

文章编号: 0258-7025(2010)05-1280-04

基于多纵模光纤激光器的有源位移传感器

罗建花¹ 张昊¹ 刘波¹ 贾承来¹ 阎少林¹ 马秀荣²

(¹南开大学信息技术科学学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

²天津理工大学计算机与通信工程学院, 天津 300384

摘要 提出并实现了一种基于多纵模分布布拉格反射(DBR)光纤激光器的有源位移传感器,利用多纵模 DBR 光纤激光器的各纵模之间的拍频(LMB)进行传感。该传感器采用等强度悬臂梁结构,通过激光器各纵模之间拍频的变化来测量悬臂梁自由端的位移。在 $-60.17\sim 59.75$ mm 的位移变化范围内,拍频从 273.85~272.908 MHz 基本成线性变化,线性拟合度达到 0.9993,与理论推导相吻合。重复测量表明,该传感器的稳定性很好。根据测量仪器的最小分辨率以及频谱线宽,该传感器的测量精度为 3.8×10^{-3} mm。

关键词 激光技术;光纤激光器;有源传感器;多纵模;拍频

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103705.1280

Multi-Longitudinal-Mode Fiber Laser Based Displacement Sensor

Luo Jianhua¹ Zhang Hao¹ Liu Bo¹ Jia Chenglai¹ Yan Shaolin¹ Ma Xiurong²

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Technology, Ministry of Education, College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China

²School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

Abstract A multi-longitudinal-mode Bragg reflector (DBR) fiber laser based displacement sensor is reported and implemented. Using cantilever structure, the fiber laser sensor is on the basis of beat frequency demodulation. When the free end of cantilever has a displacement, the longitudinal mode beat (LMB) will change correspondingly. Within the displacement range of $-60.17\sim 59.75$ mm, the LMB changes from 273.85~272.908 MHz linearly, with a linearity of 0.9993, which agrees with the theoretically analysis. The sensor has a high repeatability and a precision of 3.8×10^{-3} mm.

Key words laser technology; fiber laser; active sensor; multi-longitudinal-mode; beat frequency

1 引言

自 Kashyap 等^[1]首次将光纤光栅(1500 nm)应用于光纤激光器以来,光纤激光器就因其具有与光纤兼容性好、制作简便、抗电磁干扰和稳定性高等优点得到广泛的研究。在传感领域,基于光纤激光器构成的光纤有源传感系统,利用光纤激光器的波长随着温度应力等外界物理量的变化进行传感实验研究,这种利用波长检测而实现对外界物理量传感光

纤光栅有源传感器在国内外已经得到广泛研究^[2~5]。这种传感器与普通的光纤布拉格光栅(FBG)传感器相比具有窄线宽、信噪比高、传输距离远和易于检测等优点。关柏鸥等^[6,7]提出一种基于正交偏振单纵模分布布拉格反射(DBR)光纤激光器的拍频调制型传感器,具有灵敏度高,解调简单等优点。但是要实现激光器的单纵模运转,必须制作超短腔的 DBR 光纤激光器,有一定的难度^[8~10]。而

收稿日期: 2009-02-12; 收到修改稿日期: 2009-05-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736039)、国家大学生创新性实验计划项目(081005511)、天津市自然科学基金重点项目(07JJCZDJC06000)、南开大学本科生创新科研“百项工程”项目(BX6-215)和光电信息技术教育部重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 罗建花(1980—),女,博士,助理研究员,主要从事光纤传感和光纤通信技术等方面的研究。

E-mail: lubilin@nankai.edu.cn

且正交偏振产生的拍频(PMB)容易受到多种因素的影响,其初始频率大小不可控制。另外对于超短腔的激光器,利用1~2 cm的腔长实现应变或者位移的测量,在封装工艺上存在难点。

