

文章编号: 0253-2239(2007)08-1405-4

具有有源闭合腔的光纤光栅传感系统地址查询技术*

曹 雪¹ 余有龙^{1,2} 刘盛春¹ 李若明² 陈雪峰¹

(¹ 黑龙江大学光纤技术研究所, 哈尔滨 150080)
(² 暨南大学光电工程研究所, 广州 510632)

摘要: 基于熔融拉锥技术研制的 3 dB 宽带耦合器的光纤环形镜的工作原理, 提出了一种新型的具有有源闭合腔装置的光纤光栅传感系统。在用作闭合共振腔端镜的环形镜中写入十个波分复用光纤光栅传感元, 利用共振腔中接入的法布里-珀罗滤波器, 通过控制电压对传感光栅的波长扫描, 实现对传感地址的查询。用非平衡的迈克尔孙扫描干涉仪将传感光栅的波长漂移信息变为相移信息, 实现传感信号的解调。系统传感灵敏度的实验值为 $1.5835^\circ/10^{-6}\epsilon$, 与理论值 ($1.6662^\circ/10^{-6}\epsilon$) 基本吻合。

关键词: 光纤光学; 光纤光栅传感系统; 有源查询; 光纤环形镜; 解调
中图分类号: TN253 文献标识码: A

Interrogation Techniques for Fiber Bragg Grating Sensor System Based on Active Closed Cavity

Cao Xue¹ Yu Youlong^{1,2} Liu Shengchun¹ Li Ruoming² Chen Xuefeng¹

(¹ Research Institute of Fiber Optics, Heilongjiang University, Harbin 150080)
(² Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632)

Abstract: A novel fiber Bragg grating (FBG) sensor system with an active closed cavity is proposed according to the principle of fiber loop mirror (FLM) based on 3 dB wideband coupler fabricated by fused biconical taper technique. Ten cascaded wavelength-division-multiplexed (WDM) FBG sensors are fabricated in the FLM acting as an end mirror of a closed cavity resonator. Active interrogation techniques are realized by controlling the applied voltage of the insert tunable Fabry-Pérot filter of the cavity and realizing wavelength scanning. The unbalanced Michelson interferometer transforms the wavelength-shift signal induced by the measured strain into phase-shift signal, and the demodulation is achieved. The experimental sensor sensitivity, $1.5835^\circ/10^{-6}\epsilon$ matches the predicted value ($1.6662^\circ/10^{-6}\epsilon$) basically.

Key words: fiber optics; fiber Bragg grating sensor system; active interrogation; fiber loop mirror; demodulation

1 引 言

采用波长编码的光纤光栅 (FBG) 传感器, 易于网络化操作而可用来对待测量进行准分布式监测, 因而引起人们的广泛关注^[1~6]。地址查询和信号解调是光纤光栅传感网络实用化面临的两个关键技术^[3~7]。查询技术主要分为无源^[1~5]和有源^[6,8,9]两

种, 前者受限于光源能量, 复用数目有限; 后者不仅可以增加信噪比并且具有查询更多光栅的能力。已报道的有源查询方法主要有滤波法^[6,8]、锁模法^[9]等, 其中滤波法是一种比较实用的网络信息查询方式, 将其与可获得极限分辨力的干涉解调技术^[10]结合起来, 则可实现待测物理量的高分辨力网络化

* 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-04-0828) 和广东省自然科学基金重点项目 (04105843) 资助。

作者简介: 曹 雪 (1981—), 女, 黑龙江佳木斯人, 硕士研究生, 主要从事光纤通信与传感方面的研究。

E-mail: caoxue170987@sohu.com

导师简介: 余有龙 (1965—), 男, 安徽桐城人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤光电子领域方面的研究。

E-mail: youlongyu@163.com

收稿日期: 2006-11-23; 收到修改稿日期: 2007-02-06

传感。

利用熔融拉锥技术获得 3 dB 宽带耦合器的工艺已经成熟,基于该耦合器研制的光纤环形镜(FLM)以其结构简单、性能稳定、使用灵活等优点而引起人们的关注并获得应用^[11]。

