

文章编号: 0258-7025(2008)10-1522-06

# 基于 $3 \times 3$ 耦合器的光纤光栅激光传感系统 波长解调方案的改进

冯磊 肖浩 张松伟 何俊 李芳 刘育梁

(中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083)

**摘要** 采用  $3 \times 3$  耦合器的光纤光栅激光传感系统 (FBGLS) 的波长解调结果依赖于  $3 \times 3$  耦合器的物理特性, 解调结果会因  $3 \times 3$  耦合器三路输出的直流项、干涉条纹可见度和相位差参数的不稳定而发生一定程度的失真。理论推导给出了标定参数的方法并实现了计算机编程, 能够在较大信号时实时给出标定结果, 同时给出了相应的解调方案。计算机模拟发现采用上述方法消除了由  $3 \times 3$  耦合器三路输出的参数不稳定带来的谐波, 实验中解调结果的对比表明该方法带来一定程度的改善, 和标准参考传感器测量结果有很高的相关性, 此外基于该解调方案的光纤光栅激光传感系统具有较高的分辨率、动态范围和线性度。

**关键词** 光纤光学; 光纤光栅激光传感器;  $3 \times 3$  耦合器; 利萨如图形

**中图分类号** TN 253; TP 212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1522

## Improvement of Wavelength Interrogation for Fiber Bragg Grating Laser Sensor System Based on $3 \times 3$ Couplers

Feng Lei Xiao Hao Zhang Songwei He Jun Li Fang Liu Yuliang

(*Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100083, China*)

**Abstract** The wavelength demodulation of fiber Bragg grating laser sensor (FBGLS) system with  $3 \times 3$  couplers depend on the physical characteristics of the  $3 \times 3$  couplers. The demodulated results will distort to some extent due to the instability of the parameters in the three outputs of  $3 \times 3$  couplers including the direct current (DC) component, the fringe visibility of interferometer and the phase difference. A method of measuring the above parameters is given and applied in the computer programming so as to measure the parameters in real-time under large signals, at the same time corresponding demodulation method is also introduced. The computer simulation shows that with the proposed method the appearance of harmonics caused by the instability of the parameters in the three outputs of  $3 \times 3$  couplers is eliminated. The comparison of the experimentally demodulated results also shows that with the proposed method the harmonics have been reduced and the demodulated results have high correlation coefficients with the reference sensor. Besides, high resolution, dynamic range and linearity of the demodulated results are given in the experiment by using the proposed method.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating laser sensor;  $3 \times 3$  couplers; Lissajou figures

### 1 引言

光纤光栅激光传感器 (FBGLS) 是光纤传感器中的一种, 具有波长编码、抗干扰能力强、传感探头结构简单、尺寸小、测量结果有良好的重复性、便于构成各种光纤传感网络、适于规模生产等优点<sup>[1,2]</sup>。

FBGLS 通常采用波长解调方案, 包括相位载波法、外差法和  $3 \times 3$  耦合器解调方法等<sup>[3]</sup>。基于  $3 \times 3$  耦合器的波长解调方案在 20 世纪 80 年代已经提出<sup>[4]</sup>, 由于其解调结构简单、可实现数字化解调、运算量小等优点而被广泛应用。但这种解调方法依赖

收稿日期: 2007-11-16; 收到修改稿日期: 2008-02-29

作者简介: 冯磊 (1983—), 男, 山西人, 硕士研究生, 主要从事光纤传感系统信号解调方面的研究。

E-mail: fenglei@semi.ac.cn

导师简介: 李芳 (19—), 女, 山东人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光纤传感网络关键技术以及光纤激光器方面的研究。E-mail: lifang@semi.ac.cn

于3×3耦合器的特性:理想情况下输出三路分光比相等,相位相差120°。事实上由于3×3耦合器制作工艺的问题以及光在传播过程中带来的偏振衰落和光强损耗等,不能保证3×3耦合器三路输出的分光比相等和三路输出信号之间相位相差120°,由于最后的解调结果和3×3耦合器三路输出的光强以及相位差密切相关,所以在解调前标定出三路输出干涉光的参数(直流项、干涉条纹可见度和相位差)很重要。本文提出一种方法来计算3×3耦合器三路输出干涉光的参数,在大信号的情况下能够实时标定并给出相应的解调方法,从理论模拟和实验分析对所提方法进行评价。

