

文章编号: 0253-2239(2004)02-183-4

光放大外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统*

江 建 饶云江 冉曾令 廖天奎
(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: 提出了一种大幅度提高外腔式法布里-珀罗干涉传感器干涉信号强度的方法, 利用掺铒光纤放大自发辐射产生的光源代替一般宽带光源, 同时由于掺铒光纤的放大作用可以放大干涉信号, 将光纤法布里-珀罗传感器的信号强度提高了 4 个数量级, 因而利用该方法可获得很强的信号和较高的信噪比。介绍了基于光放大的外腔式法布里-珀罗干涉传感系统的结构、测量原理及实验。实验结果表明该传感器的应变精度为 $\pm 10 \mu\epsilon$, 可满足实际应用的要求。该传感系统在大幅度提高传感器信号强度的同时并未提高系统的成本, 因此有着较高的性价比和实用价值。

关键词: 导波与光纤光学; 光纤传感器; 法布里-珀罗干涉仪; 掺铒光纤; 应变计

中图分类号: TN253 文献标识码: A

A Novel Extrinsic Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometric Sensing System Based on Optical Amplification

Jiang Jian Rao Yunjiang Ran Zengling Liao Tiankui

(Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

(Received 24 December 2002; revised 22 January 2003)

Abstract: A novel method of enhancing the signal level of extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometer (EFPI) is proposed and demonstrated. This method is based on the simultaneous use of the amplified spontaneous emission (ASE) and optical amplification of an erbium-doped fiber (EDF) pumped by a 980 nm laser diode. The improvement in interferometric signal level is very significant as an enhancement of 4 orders of magnitude can be achieved. An experiment is carried out to verify this concept. An improvement of 43 dB in signal level has been achieved with a small pump power of ~ 30 mW. The strain accuracy has been improved by a factor of two compared with authors' previous EFPI system without optical amplification. Such an EFPI system has a good performance-to-price ratio since it can enhance the optical intensity greatly while it doesn't increase the cost of the sensor system significantly.

Key words: guided wave and fiber optics; optical fiber sensors; Fabry-Perot interferometer; erbium-doped fiber (EDF); strain gauge

1 引 言

随着现代测量技术的发展, 光纤传感器越来越受到人们的重视^[1,2]。光纤干涉传感器作为光纤传感器中极为重要和常用的一类, 相对于其它光纤传感器其主要优点在于分辨率高、精度高以及实现方式多样化^[3], 因此近几年来是一个非常活跃的研究

领域^[4,5], 可应用于复合材料、大型建筑结构(如桥梁等)、宇航飞行器、飞机等的结构状态监测, 以实现所谓的智能结构^[6]。其中以光纤法布里-珀罗干涉传感器的技术最为成熟和应用最广^[7,8], 但光纤法布里-珀罗传感器有一个显著的缺点, 就是信号较弱(功率密度为纳瓦级)^[9,10], 在实际应用中由于噪声的干扰会使得信噪比较低, 给信号检测增加了较大的难度, 这无疑增加了整个传感系统的复杂性和影响了测量精度。

为克服光纤法布里-珀罗干涉传感器这一弱点,

* 国家杰出青年科学基金(60025515)资助课题。

E-mail: jjiang@china.com

收稿日期: 2002-12-24; 收到修改稿日期: 2003-01-22

本文提出了一种新颖的提高非本征型法布里-珀罗干涉腔(EFPI)传感器信号强度的方法,设计出了基于光放大的外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统。该传感系统充分利用了掺铒光纤的增益特性,既用掺铒光纤的放大自发辐射形成光源,又利用其来放大非本征型法布里-珀罗干涉仪的干涉信号,将信号强度提高了 4 个数量级,并获得较高的信噪比,同时由于小功率的抽运源与一般宽带光源(如超发光二极管 SLD 等)在价格上相差无几,所以该传感系统在大幅度提高传感器信号强度的同时并未提高系统的成本,因此有着较高的性价比和实用价值。