本文设计了一种基于多纵模 DBR 光纤激光器的有源位移传感器,利用多纵模 DBR 光纤激光器的各纵模之间的拍频(LMB)进行传感。多纵模的 DBR 光纤激光器制作简单,而且腔长足够长,可以粘贴到梁上进行传感实验。另外,该传感器也同样利用拍频解调,但可以通过调节腔长来控制初始拍频的大小。由于电信号的解调技术比较成熟,设计制作实用化的拍频信号解调电路并不复杂,因此这种基于 DBR 光纤激光器的位移传感器在解调手段上更灵活、成本更低,这是传统的光纤光栅传感器所不能相比的。

2 原 理

有源位移传感器其核心传感元件是多纵模 DBR 光纤激光器,它采用匹配的两个光纤光栅作腔镜,增益光纤作增益介质构成法布里-珀罗(F-P)型谐振腔,也被称之为 F-P 激光器。该传感器利用多纵模 DBR 光纤激光器的各纵模之间的拍频进行传感,而激光器能够产生的纵模频率及数量是由激光振荡的相位条件和阈值条件决定的。

根据激光振荡的相位条件得到,形成激光振荡的谐振频率 ν_q 为

$$\nu_q = \frac{qc}{2nL}, \quad (1)$$

式中 c 为光速, n 为腔内折射率, L 为腔长, q 取正整数。

光波在腔内往返振荡时,一方面有增益,使光不断增强;另一方面也存在着不可避免的多种损耗,使光强减弱,如介质的吸收损耗、散射损耗、镜面透射损耗等。所以,不仅要满足谐振条件,还需要增益大于各种损耗的总和,才能形成持续振荡,有激光输出,这就是激光振荡的阈值条件。图1为激光纵模输出的示意图,横轴和纵轴分别为频率和增益。图1中在增益线宽内有5个频率的纵模($\nu_{l-2} \sim \nu_{l+2}$),只有3个满足阈值条件,也就是增益大于损耗,能够形成激光输出,因而形成激光的条件就是要同时满足相位条件和阈值条件。

由(1)式得到,形成激光的相邻激光纵模之间的频率之差为

$$\Delta\nu = c/(2nL), \quad (2)$$

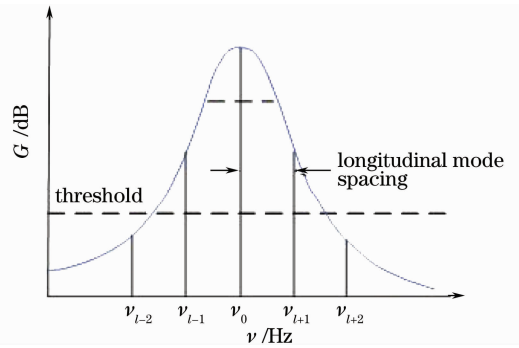


图1 激光器的增益曲线

Fig. 1 Curve of laser gain

各纵模的激光相互叠加,形成差拍,其拍频为

$$\Delta\nu_i = i \frac{c}{2nL}, \quad (i = 1, 2, 3 \dots) \quad (3)$$

由(3)式可以看出,当腔长 L 和折射率 n 发生变化时,差拍的频率也会变化。利用这种纵模之间的拍频随腔长 L 和折射率 n 的变化规律来进行传感。同时对一个窗口内的多个拍频进行观测,采集多个数据,通过数据融合技术,对这些数据进行分析处理,以提高传感精度。本文仅对相邻纵模之间的差拍也就是最小的拍频进行单一数据的采集,并对其传感特性进行理论和实验的研究。

3 实验装置及结果分析

实验制作的 DBR 光纤激光器如图2所示。采用980 nm 抽运源抽运,掺铒光纤(EDF)作为增益光纤,两个匹配的光纤光栅作腔镜,腔长为 $L_0 = 0.38$ m。激光器输出激光波长为1533.24 nm。980 nm的抽运光源经过波分复用器(WDM)由低反射率FBG一端进入DBR激光器的谐振腔,被高反射率FBG反射回WDM[后端用折射率匹配液(IMG)损耗掉多余的激光],激光通过WDM另一端经过光隔离器(ISO)到达光电检测器(PD),由光电探测器转化为电信号进入频谱仪(RF)。最后用频谱仪(型号为安捷伦E4445A,频谱测量范围为