## 2 3×3耦合器解调原理

FBGLS受外界影响反射光中心波长发生漂移,由干涉仪两臂臂长差而产生的光程差(小于相干长度)使进入干涉仪的反射光的波长漂移量转化为相位差的变化,可表示为<sup>[5]</sup>

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi n\Delta L}{\lambda^2}\Delta\lambda, \quad (1)$$

式中 $\lambda$ 为中心波长, $\Delta\lambda$ 为波长漂移量, $\Delta L$ 为光程差, $n$ 为折射率。

3×3耦合器三路输出的干涉光强为

$$I_1 = A_1 + B_1 \cos(s + \beta_1), \quad (2)$$

$$I_2 = A_2 + B_2 \cos(s + \beta_2), \quad (3)$$

$$I_3 = A_3 + B_3 \cos(s + \beta_3), \quad (4)$$

式中 $s = \Delta\varphi + \varphi_n$ , $\varphi_n$ 为外界环境影响带来的相位漂移, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为3×3耦合器带来的相位变化。若三路输出光的相位差正好是120°,即 $\beta_1 = 0^\circ, \beta_2 = 120^\circ, \beta_3 = -120^\circ$ ,并且 $A_m$ 和 $B_m$ 是同比例变化的, $m = 1, 2, 3$ ,可推导出表达式<sup>[6]</sup>

$$\tan(s) = \frac{\sqrt{3}\alpha_3 I_2 - \sqrt{3}\alpha_2 I_3}{\alpha_2 I_3 + \alpha_3 I_2 - 2\alpha_2 \alpha_3 I_1}, \quad (5)$$

式中 $\alpha_2 = \frac{A_2}{A_1} = \frac{B_2}{B_1}, \alpha_3 = \frac{A_3}{A_1} = \frac{B_3}{B_1}$ 。通过求解(5)式的反正切函数可得到 $s$ ,由于 $s$ 为大信号时存在多值问题,因此采用相位展开技术<sup>[7]</sup>即可还原被测信号。

对以上解调方法作如下假设:1)  $\frac{A_2}{A_1} = \frac{B_2}{B_1}, \frac{A_3}{A_1} = \frac{B_3}{B_1}$ ,且在测量中不会变化;2)三路输出的相位差恒为120°。实际上由于光源偏振态的不稳定,光在光纤传播中双折射效应产生偏振态的变化,光在光路中损耗(插入损耗、传播损耗等)<sup>[8]</sup>以及3×3耦合器本身的偏振相关特性导致干涉光条纹可见度的变

化<sup>[9]</sup>,因此3×3耦合器三路输出不能保证 $A_1 : A_2 : A_3 = 1 : 1 : 1, \frac{A_2}{A_1} = \frac{B_2}{B_1}, \frac{A_3}{A_1} = \frac{B_3}{B_1}$ ,以及三路输出相位差恒为120°<sup>[10]</sup>。

为了模拟参数变化对解调结果的影响,仿真了一个幅度为 $\pi$ rad,频率在300 Hz的余弦信号。这里假设直流项和干涉条纹可见度都不变而3×3耦合器三路输出的相位差在1%范围内变化,采用(5)式计算机模拟的解调结果如图1所示。

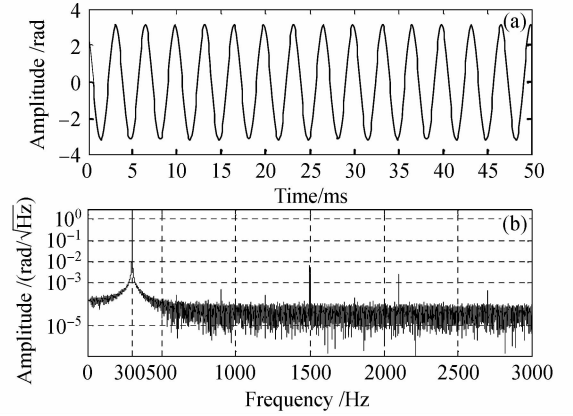


图1 (5)式模拟解调结果的时域(a)和频域(b)图

Fig. 1 Demodulated results of computer stimulation in time-domain (a) and frequency-domain (b) by using Eq. (5)