2 基本原理

基于光放大的外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统的原理如图 1 所示。由于无信号光输入,掺铒光纤的放大自发辐射形成了放大自发辐射宽带光源,放大自发辐射光进入非本征型法布里-珀罗干涉仪后,产生多光束干涉,反射信号通过掺铒光纤放大后被光谱仪接收。系统中,掺铒光纤对反射的干涉信号有放大作用,因此接收端的信号较强。加入隔离器以避免逆向光的干扰。传感头由石英毛细管、光导入/反射单模光纤构成。石英管长 46 mm、内外直径分别为 128 μm 和 300 μm ,两光纤端面相距约为几百微米,构成非本征型法布里-珀罗干涉仪。在石英管两端,光纤和石英管用 AB 胶粘合在一起。这样就构成了基于光放大的外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感器。其典型的干涉谱如图 2 所示。由图 2 可见,该传感器的信号功率密度为微瓦级,比一般的非本征型法布里-珀罗传感器信号强 4 个数量级。

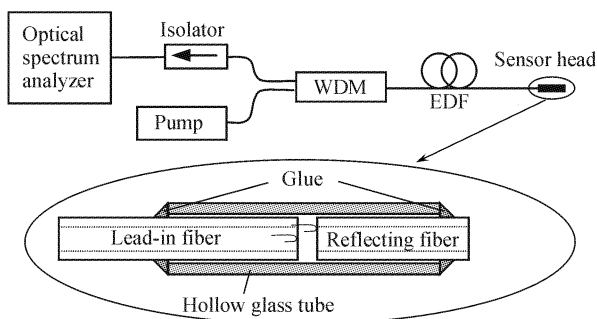


Fig. 1 Extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensor system based on optical amplification.

WDM: wavelength division multiplexer

由多光束干涉理论^[11],非本征型法布里-珀罗干涉腔反射光强为

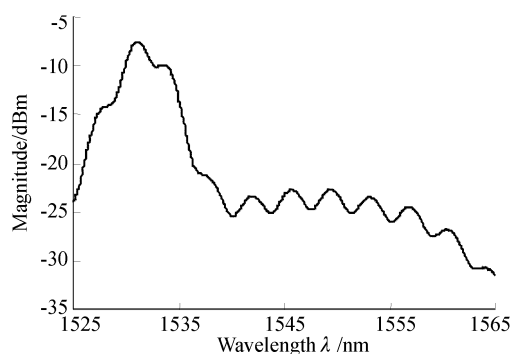


Fig. 2 Reflective spectrum of the sensor system

$$I_r = \frac{2R[1 - \cos(2kd)]}{1 + R^2 - 2R\cos(2kd)} I_i, \quad (1)$$

式中 R 为光纤端面反射率, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, d 为非本征型法布里-珀罗干涉仪的腔长, I_r 、 I_i 分别为反射和入射光强。该式说明非本征型法布里-珀罗干涉仪的干涉光谱为余弦分布,在其干涉谱中任取余弦分布的两个峰值点波长 λ_1 和 λ_2 ,可计算出腔长为

$$d = m\lambda_1\lambda_2 / (2|\lambda_1 - \lambda_2|), \quad (2)$$

式中 m 为 λ_1 到 λ_2 间的干涉条纹数。传感器的石英管埋入或表面粘附于被测物,受到应变作用时,非本征型法布里-珀罗干涉仪腔长将发生变化。用光谱仪接收到非本征型法布里-珀罗干涉仪的干涉谱后,通过(2)式,可测量出在不受应变和受到应变 ϵ 作用时的非本征型法布里-珀罗干涉仪腔长变化量 Δd ,石英管长度为 L ,则应变值为 $\epsilon = \Delta d/L$ 。

考虑到掺铒光纤对非本征型法布里-珀罗干涉仪反射干涉信号的放大作用,可将放大后的信号与未被放大的信号进行对比,因此采用图 3 所示装置。在图 3 中,干涉信号不通过掺铒光纤进行放大,而是通过耦合器直接接入光谱仪,其谱图见图 4,因此掺铒光纤的作用仅为提供放大自发辐射宽带光源,而并不参与信号的放大。

