的模式强度非常小;图 3(c)为放置 50 g 砝码时激光器偏振峰的强度分布,可以清楚地看到波长较小

的偏振模式的强度随着所放置砝码重量的增加已经完全淹没在噪声信号中而无法分辨,此时的 DFB 激

光器处于单纵模单偏振输出状态。

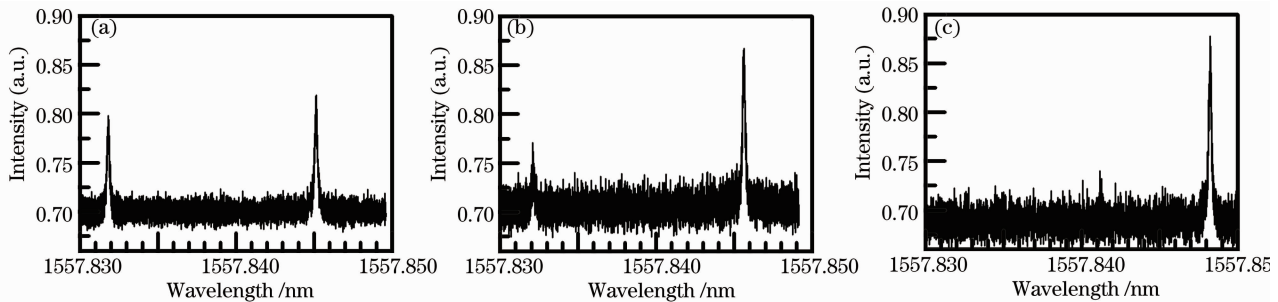


图3 施加不侧向应力时 DFB 激光器输出频谱。(a)无放置砝码时;(b)放置 20 g 砝码时;(c)放置 50 g 砝码时  
Fig.3 Spectra of DFB laser when different lateral pressures are loaded. (a) None weight is loaded; (b) 20 g weight is loaded; (c) 50 g weight is loaded

## 4 结 论

提出并实现了一种基于光纤中受激布里渊散射放大效应测量光纤 DFB 激光器输出光偏振特性的新方法,利用布里渊散射峰的窄线宽得到了约 0.24 pm 的光谱分辨能力,并测量了光纤 DFB 激光器两个偏振模式。利用该技术,通过对 DFB 光纤施加侧向压力成功实现了单偏振单纵模输出。

## 参 考 文 献

- Jiao Mingxing, Xing Junhong, Tong Congwei, *et al.*. Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602013.  
焦明星, 邢俊红, 同聪维, 等. 双波长单纵模掺铒光纤环形激光器设计及实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602013.
- Li Chao, Zhao Lei, Huang Zhihua, *et al.*. Simulation study on amplitude stability in nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0202007.  
李超, 赵磊, 黄志华, 等. 非线性偏振旋转锁模光纤激光器幅值稳定性模拟研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0202007.
- W H Loh, B N Samson, L Dong, *et al.*. High performance single frequency fiber grating-based erbium:ytterbium-codoped fiber lasers [J]. *J Lightwave Technol*, 1998, 16(1): 114-118.
- Ma Mingxiang, Hu Zhengliang, Xu Pan, *et al.*. Mode hopping detection for fiber laser based on dynamic phase changes in interferometer [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0602013.  
马明祥, 胡正良, 徐攀, 等. 基于干涉仪动态相移的光纤激光器跳模检测方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0602013.
- Ma Mingxiang, Yang Huayong, Xu Pan, *et al.*. Investigation on characteristics of mode hopping in ultra-narrow linewidth erbium-doped fiber ring laser under pump modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0314002.  
马明祥, 杨华勇, 徐攀, 等. 抽运调制条件下超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模特性研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0314002.
- Ronnekleiv Erlend, Zervas Michael, Kringlebotn Jon Thomas. Modeling of polarization-mode competition in fiber DFB lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, 34(9): 1559-1569.
- Cranch Geoffrey, Flockhart Gordon, Kirkendall Clay. Distributed feedback fiber laser strain sensors [J]. *IEEE Sensors*

- Journal, 2008, 8(7): 1161-1172.
- Yamashita Shinji, Cowle Gregory. Single-polarization operation of fiber distributed feedback (DFB) lasers by injection locking [J]. *J Lightwave Technol*, 1999, 17(3): 509-513.
- D Jiang, X Chen, Y Dai, *et al.*. A novel distributed feedback fiber laser based on equivalent phase shift [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(12): 2598-2600.
- J Sun, Y Dai, Y Zhang, *et al.*. Dual-wavelength DFB fiber laser based on unequalized phase shifts [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(23): 2493-2495.
- Xiong Jintian, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. Amplification properties of a distribution feedback semiconductor laser under optical injection and its application in generating microwave signals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0614002.  
熊锦添, 王荣, 蒲涛, 等. 光注入条件下分布反馈半导体激光器的放大特性研究及其在微波信号产生中的应用[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0614002.
- W Guan, J Marcianti. Single-polarisation single-frequency 2 cm ytterbium-doped fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(10): 558-559.
- C Spiegelberg, J Geng, Y Hu, *et al.*. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm [J]. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(1): 57-61.
- S Agger, J H Povlsen, P Varming. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(13): 1503-1505.
- Fan Wei, Yang Xiangtong, Li Xuehun, *et al.*. Stable single frequency and single polarization DFB fiber lasers operated at 1053 nm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(6): 1189-1192.
- Fan Wei, Chen Bai, Li Xuechun, *et al.*. Stress-induced single polarization DFB fiber lasers [J]. *Opt Commun*, 2002, 204(1): 157-161.
- R I Crickmore, M J Gunning, J Stefanov, *et al.*. Beat frequency measurement system for multiple dual polarization fiber DFB lasers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(1): 115-120.
- Govind P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics (4th Edition)* [M]. London: Academic Press, 2007. 329-334.
- Chen Liang, Bao X. Analytical and numerical solutions for steady state stimulated Brillouin scattering in a single-mode fiber [J]. *Opt Commun*, 1988, 152(3): 65-70.
- Domingo J M Subias, Pelayo J, Villuendas F, *et al.*. Very high resolution optical spectrometry by stimulated Brillouin scattering [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17(4): 855-857.
- T Horiguchi, M Tateda Brillouin, N Shibatagain, *et al.*

- Variation due to a polarization-state change of the pump or Stokes fields in standard single-mode fibers [J]. *Opt Lett*, 1998, 14(6): 329–331.
- 22 Guan Baiou, Jin Long, Zhang Yang, *et al.*. Polarimetric heterodyning fiber grating laser sensors [J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(8): 1097–1112.
- 23 Zhang Yang, Guan Baiou, Tam Hwayaw. Characteristics of the distributed Bragg reflector fiber laser sensor for lateral force measurement [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(18): 4619–4622.

栏目编辑：王晓琰