由图1可以看到在频域中由于相位差的不稳定使频谱图产生了谐波,当其他两项参数分别变化时也会带来同样的影响。从理论模拟可以知道采用(5)式的解调方法依赖于3×3耦合器的特性,为了防止解调结果失真在解调时应测出3×3耦合器三路输出的参数值。

## 3 改进的3×3耦合器解调方法

由(2)~(4)式可以推导出

$$\tan(s) = [(b_3 \cos \beta_3 - a_3 \cos \beta_1)(I_2 - a_2 I_1) - (b_2 \cos \beta_2 - a_2 \cos \beta_1)(I_3 - a_3 I_1)] \times [(a_2 \sin \beta_1 - b_2 \sin \beta_2)(I_3 - a_3 I_1) - (a_3 \sin \beta_1 - b_3 \sin \beta_3)(I_2 - a_2 I_1)]^{-1}, \quad (6)$$

式中 $a_2 = \frac{A_2}{A_1}, a_3 = \frac{A_3}{A_1}, b_2 = \frac{B_2}{B_1}, b_3 = \frac{B_3}{B_1}$ 。相对于(5)式,(6)式包含所有的参数。如果能够测出参数的值并代入(6)式就可以消去由于3×3耦合器的不稳定性带来的谐波。如果利用3×3耦合器三路输出任意两路作图不难发现在被测信号较大的情况下所作图形成椭圆形(利萨如图形<sup>[4,11]</sup>,如图2所示。这样通过拟合椭圆的表达式可以得到相应的参数值。

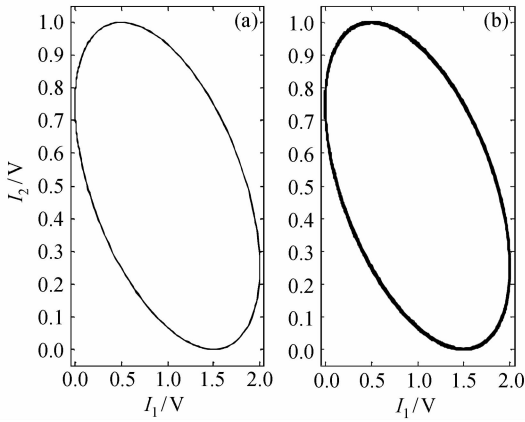


图 2 模拟的利萨如图形

Fig. 2 Lissajou figures obtained by computer simulation

如图 2, 此时余弦信号幅度为  $\pi$  rad, 频率为 300 Hz。(a)图参数不变,(b)图  $3 \times 3$  耦合器输出的相位差在 1% 范围内变化, 而直流项和干涉条纹可见度不变, 可以看出由于相位差不稳定(b)图的椭圆边缘明显变厚, 直流项或者干涉条纹可见度的不稳定也会引起相同的结果。通过对  $3 \times 3$  耦合器三路输出表达式进行数学分析可以知道  $3 \times 3$  耦合器任意两路都可以作为椭圆的参数方程。由

$$I_1 = A_1 + B_1 \cos(s), \quad (7)$$

$$I_2 = A_2 + B_2 \cos(s + \beta), \quad (8)$$

消去  $s$  后可得

$$I_1^2 - \frac{2B_1}{B_2} \cos(\beta) I_1 I_2 + \frac{B_1^2}{B_2^2} I_2^2 + \left[ \frac{2B_1}{B_2} A_2 \cos(\beta) - 2A_1 \right] I_1 + \left[ \frac{2B_1}{B_2} A_1 \cos(\beta) - \frac{2B_1^2}{B_2^2} A_2 \right] I_2 + A_1^2 + A_2^2 \frac{B_1}{B_2} - \frac{2B_1}{B_2} A_1 A_2 \cos(\beta) - B_1^2 \sin^2(\beta) = 0. \quad (9)$$

