

基于分布布拉格反射光纤激光器的压力传感器^{*}

兰玉文 刘 波 罗建华

(南开大学现代光学研究所, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 介绍了一种基于单纵模分布布拉格反射(DBR)光纤激光器的新型压力传感器。该传感器基于拍频检测原理,其解调方法与传统光波长解调相比成本低且易实现。激光器谐振腔的增益光纤在应力作用下感生双折射从而导致单纵模激光器原本简并的正交偏振模式分离,互相差拍,产生 1 GHz 左右的拍频。对这种新型传感器进行了理论分析和实验论证,通过对 0~1.2 N 范围内压力进行传感检测,测得拍频为 800~1200 MHz,曲线拟合度达到 99.76%。结果表明,该压力传感器不仅延续了光纤光栅传感器高灵敏度等优点。还可以看作是在原有光纤 Bragg 光栅传感技术的升级,以分布布拉格反射(DBR)代替光纤光栅作为传感单元,将无源传感升级为有源传感,以提高信噪比和传输距离。

关键词 光纤光学; 压力传感器; 分布布拉格反射器; 双折射; 光纤光栅

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0629

Pressure Sensor Based on Distributed-Bragg-Reflector Fiber Laser

Lan Yuwen Liu Bo Luo Jianhua

(*Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Technology, Ministry of Education,*
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract A novel pressure sensor based on single-longitudinal-mode distributed Bragg reflector (DBR) was reported. DBR will induce birefringence under external press on the cavity. According to this, this laser can be used to sense external pressure by measuring the polarization mode beat-frequency shift. And as the beat-frequency ranges about 1 GHz, the demodulation is much easier to realize. Experiment proves that the beat-frequency ranges from 800 MHz to 1200 MHz when the pressure ranges from 0~1.2 N, and the degree of fitting is 99.76%. The sensor keeps the strong points of FBG sensing while its signal demodulation is quite convenient and exact.

Key words fiber-optics; pressure sensor; distributed Bragg reflector (DBR); birefringence; fiber Bragg grating

1 引 言

以光纤光栅为敏感元件的光纤光栅传感器以其高灵敏度、抗电磁干扰、易于网络化等优点而受到了广泛的关注和研究^[1~5]。但是现有的光波长解调大多利用光谱仪,或者用光纤法-珀腔和耦合器等无源器件研制的解调设备^[6~7]。代价昂贵,技术不成熟,长期制约了光纤光栅传感器的大规模应用。本文研究了一种基于分布布拉格反射(DBR)光纤激光器(FBG)的新型压力传感器,该传感器,利用光纤内部

双折射而产生的拍频信号。其优点在于该传感器不仅延续了光纤光栅传感器高灵敏度等优点,而且由于拍频信号的频率远低于光信号频率所以其解调技术比光纤光栅传感的解调更为容易。

2 原 理

DBR 光纤激光器由抽运源、掺铒光纤(EDF)和写制在其上的一对波长匹配的光纤光栅对组成,其中光纤光栅构成了激光器的腔镜,掺铒光纤构成增

收稿日期: 2008-05-20; 收到修改稿日期: 2008-09-01

基金项目: 国家 863 项目(2006AA01Z217)、国家自然科学基金重点项目(60736039)、天津市高等学校科技发展基金项目(20060609)和光电信息技术教育部重点实验室开放基金项目资助

作者简介: 兰玉文(1983-),男,硕士研究生,主要从事光纤传感与现代光通信技术。E-mail: lanyuwen@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 刘 波(1975-),男,副教授,主要从事光纤传感技术方面研究。E-mail: liupipi@nankai.edu.cn