本文利用腔内接有波分复用(WDM) 光纤光栅传感元件串的光纤环形镜作为环形腔光纤激光器端镜,借助可调法布里-珀罗滤波器的波长扫描,实现对传感光栅的地址查询。与传统环形腔光纤激光技术^[8]相比,本文的有源闭合腔装置对每个光栅查询时的信号免受其它传感光栅反射信号的干扰,并且环形镜的引入可免除光栅串纤端反射对系统的影响,大大提高了信噪比和稳定性;输出耦合器的耦合比可灵活调整,使闭合腔内振荡形成的激光能量与输出能量达到理想配置,从而得到较强激光输出。

2 工作原理

将 3 dB 宽带耦合器的两输出端熔接在一起,由于耦合会造成直通臂和耦合臂光束间出现 π 相差,这样入射端同侧的另一端口输出光将由振幅相等的两束光组成,其中一束经历两次直通过程,而另一束经历两次耦合过程,彼此相差 2π ,以致出现相消干涉,输出能量为 0。不考虑附加损耗,根据能量守恒的原理,全部光波将由入射光的原路返回。该现象有点类似反射现象,因而被称之为“光纤环形镜”或“光纤反射器”^[12]。

掺铒光纤(EDF)受 980 nm 激光激发,将释放 1550 nm 附近的光波,形成带宽约几十个纳米的自发辐射。在光纤环形镜的腔中置入波分复用传感光栅串(如图 1 所示),当法布里-珀罗滤波器的透过波长与光栅串中某一光栅的布拉格波长一致时,由于光栅的带阻滤波作用,该波长的光波在其两侧均沿

原路返回。

假设法布里-珀罗滤波器的透射谱 $T(\lambda)$ 与光纤光栅反射谱 $R(\lambda)$ 都是高斯函数,则该波长的光信号经 3 dB 耦合器 C1 输出后的能量 I_{out} 为^[13,14]

$$I_{out} = \int_0^{\infty} T(\lambda)R(\lambda) d\lambda = I_0 T_{max} R_{max} \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} \frac{\Delta\lambda_{F-P}\Delta\lambda_B}{\sqrt{\Delta\lambda_{F-P}^2 + \Delta\lambda_B^2}} \times \exp\left[-4\ln 2 \frac{(\lambda_{F-P} - \lambda_B)^2}{\Delta\lambda_{F-P}^2 + \Delta\lambda_B^2}\right] \quad (1)$$

其中 λ_{F-P} 、 λ_B 分别为法布里-珀罗滤波器的单个透射中心波长和光栅的中心波长; $\Delta\lambda_{F-P}$ 、 $\Delta\lambda_B$ 分别为法布里-珀罗滤波器和光栅的 3 dB 带宽; T_{max} 、 R_{max} 分别为法布里-珀罗滤波器的峰值透射系数和光栅的峰值反射系数; I_0 为法布里-珀罗滤波器单个中心波长处的宽带光源入射光强。由(1)式可知当 λ_{F-P} 与 λ_B 相差较大时, I_{out} 较小,则不能在闭合腔中形成激光。

若光栅两侧至 C1 的光程差悬殊,则意味着该波长光波不满足环形镜的工作原理,因而耦合输出中将有一半能量的光束由隔离器(IS1)至耦合器 C2,再至掺铒光纤,形成环形共振。另一半能量的光波逆时针传播至 IS1 后,被其阻隔。若抽运光功率高于阈值,共振的结果将使 C2 输出端中出现对应波长的激光输出。其它波长的光波在左侧的环形腔中均沿逆时针传播,而被 IS1 阻隔。

改变法布里-珀罗滤波器的控制电压,使得透过波长与某一光栅工作波长一致,则可实现对应波长的激光输出。可见,调节法布里-珀罗的控制电压,便可实现对传感光栅的地址查询。