对比一般椭圆方程表达式

$$I_1^2 + AI_1 I_2 + BI_2^2 + CI_1 + DI_2 + E = 0, \quad (10)$$

可以得到  $A, B, C, D, E$  要求的表达式。对采集到的数据进行最小二乘法<sup>[12]</sup> 拟合可以得到 5 个参数的值, 从而可以得到表达式

$$A_1 = \frac{2BC - AD}{A^2 - 4B}, \quad (11)$$

$$A_2 = \frac{AC - 2D}{4B - A^2}, \quad (12)$$

$$B_1 = \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2 B + A_1 A_2 A - E}{1 - (A^2/4B)}}. \quad (13)$$

$$B_2 = \sqrt{B_1^2/B}, \quad (14)$$

$$\beta = \arccos(-AB_2/2B_1). \quad (15)$$

利用同样方法, 将  $3 \times 3$  耦合器三路输出的  $I_1$  和  $I_2$ ,  $I_2$  和  $I_3$  分别进行计算可以得到所有的直流项  $A_m$  ( $m = 1, 2, 3$ ), 干涉条纹可见度  $\kappa_m$  ( $B_m = \kappa_m A_m, m = 1, 2, 3$ ) 及相位差的值。

根据(6)式得到的计算机模拟解调结果由图 3 所示。对比图 3 和图 1 的频域图, 不难发现由于补偿了参数的变化(6)式得到的解调结果成功消去了谐波。

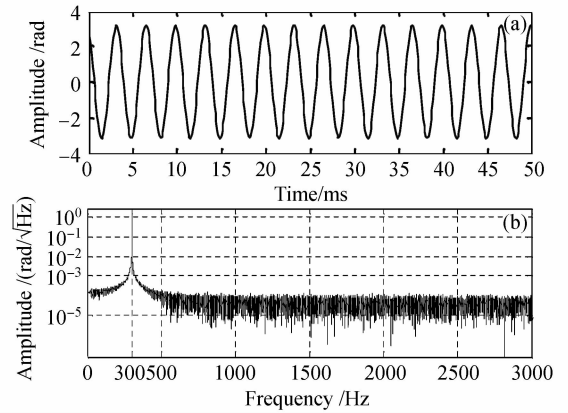
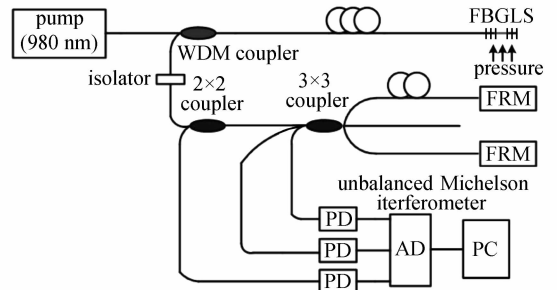


图 3 (6)式模拟解调结果的时域(a)和频域(b)图

Fig. 3 Demodulated results of computer simulation in time-domain (a) and frequency-domain (b) by using Eq. (6)

## 4 实验分析

图 4 所示为基于  $3 \times 3$  耦合器的光纤光栅激光传感系统结构图(WDM 为波分复用, FRM 为法拉第旋转镜)。实验时将 FBGLS 放入水池中, 同时在水池中放入压电陶瓷(PZT)水听器作为参考标准, 通过信号发生器给水池中的扬声器加信号, FBGLS 受声压的影响中心波长发生漂移, 进入臂长差为 1.5 m 的迈克尔孙干涉仪, 在  $3 \times 3$  耦合器中发生干涉后三路输出的干涉光由光电探测器(PD)进行光电转化并经 A/D 采集卡(采样频率为 100 kHz)进行模数转化, 得到的数字信号由计算机程序进行参

图 4 基于  $3 \times 3$  耦合器的光纤光栅激光传感系统图Fig. 4 Sensor system of FBGLS based on  $3 \times 3$  couplers in the experiment

数标定和解调处理。

实验中观测到的利萨如图形如图5所示(300 Hz情况下)。由图5可见椭圆边缘有厚度,说明参数随时间发生了变化。相应的图6和表1分别给出实验中测出的 $a_2, a_3, b_2, b_3, \beta_2, \beta_3$ 随时间变化的情况。可以看到参数在一定范围内变动,总体上呈缓慢变化的趋势。