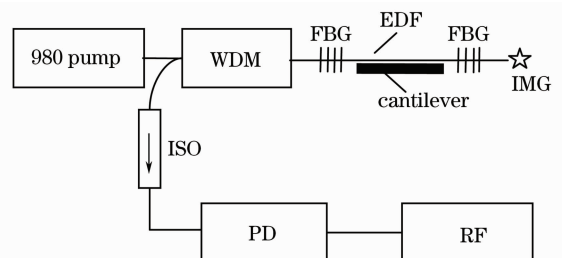


图2 DBR 光纤激光器实验结构图

Fig. 2 Setup of DBR fiber laser

3 kHz~13.2 GHz)来检测激光器拍频的频谱。图3为抽运功率为60 mW时DBR掺铒光纤激光器的初始输出频谱图。

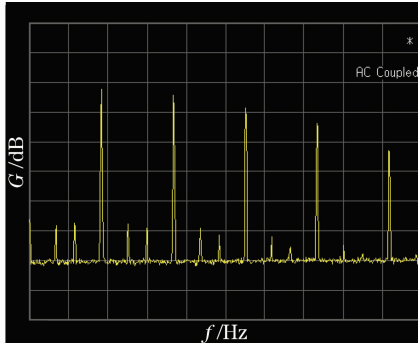


图3 DBR掺铒光纤激光器的输出频谱图

Fig. 3 Output frequency spectrum of DBR fiber laser
($P=60$ mW)

由图3可以看出,在1.4 GHz的频谱范围内,幅度较高的5个频率呈现等间隔分布,且相邻频率之间的间隔约为272.8 MHz。

测得谐振腔的总长度为 $L_0=0.38$ m,根据(2)式计算得相邻激光纵模之间的频率之差为

$$\Delta\nu_0 = \frac{c}{2nL_0} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.45 \times 0.38} \text{ Hz} \approx 2.72 \times 10^8 \text{ Hz},$$

即272 MHz,考虑到误差因素,实验结果与理论计算相符地很好。推断该激光器处于多纵模运转状态,图3所示的幅度较高的5个频率即为各纵模之间差拍形成的均匀频谱。

从图3可以看出,不同于普通的多纵模激光器,DBR光纤激光器(尤其是谐振腔的长度稍短的情况下)不同纵模相互耦合产生的频谱是均匀的梳状谱,这对传感来说非常有利。同时还发现除了纵模之间差拍产生规律的梳状频谱之外还有精细结构,也就是所谓的噪声频率。这些频率的特点是:幅度比较小,有规律地分布在整个频谱范围内,而且抖动增益光纤发现频谱有变化,在某一个状态下这些精细频谱会完全消失,用偏振控制器调节也出现幅度上和频率大小的变化。通过分析得出,该精细结构为激光器纵模在传输过程中不同偏振态产生的拍频。但是因为激光器的增益光纤过长,纵模过多,使得偏振产生的频谱杂乱,而且稳定性较差。另外偏振产生的差拍频率与纵模差拍产生的频率相比在幅度上相差很多,可以通过幅度滤波滤掉,在实际的传感测量中影响不大。

实验中,把DBR光纤激光器谐振腔的增益光纤(两光栅之间的光纤)粘贴到一等强度悬臂梁中轴线

的位置,粘贴长度与等强度梁长 l 相等。如图4(b)所示。

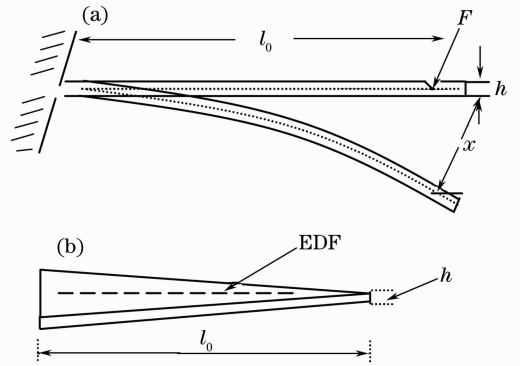


图4 等强度悬臂梁结构示意图

Fig. 4 Schematic of cantilever structure

设 l_0, h 分别为梁的长度和厚度。如图4(a)所示,悬臂梁受荷载 F 的作用而弯曲,设梁的自由端位移为 x 时(折射率 n 的变化可以忽略不计),谐振腔长度为 L ,此时激光器纵模间隔频率的变化量