益腔。理想情况下激光器输出的是一对正交偏振且频率相同的两个简并模式,但由于掺铒光纤的双折射效应,DBR 光纤激光器实际上工作在正交偏振的双频模式下,其两个模式的频率差即拍频由下式决定^[8]:

$$\Delta\nu = B\nu/n \quad (1)$$

其中 ν 为激光器的输出频率, B 和 n 分别为光纤的双折射率和折射率。理想情况下,没有外界影响的处于自由状态的光纤本身没有双折射,即拍频 $\Delta\nu$ 完全由外界所加应力引起的双折射,当在光纤腔上施加一定的压力时,激光器就会输出相应频率的拍频,由于通常产生的拍频频率较低,一般处于微波段范围,因此信号的解调可用成熟的电信号解调方法实现,从而避免了复杂的光信号解调。

图 1 为传感示意图,中间的一系列圆圈为数根光纤。其中加黑的光纤为 DBR 激光器的光腔 EDF,其余光纤为保护光纤。上下两个平板用来均匀传递压力。若腔长 L ,保护光纤的数目 $N-1$ 根,力为 F ,则 EDF 在单位长度上受到的压力是 $f=F/NL$ 。光纤的归一化双折射由下式决定^[9]

$$B_f = \frac{\partial\beta}{\beta} = \frac{4n_1^3}{\pi} \frac{1+\sigma}{E} (P_{12} - P_{11}) \frac{F}{2rNL} \quad (2)$$

$$\Delta\nu = \nu/n \sqrt{B_0^2 + B_f^2 + 2B_0B_f \cos\theta} =$$

$$\nu/n \sqrt{B_0^2 + (5.81 \times 10^{-8} F/L)^2 + 2B_0 \cos\theta \times 5.81 \times 10^{-8} F/L} \quad \text{即 } (\Delta\nu)^2 = c_1 F^2 + c_2 F + c_0 \quad (5)$$

其中 c_0, c_1, c_2 均为常量。

3 实 验

图 2 为实验装置示意图,实验中所用的 DBR 由抽运源、掺铒光纤 EDF 和写制在其上的一对波长匹配的光纤光栅对组成,光纤布拉格光栅(FBG)的中心波长为 1542 nm,光栅对之间的掺铒光纤腔长 15 mm,其中一个(FBG)反射率为 99%,另一个 FBG 反射率为 90%。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 谐振腔,激光经 WDM 和光隔离器、被光电探测器转化成电信号,最终由频谱仪捕获实验中产生的拍频信号。实验中所用频谱仪型号为安捷伦 E44445,频谱范围为 3 kHz~13.2 GHz。

按图 1 所示对 EDF 施加一组大小不等的压力。压力的大小由标准砝码提供,先由小至大逐次递增再由大至小逐次递减。依次记录下施加压力大小及相应的拍频频率,实验数据及其二次曲线拟合结果如图 3 所示。

式中 E 和 σ 分别为 SiO_2 的杨氏模量和泊松比, r 为光纤半径, P_{11} 和 P_{12} 为光弹性系数。

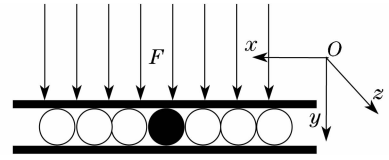


图 1 传感示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensing

由以上公式可得到

$$\Delta\nu = B_f\nu = \frac{4n_1^3}{\pi} \frac{1+\sigma}{E} (P_{12} - P_{11}) \frac{F\nu}{2rNL} \quad (3)$$

所用 SiO_2 材料构成的单模光纤, $r=6.25 \times 10^{-5}$ m, $\sigma \approx 0.16$, $E=6.5 \times 10^{10}$ N/m², $P_{11}=0.12$, $P_{12}=0.27$

由此可得

$$\Delta\nu = 5.81 \times 10^{-8} F\nu/NL \quad (4)$$

以上推导过程的条件是理想状态下处于自由状态的光纤没有应力双折射。实际情况是即使在自由状态下光纤也不可避免的存在固有应力双折射 B_0 。因此总的双折射 B 为固有双折射 B_0 和外加应力引起双折射 B_f 之和,即 $B = B_0 + B_f$, $B = \sqrt{B_0^2 + B_f^2 + 2B_0B_f \cos\theta}$, 因此