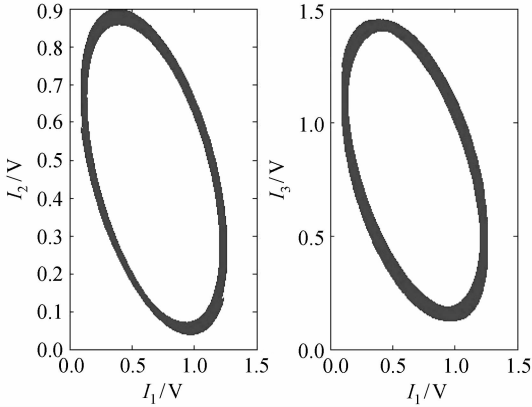


图5 实验所测得的利萨如图形

Fig. 5 Lissajou figures measured by experiments

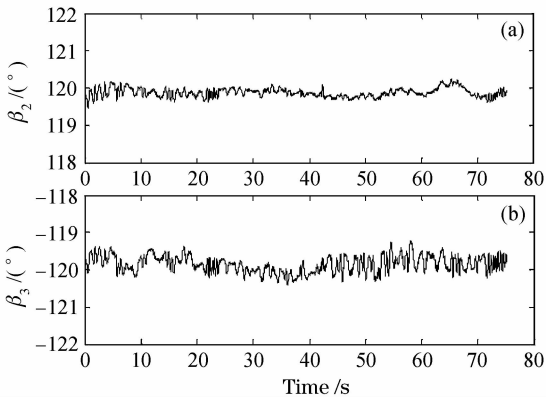


图6 参数 $\beta_2$ 和 $\beta_3$ 随时间的变化情况

Fig. 6 Variance of parameters  $\beta_2$  and  $\beta_3$

表1 近80 s范围内各参数的变化范围

Table 1 Variance range of the parameters in nearly 80 seconds

Parameter	$a_2$	$a_3$	$b_2$	$b_3$	$\beta_2$	$\beta_3$
Variance range / %	1.95	0.61	1.76	2.48	1.01	0.63

图7~9给出的是解调结果的对比,以PZT水听器作为参考标准,所加外界信号为300 Hz,幅度约为2 rad的余弦信号。通过对比可以发现用改进后的算法得到的解调结果谐波减小,一定程度上消除了由于参数变化给解调结果带来的影响;采用(6)式计算得到的解调结果与PZT解调结果的相关系数<sup>[13]</sup>达到99.91%。

实验再从传感系统的噪声水平(图10)、动态范

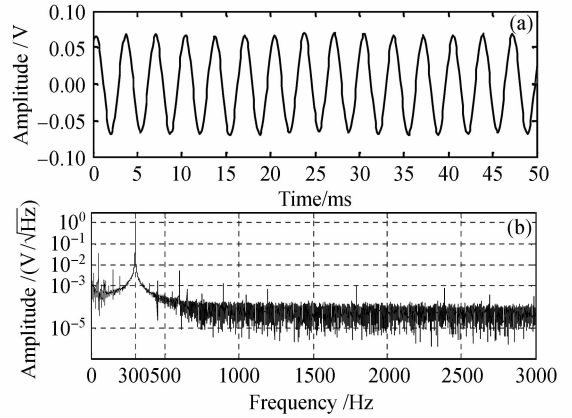


图7 PZT解调结果的时域(a)和频域(b)图

Fig. 7 Demodulated results of PZT in time-domain (a) and frequency-domain (b)

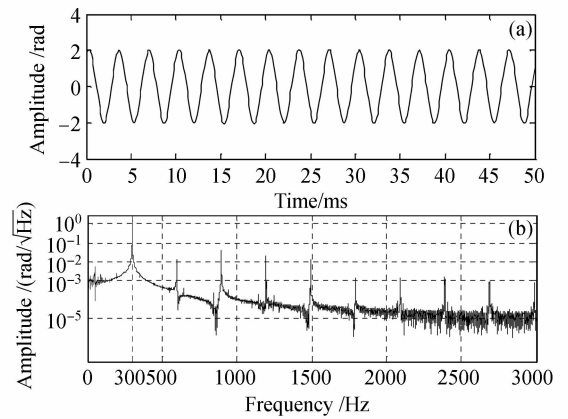


图8 实验中采用(5)式得到的解调结果。(a)时域; (b)频域

Fig. 8 Demodulated results of experiment in time-domain (a) and frequency-domain (b) by using Eq. (5)