应变通过对光栅的机械拉伸和弹光效应,分别引起光栅常量和折射率的变化,从而引起光纤光栅反射波长 λ_B 发生漂移($\Delta\lambda$),对应的激光输出若用作非平衡扫描迈克耳孙干涉仪的输入,则 $\Delta\lambda$ 引起干涉仪输出的附加相移($\Delta\Phi$)可表示成^[10]

$$\Delta\Phi = -\frac{4\pi nL(1 - P_e)}{\lambda_B} \epsilon, \quad (2)$$

其中 ϵ 为作用于光栅上的待测应变, P_e 为光纤介质的有效弹光系数, L 为臂长差, n 为折射率。

由(2)式,可根据相位值的变化判断待测应变的大小,从而可实现对传感信号的解调。

3 实验结果

在图 1 所示装置中,980 nm 激光器的功率可达

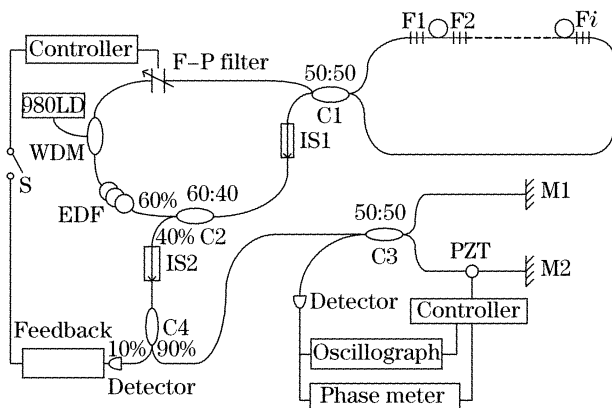


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

101 mW, 掺铒光纤长度为 25 m, 组成传感光栅串的 10 个光栅的布拉格波长依次为 1537.20, 1540.08, 1543.60, 1545.56, 1547.16, 1549.24, 1551.52, 1553.20, 1555.48, 1557.80 nm, 光栅的半宽约为 0.2 nm, 反射率为 80%~90%。隔离器 IS1 的插入损耗为 0.34 dB, 隔离度为 36.54 dB, 用于规定光在腔中顺时针循环; IS2 用于阻止光从干涉仪返回激光腔, 其插入损耗为 0.14 dB, 隔离度为 42 dB。光栅串中每个光栅两侧至 C1 的光程差远远大于各自所能产生干涉光的相干长度(11~12 cm), 以确保得到稳定的激光输出, 便于解调。

法布里-珀罗滤波器的自由光谱范围为 56.7 nm, 带宽为 66 pm。改变控制电压使其透过波长可在 1520~1570 nm 范围内调节, 当电压分别为 2.3 V, 2.8 V, 3.5 V, 3.8 V, 4.1 V, 4.5 V, 4.9 V, 5.2 V, 5.6 V, 6.0 V 时, 输出端依次观察到光纤光栅 F1、F2、...、F10 对应的布拉格波长激光输出, 阈值电流为 43.2~47.5 mA。图 2 为抽运功率等于 34 mW 时得到的 10 个光栅的激光光谱图, 各激光能量的差异主要与掺铒光纤对各光栅的中心波长处的增益、腔中损耗以及法布里-珀罗滤波器的透射率不同有关。如图 3 所示, 掺铒光纤的增益曲线在 1545 nm 后升高。

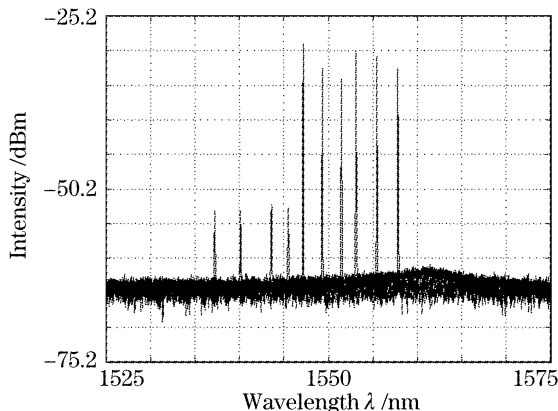


图 2 不同光栅的激光光谱图

Fig. 2 Laser spectra of various fiber Bragg gratings

为了追踪应变引起的光栅漂移波长, 引入耦合器 C4 提供反馈信号, 其耦合比为 10%, 设计的负反馈控制装置作用于法布里-珀罗滤波器的控制器。它使得控制器能自动调整控制电压的大小, 以便法布里-珀罗滤波器的透过波长能自动追踪所查传感光栅的工作波长。实验证实其追踪范围可覆盖法布里-珀罗的自由光谱范围。