$$\delta\Delta\nu = \Delta\nu - \Delta\nu_0 = \frac{c}{2nL} - \frac{c}{2nL_0} = \frac{c}{2n} \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{L_0} \right) = \frac{c}{2n} \left(\frac{1}{L_0 + \Delta l} - \frac{1}{L_0} \right). \quad (4)$$

当 Δl 远小于谐振腔长度 L_0 时,(4)式可以简化为

$$\delta\Delta\nu = \frac{c}{2n} \left(\frac{1}{L_0 + \Delta l} - \frac{1}{L_0} \right) \approx \frac{c\Delta l}{2nL_0^2}. \quad (5)$$

当梁自由端(末端 l_0 处)的位移 x 和梁的厚度 h 都远小于梁的长度时($h \ll l_0, x \ll l_0$),根据材料力学中悬臂梁的应变公式^[11],得到等强度悬臂梁的长度变化为

$$\Delta l = \epsilon l_0 = hx/l_0. \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式,可得

$$\delta\Delta\nu \approx -\frac{c\Delta l}{2nL_0^2} = -\frac{chx}{2nL_0^2 l_0}. \quad (7)$$

由(7)式可知,相邻纵模之间拍频的变化量与悬臂梁的自由端位移 x 的变化成正比关系。也就是说相邻纵模之间的拍频随着梁的自由端位移 x 的增加呈线性关系变化。

实验中取梁的自由端位移 x 的变化范围为-60.17~59.75 mm,每隔5 mm测量一次相邻纵模之间的拍频。图5即为在不同位移下相邻纵模之间拍频的频谱图。由图可见,随着位移为-60.17~59.75 mm,拍频往低频漂移。重复测量,传感器的稳定性很好。

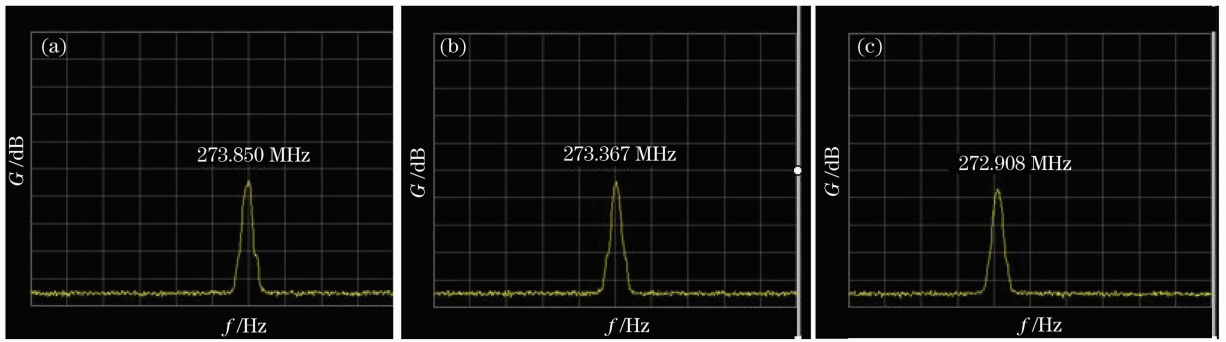


图 5 不同位移 x 下传感器的频谱图。(a) -60.17 mm; (b) 0 ; (c) 59.75 mm

Fig. 5 Frequency spectra under different displacements x . (a) -60.17 mm; (b) 0 ; (c) 59.75 mm