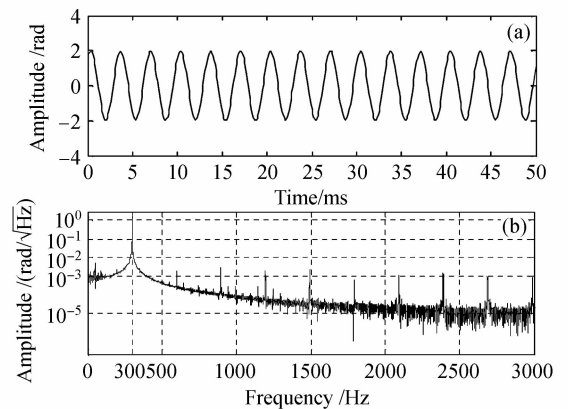


图9 实验中采用(6)式得到的解调结果。(a)时域; (b)频域

Fig. 9 Demodulated results of experiment in time-domain (a) and frequency-domain (b) by using Eq. (6) 围(图11)和线性度(表2)三个方面来衡量目前的3×3耦合器解调方案。由图10可知低频部分幅度

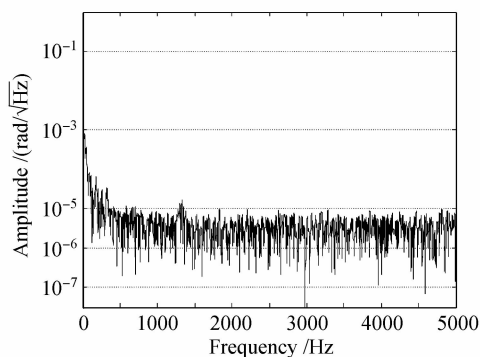


图 10 采用  $3 \times 3$  耦合器解调的光纤光栅激光传感系统的噪声水平

Fig. 10 Noise level of the sensor system based on FBGLS by using  $3 \times 3$  couplers in demodulation

较高是由于外界噪声引起的,从高频可以知道系统的噪声水平在2000 Hz时约为  $5 \times 10^{-6}$  rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。

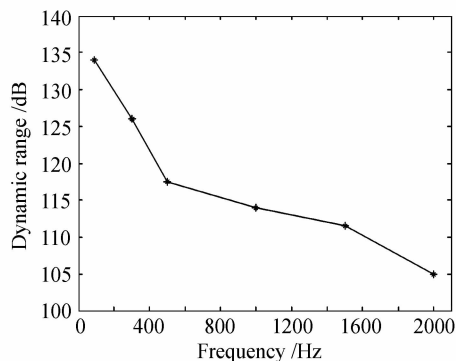


图 11 各种频率下的动态范围

Fig. 11 Dynamic range under several different frequencies

表 2 各种频率下解调结果的线性度

Table 2 Linearity of demodulated results under several different frequencies

Frequency /Hz	70	100	300	500	700	1000	1300	1500	2000
Linearity	0.9959	0.9976	0.9927	0.9998	0.9994	0.9974	0.9964	0.9983	0.9956

## 5 结 论

给出了测量  $3 \times 3$  耦合器三路输出信号相关参数的方法,该方法能够用计算机编程实现进而进行实时测量。分析了其对基于  $3 \times 3$  耦合器的光纤光栅激光传感系统波长解调结果的改进,可以看到对参数的测量跟踪在一定程度上可以减少信号频域的谐波。通过实验发现解调结果和标准参考水听器的解调结果相关性达到99.91%。不足之处在于目前计算参数的方法需要在较大信号情况下才能准确地测量,但由于光路中采用了法拉第旋转镜<sup>[4]</sup>减少了光的偏振带来的影响<sup>[9]</sup>,从而使参数变化范围很小,在实验前只需加大信号标定一次参数,同样具有很好的解调效果,加快了解调速度,有较高的分辨率和动态范围,线性度在0.99以上。