将 3 dB 耦合器 C3 的两输出端与带尾纤的全反

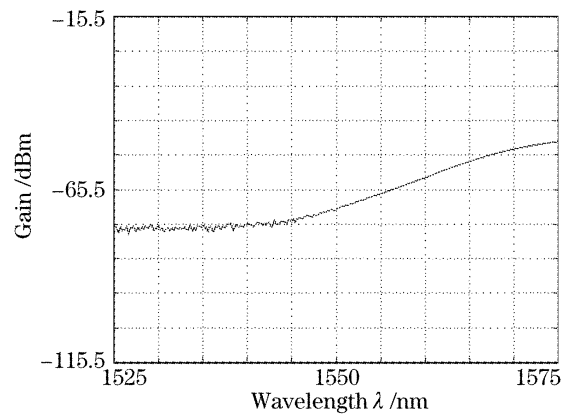


图 3 掺铒光纤的增益曲线光谱图

Fig. 3 Gain curve spectra of erbium-doped fiber

射镜相连, 让短臂缠绕在受锯齿波电压信号驱动的压电陶瓷(PZT)上, 驱动信号的频率为 70 Hz。构成非平衡迈克耳孙干涉仪的平均臂长为 106 cm, 臂长差 $L=3.2$ mm, 光纤介质的折射率 $n=1.4489$, 两端镜的反射率均接近 90%, 条纹的衬比度为 0.3。所用探测器工作波长范围为 800~1800 nm, 最佳响应波段为 1200~1650 nm, 增益为 10 dB。

对各传感地址查询和解调操作的一致性, 决定了系统能够对任一传感元(如 F10)位置的待测量进行监测及正常操作。S 断开时, 将法布里-珀罗滤波器的控制电压调到 6.0 V, 观察到有 1557.8 nm 波长的激光输出, 信噪比接近 30 dB。待测应变由步长为 $0.1 \mu\text{m}$ 的一维微位移器提供, 随着应变的增加或减小, 示波器上所示波形向左或向右平移(如图 4 所示), 该现象是由应变引起的波长漂移诱使干涉输出中出现附加相移所致。图中干涉信号上方的精细条纹乃所用环形腔自由谱宽和腔长引起的^[15], 不会影响干涉解调的结果。

相移值随待测应变变化关系的实验曲线如图 5 所示, 两者呈明显的线性关系, 线性拟合度高达 0.99786, 曲线斜率 $1.5835^\circ/10^{-6}\epsilon$ 为该装置的应变传感灵敏度。把 $P_e=0.22$ ^[16]、 λ_B 、 n 以及 L 的值代入(2)式可得理论曲线如图 5 中实线所示 ($\Delta\Phi=1.6662\epsilon$), 误差许可的范围内可认为两者基本一致。引起误差的可能原因为: 1) 引入的 P_e 值与作用光纤的实际值有出入; 2) 压电陶瓷的磁滞及光纤的粘贴端出现弛豫; 3) 传感光栅受温度及环境的影响。系统的分辨力主要取决于干涉仪两臂间光程差以及相位计的读数精度, 所用的干涉仪和相位计对应的传感分辨力为 $6 \text{ n}\epsilon$ 。