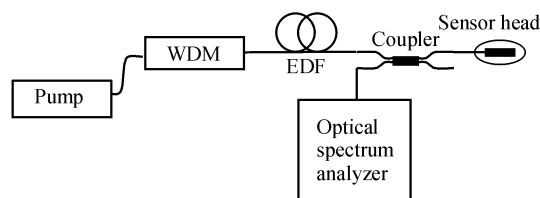


Fig. 3 Experimental system in which signal isn't amplified by EDF

图 1 所示的实验装置中,由于放大自发辐射光在任何方向上几率均等,因此光谱仪接收到的是放大自发辐射光源与被放大的非本征型法布里-珀罗干涉仪干涉信号的混合光谱,由于光纤端面反射率较低(约为 4%),因此其归一化光强分布为

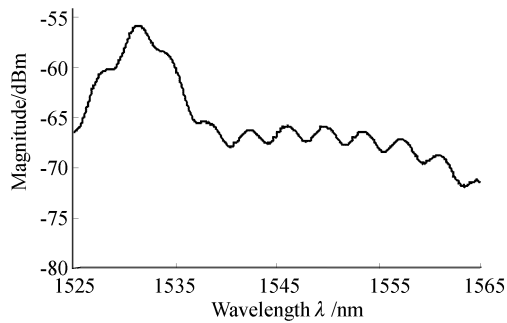


Fig. 4 Reflective spectrum of EFPI which isn't amplified by EDF

$$\frac{I}{I_i} = \frac{A(\lambda)}{I_i} + G(\lambda)R[1 + VS(\lambda)\cos(2kd)], \quad (3)$$

式中 $A(\lambda)$ 为后向的放大自发辐射光, $G(\lambda)$ 为信号通过掺铒光纤产生的增益, V 为干涉条纹的对比度, $S(\lambda)$ 为放大自发辐射光源光谱分布。对于 1540 ~ 1560 nm 范围内的信号, 由于在此范围内掺铒光纤的放大自发辐射光谱平坦度较好(不平坦度约 2~3 dB), (3)式中的第一项可看作直流分量, 被掺铒光纤放大的干涉信号叠加在“直流”信号分量之上。由此可见, 基于光放大的外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统中, 信号的增强由两个方面的因素引起, 其一是干涉信号在反射通过掺铒光纤时本身被放大, 体现在(3)式中的 $G(\lambda)$ 上, 其二是后向的放大自发辐射光谱叠加在干涉信号之上, 将干涉信号整体增强。因此, 系统对增益 $G(\lambda)$ 要求并不高, 便可将干涉信号强度增大到光源信号强度之上。

图 3 所示的实验装置中, 干涉信号通过耦合器直接进入光谱仪, 耦合器的前向、后向耦合系数分别为 $\alpha_f=0.5, \alpha_b=0.5$, 因此光谱仪上信号归一化光强分布为

$$\frac{I'}{I_i} = \alpha_f \alpha_b R[1 + V'S(\lambda)\cos(2kd)]. \quad (4)$$

对比(3)式和(4)式可见, 由于 R 较小, 基于光放大的外腔式光纤法布里-珀罗干涉仪干涉传感系统可以大幅度提高非本征型法布里-珀罗干涉仪干涉信号的强度。另外对比图 2 与图 4 可见, 放大后的信号不但强度比未放大的信号高出 43 dB 左右, 而且对比度也有了一定的改善。光谱仪接收到的掺铒光纤产生的后向放大自发辐射光对干涉信号主要起着“抬高”的作用, 即将较弱的信号整体放大, 而并未较大程度地降低信噪比, 因此利用该系统仍可获得较高的信噪比。

3 实验结果及讨论

为了测试基于光放大的外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统的性能, 我们对其做了应变实验, 采用图 1 所示的实验系统, 将其中的非本征型法布里-珀罗干涉仪置于悬臂梁上, 悬臂梁上贴有电阻应变片, 并接入应变计进行应变标定。当给悬臂梁加载时, 悬臂梁将产生应变, 分别用应变计和非本征型法布里-珀罗传感器测出应变值, 两者的对比结果如图 5 所示。实验用的掺铒光纤是武汉邮电科学研究院生产的 EDF051 光纤, 长度为 5 m, 抽运功率为 30 mW。由图 5 可见, 该传感器的精度较高, 为 $\pm 10 \mu\epsilon$, 和以前报道的不带光放大的非本征型法布里-珀罗传感系统(见文献[9, 10])相比, 精度提高一倍以上。