## 参 考 文 献

- Fan Shangchun. Technology and Application of Sensors [M]. First Edition. Beijing: Publishing House of Beihang University, 2004. 8  
樊尚春 编著. 传感器技术及应用[M]. 第一版. 北京:北京航空航天大学出版社, 2004. 8
- Li Chuan, Zhang Yimo, Zhao Yonggui *et al.*. Fiber Grating: Principles, Techniques, and Sensing Applications [M]. First Edition. Beijing: Science Press, 2005. 10  
李 川, 张以谟, 赵永贵 等 编著. 光纤光栅: 原理, 技术与传感应用[M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 2005. 10
- Xiao Hao, Li Fang, Liu Yuliang. Recent advance on technique of high resolution wavelength shift demodulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(4): 50~55  
肖 浩, 李 芳, 刘育梁. 高分辨率波长位移解调技术研究进展

- [J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(4): 50~55
- A. Dandridge, C. C. Wang, A. B. Tveten *et al.*. Performance of  $3 \times 3$  couplers in fiber optic sensor systems [C]. *SPIE*, 1994, **2360**: 549~552
- Li Dong, Zhang Xiaohui, Huang Junbin. Demodulation for phase shifted grating sensor by interferometer based on  $3 \times 3$  coupler [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2004, (3): 460~462  
李 东, 张晓晖, 黄俊斌. 用基于  $3 \times 3$  耦合器的干涉仪解调相移光纤光栅传感信号[J]. 传感技术学报, 2004, (3): 460~462
- Huang Chong, Cai Haiwen, Geng Jianxin *et al.*. Wavelength interrogation based on a Mach-Zehnder interferometer with a  $3 \times 3$  fiber coupler for fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1397~1400  
黄 冲, 蔡海文, 耿建新 等. 基于  $3 \times 3$  耦合器的马赫-曾德尔干涉仪的光纤光栅波长解调技术[J]. 中国激光, 2005, **32**(10): 1397~1400
- M. D. Todd, G. A. Johnson, C. C. Chang. Passive, light intensity-independent interferometric method for fibre Bragg grating interrogation [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(22): 1970~1971
- F. Schliep. Nonideal behavior of singlemode fibre-optic  $3 \times 3$  directional couplers [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(17): 1496~1498
- A. D. Kersey, M. J. Marrone, M. A. Davis. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(6): 518~520
- S.-T. Shih, M.-H. Chen, W.-W. Lin. Analysis of fibre optic Michelson interferometric sensor distortion caused by the imperfect properties of  $3 \times 3$  coupler [J]. *IEE Proc. -Optoelectron.*, 1997, **144**(6): 377~382
- Jiang Yi, Chen Shufen. Direct demodulation for signal from fiber grating sensors by interferometer based on  $3 \times 3$  coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1487~1490  
江 毅, 陈淑芬. 用  $3 \times 3$  耦合器的干涉仪直接解调光纤光栅传感器的信号[J]. 光学学报, 2004, **24**(11): 1487~1490
- Chen Desheng, Xiao Ling, Cui Jie *et al.*. Analysis of  $3 \times 3$  coupler demodulation method for optical fiber interferometer

and polarization fading [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(5):523~525

陈德胜,肖林,崔杰等. 光纤干涉信号的  $3 \times 3$  耦合器解调及偏振衰落分析[J]. 光电子·激光, 2007, **18**(5):523~525

13 John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications [M]. Third Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 5

## 钼玻璃在 $1.54 \mu\text{m}$ 实现 1 Hz 下 3 J 和 5 Hz 下 0.6 J 的激光输出\*

近年来,随着激光告警、激光指示、风速测量、激光雷达尤其是激光美容等方面的需求逐渐增加,要求掺钼激光玻璃能够实现比以往更高重复频率以及更大能量的激光输出,其中对脉冲能量的要求达  $1 \sim 10 \text{ J}$ 。