根据实验测量的数据,得到相邻纵模之间的拍频与梁的自由端位移 x 之间的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,相邻纵模之间的拍频随着梁的自由端位移 x 的增加呈线性关系变化,线性拟合度达到 0.9993,实验结果与理论推导一致。安捷伦 E4445A 频谱仪可分辨的最小频率为 3 Hz,而该激光器纵模间隔频率的线宽为 30 Hz,所以频谱仪所能分辨的最高精度只有 30 Hz,因而计算可得该传感器能达到的最高测量精度为 3.8×10^{-3} mm。

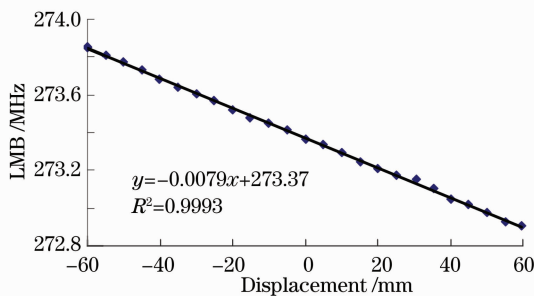


图 6 相邻纵模之间的拍频与梁的自由端位移的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of LMB and displacement

4 结 论

提出并实现了一种以多纵模 DBR 光纤激光器作传感单元,利用拍频解调的有源位移传感器。传感器采用等强度梁结构,对其进行了详细的理论分析和实验验证,实验结果和理论推导相一致。该传感器不仅延续了光纤式传感器高灵敏度抗电磁干扰等优点,而且大大降低了光纤式传感器的解调难度。该传感器既保持了光纤光栅传感器和有源传感器的优异特性,同时由于拍频信号解调电路的设计制作比较容易,还具有解调方式灵活,解调成本低,易实现等优点。这种 DBR 光纤激光器还可以作为波长解调的传感器,通过拍频和波长双参量解调,可

以构成多维多参量的传感网络体系。

参 考 文 献

- 1 R. Kashyap, J. R. A. rm Itage, R. W. Yatt *et al.*. All-fibre narrow band reflect ion gratings at 1500 nm [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(11): 730~732
- 2 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fiber grating high pressure sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4): 398~399
- 3 E. J. Friebele, C. G. Askins, M. A. Putnam *et al.*. Distributed strain sensing with fiber Bragg grating arrays embedded in CRTM composites [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(21): 1783~1784
- 4 A. T. Alavie, S. E. Karr, A. Othonos *et al.*. A multiplexed Bragg grating fiber laser system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(2): 1112~1114
- 5 K. P. Koo, A. D. Kersey. Bragg grating based laser sensor systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1243~1249
- 6 B. Guan, H. Tam, S. Lau *et al.*. Ultrasonic hydrophone based on distributed Bragg reflector fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **16**(1): 169~171
- 7 Y. Zhang, B. Guan, H. Tam. Characteristics of the distributed Bragg reflector fiber laser sensor for lateral force measurement [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(18): 4619~4622
- 8 Luo Jianhua, Liu Bo, Lan Yuwen *et al.*. The experimental study of a polarization orthogonal single-longitudinal-mode distributed Bragg reflector (DBR) fiber laser [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2008, **50**(6): 1658~1660
- 9 Han Wei, Zhang Yali, Zhang Yan *et al.*. Single mode operation of an injection locked Fabry-Pérot laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1318~1322
- 10 韩 威, 张雅丽, 张 艳 等. 注入锁定法布里-珀罗激光器的单模工作特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1318~1322
- 11 Yu Li, Song Yuejiang, Zhang Xuping. Single-longitudinal-mode and wavelength-switchable fiber laser with linear cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1455~1458
- 12 俞 力, 宋跃江, 张旭苹. 单纵模、波长可开关的线性腔光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1455~1458
- 13 Zhang Weigang. Study on Design and Technology in Fiber Grating-Type Sensing Series Devices [D]. Tianjin: Nankai University, 2002
- 14 张伟刚. 纤栅式传感系列器件的设计及技术研究[D]. 天津: 南开大学, 2002