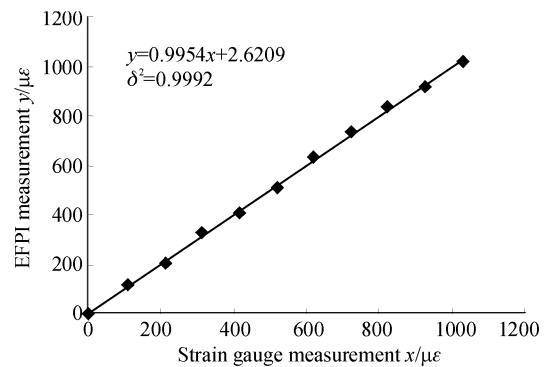


Fig. 5 Relationship of strains measured by the sensor and strain gauge, respectively

因此, 利用该传感系统可以获得高强度及较高信噪比的测量信号。该传感系统可用于大型建筑结构(如桥梁等)的状态监测。实际应用中, 该系统由于信号很强, 因此大大降低了对探测系统的要求, 也极大地方便了后续的信号检测与处理, 同时也便于采用空分复用方法进行多点同时测量^[12]。

结论 本文提出了一种新颖的大幅度提高非本征型法布里-珀罗传感器信号强度的方法, 该方法充分利用了掺铒光纤的增益特性, 巧妙地利用掺铒光纤的放大自发辐射形成宽带光源及同时又可以实现对干涉信号进行放大的特点, 可将非本征型法布里-珀罗传感器的信号强度较一般非本征型法布里-珀罗干涉仪提高 4 个数量级, 并获得较高的信噪比。此外该方法未增加传感系统的成本, 因此有较高的性价比和实用价值。我们制作了基于光放大的外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感器, 并进行了应变测量实

验。实验表明该传感器的应变精度为 $\pm 10 \mu\epsilon$, 可满足实际应用的要求。

参 考 文 献

- 1 Yu F T, Yin S. *Fiber Optic Sensors*. New York: Marcel Dekker, 2002
- 2 Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L *et al.*. Unique characteristics of long-period fiber gratings fabricated by high-frequency CO₂ laser pulses. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2003, **52**(6):1432~1437 (in Chinese)
- 3 Giallorenzi T G, Bucaro J A, Dandridge A *et al.*. Optical fiber sensor technology. *IEEE Quant. Electron.*, 1982, **18**(4):626~665
- 4 Rao Y J. In-fiber Bragg grating sensors. *Meas. Sci. & Technol.*, 1997, **8**(2):355~375
- 5 Jones J D C. Review of fiber sensor techniques for temperature-strain discrimination. in: *Proc. OFS' 12* (Williamsburg, Virginia, USA, 1997): 36~39
- 6 Udd E. *Fiber Optic Smart Structures*. New York: Wiley, 1995
- 7 Yu F T, Yin S. *Fiber Optic Sensors*. New York: Marcel Dekker, 2002
- 8 Sun J Y, Chen W M, Zhu Y *et al.*. Influence of optical source spectrum on optical fiber F-P strain sensor. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(5):596~600
- 9 Rao Y J, Yuan S F, Zeng X K *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement of advanced 3-D braided composite materials using an improved EFPI/FBG system 2002. *Opt. Lasers in Engng.*, 2002, **38**(6):557~566
- 10 Rao Y J, Zeng X K, Zhu Y *et al.*. EFPI/FBG strain-temperature sensor and application. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(1):85~88
- 11 Shi S X, Zhang H X, Liu J S. *Physical Optics and Application Optics*. Xian: Xidian University Publishing House, 2000. 67~72
- 12 Rao Y J, Jackson D A. Universal fiber-optic point sensor system for quasi-static absolute measurements of multiparameters exploiting low coherence interrogation. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(4):592~600