我们在原有 Cr14 系列铬钽钼共掺磷酸盐玻璃的基础上,对玻璃组分和各离子的掺杂浓度进行了改进,开发出 Cr-E 系列铬钽钼共掺磷酸盐玻璃,闪光灯抽运激光实验的结果表明:该型号玻璃在 1 Hz 工作重复频率下能够获得脉冲能量为 3.03 J 的激光输出,特别是在 5 Hz 工作重复频率下能够获得脉冲能量为 577 mJ 的激光输出。而目前未经增强处理的铬钽钼共掺磷酸盐玻璃,其工作重复频率通常低于 3 Hz。

在闪光灯抽运激光测试实验中,掺钼激光玻璃棒尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ ,两端面镀  $1530 \sim 1560 \text{ nm}$  增透膜。配用的氙灯内径为 5 mm,极间距为 75 mm,单 LC 电路提供脉宽为 2.5 ms(最大幅度的 10% 之间的宽度)的抽运脉冲。谐振腔腔长为 300 mm,采用平-平腔设置,其中全反镜为  $R > 99.5\% @ 1530 \sim 1560 \text{ nm}$ ,输出耦合镜为  $R = 85\% @ 1530 \sim 1560 \text{ nm}$ 。聚光腔、钼玻璃棒和氙灯由循环水冷却装置冷却,水温设置为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,控温精度为  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。 $1.54 \mu\text{m}$  激光输出通过 OPHIR 公司 PE25BB-Diff 能量探头接收后,能量值由 NOVA II 型测量仪显示。

图 1 为 1 Hz 和 5 Hz 工作重复频率下激光的输入输出关系。随着工作重复频率增加,激光阈值由 39.4 J 增大为 41.4 J,斜率效率由 1.71% 降低为 1.42%。激光棒中的热积累取决于脉冲间隔时间与热弛豫时间之比。当工作重复频率增加时,抽运间隔时间减少,则与激光棒的热弛豫时间之比减小。热效应增加导致激光输出能量有所下降。

在 1 Hz 工作重复频率下,当输入能量为 250 J 时获得了脉冲能量为 3.03 J 的激光输出。实验中所

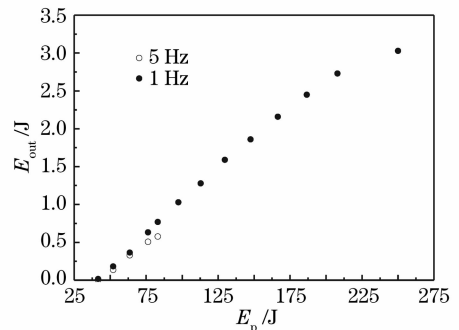


图 1 不同重复频率下的激光输出输入能量关系  
Fig. 1 Dependences of the output energy on the pump energy at different repetition rates

使用电源提供的最大脉冲能量为 250 J,而该玻璃在 2 Hz 工作重复频率下,单脉冲输入能量 250 J 时仍未发生破坏。因此推断在 1 Hz 工作重复频率下,该玻璃热破坏阈值将高于 500 J,我们预计最大脉冲输出能量可达 4~5 J。该能量指标与俄罗斯科学院 GPI 的 LSE-kh2 型掺钼激光玻璃相当(1 Hz 工作重复频率下,输入能量为 250 J 时,从  $\phi 6 \text{ mm} \times 88 \text{ mm}$  的掺钼激光玻璃棒获得脉冲能量为 2.64 J 的激光输出),远高于瑞典 RIT 的 SELG 型掺钼激光玻璃(单脉冲工作,输入能量为 250 J 时,从  $\phi 6.3 \text{ mm} \times 67 \text{ mm}$  的掺钼激光玻璃棒获得脉冲能量为 0.56 J 的激光输出)。在 5 Hz 工作重复频率下,当输入能量为 76.2 J 时获得了脉冲能量为 508 mJ 的激光输出,掺钼激光玻璃棒长时间工作未发生热破坏;当输入能量为 83 J 时获得了脉冲能量为 577 mJ 的激光输出,掺钼激光玻璃棒工作 30 s 后发生热破坏。目前 Cr-E 系列激光钼玻璃的改进工作正在进一步开展。

中国科学院上海光学精密机械研究所  
上海 201800  
陈力 何冬兵 栾飞  
胡丽丽 王标 陈伟  
收稿日期:2008-09-20

\* 上海市科委中法合作项目(05S207103)资助课题。