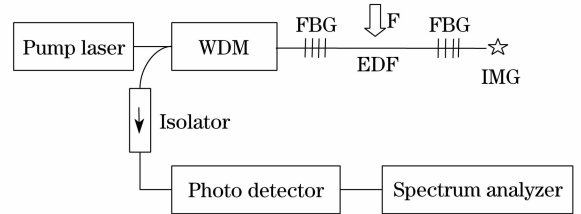


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematics of the experimental system

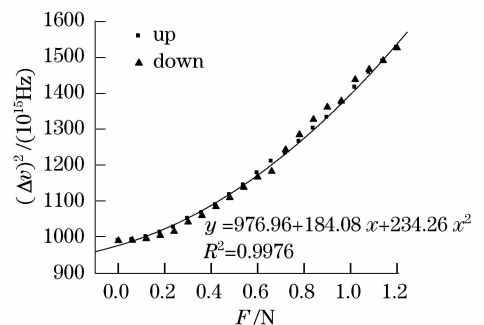


图 3 实验数据二次拟合结果

Fig. 3 Fitted curve of experimental result

对传感器施加的压力范围为 0~1.2 N,测得拍频信号范围为 800~1200 MHz。图中方形点为压力由小至大的上行数据,三角形点为压力由大至小的下行数据。可以看出上行压力数据和下行压力数据基本重合,表明这种压力传感器具有较高的稳定性。取上行数据进行二次曲线拟合,拟合出的传感公式为

$$(\Delta\nu)^2 = 234.26F^2 + 184.08F + 976.96 \quad (6)$$

拟合度为 0.9976,这也就保证了在实际应用中该传感器可以拥有较高的精确度。

实验中对拍频信号进行解调的是频谱仪。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。而传统的光纤光栅传感器的光信号解调大多采用价格昂贵的 F-P 腔,因此这种基于 DBR 光纤激光器的压力传感器在解调手段上具有很大的灵活性和低成本性。

4 结 论

研究了一种新型压力传感器,该传感器以 DBR 激光器为敏感元件,利用因光纤内部双折射而产生的较低频率的拍频信号进行解调,不仅延续了光纤式传感器高灵敏度抗电磁干扰等优点,降低了光纤式传感器的解调难度。实验表明这种传感器具备较好的稳定性,高达 99.76% 的数据拟合度也保证了传感器测量结果的精确。这种传感器可应用于复杂环境下压力的测量,利用成熟的波分复用技术,结合

温度、位移、加速度等多参量传感器可构建多维多参量分布式传感网络。

参 考 文 献

- 1 Byoung-ho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2003, **9**:57~79
- 2 Xue LF, Liu JG, Liu YG *et al.*. Method for enhancing temperature sensitivity of fiber Bragg gratings based on bimetallic sheets[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(31): 8132~8135
- 3 D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *Lightwave Technol.*, 1997, **15**:1442~1463
- 4 Tuan Guo, Qida Zhao, Hao Zhang *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensing system [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(15): 2269~2271
- 5 Chen Jianjun, Zhang Weigang, Tu Qinchang *et al.*. High-sensitivity flow velocity sensor based on fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1136~1139
陈建军,张伟刚,涂勤昌等. 基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1136-1139.
- 6 Tang Qingtao, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. High-resolution signal demodulation method for fiber-optic Fabry-Perot multiplexing system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(10):1353~1357.
唐庆涛,饶云江,朱涛等. 光纤法-珀传感系统高分辨率复用信号解调方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1353~1357
- 7 Liu Chunyu, Ye Hong'an, Cao Xue. Fiber coupler sensitive to wavelength used to demodulate wavelength shift of fiber bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11):1623~1626
柳春郁,叶红安,曹雪. 用于光纤光栅解调的波长敏感光纤耦合器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11):1623~1626
- 8 Bai-Ou Guan, Hwa-Yaw Tam, Sien-Ting Lau *et al.*. Ultrasonic hydrophone based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(1):169~171
- 9 M. Smith. Single-mode fiber pressure sensitivity[J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(20): 773~774