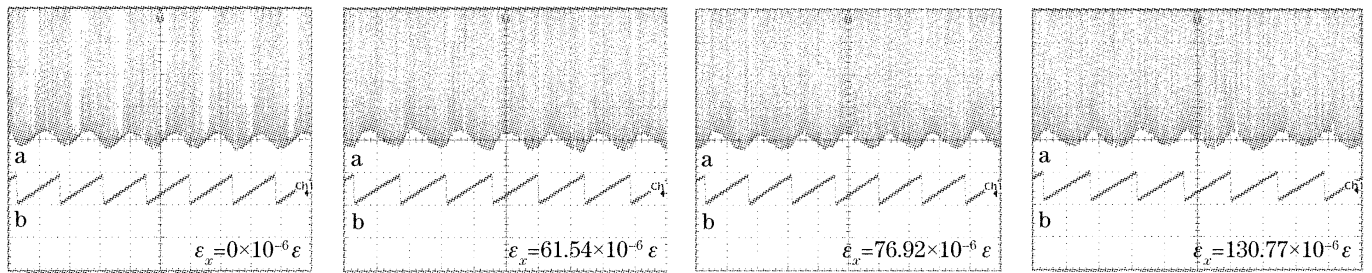


图 4 不同应力作用于 F_{10} 时对应的干涉仪输出。(横坐标: 10 ms/div; 纵坐标: a 为 20 mV/div, b 为 10 V/div.)

a 为干涉仪输出, b 为压电陶瓷驱动信号

Fig. 4 Output traces of the interferometer for different strain applied at F_{10} . (Horizontal scale is 10 ms/div, vertical scale: trace a is 20 mV/div, trace b is 10 V/div. Trace a, the output of the interferometer, trace b, PZT driving signal)

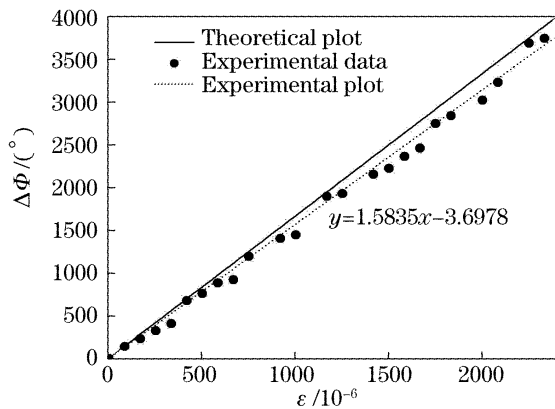


图 5 相移值与应变间关系曲线

Fig. 5 Relationship between phase shift $\Delta\Phi$ and strain ϵ

4 结 论

腔中接有级联光栅串的光纤环形镜充当环形腔光纤激光器的端镜,借助法布里-珀罗滤波器对传感光栅进行波长寻址,用非平衡的迈克耳孙干涉仪对传感信号进行解调,对待测应变成功地进行了监测,系统传感灵敏度的实验值为 $1.5835^\circ/10^{-6}\epsilon$ 。该装置原理简单、性能稳定、信噪比高、查询能力强,引入的反馈控制技术极大地拓宽了应变的监测范围,使其仅取决于光栅所在光纤的机械性能和光栅间的波长间隔,因而更具实用性。该技术可广泛应用于各工程结构特别是环形结构的健康监测。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Multiplexed fiber Bragg grating strain - sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1370~1372
- 2 D. A. Jackson, L. A. B. Ribeiro, L. Reekie *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14): 1192~1194
- 3 M. A. Davis, A. D. Kersey. Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10): 822~823
- 4 Yu Youlong, Tam Hwayaw, Ho Hoilut *et al.*. Time-domain addressing technique for a single-channel output and high-resolution fiber Bragg grating sensor system[J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2001, **21**(7): 874~877 (in Chinese)
- 余有龙,谭华耀,何海律等. 高分辨率单信道输出的光纤光栅传感系统时域地址查询技术[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7): 874~877
- 5 Yu Youlong, Liu Shenchun, Hwayaw Tam *et al.*. Time-domain addressing technique for fiber Bragg grating sensor system with the function of real-time monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 865~868 (in Chinese)
- 余有龙,刘盛春,谭华耀等. 具有实时监测能力的光纤光栅传感系统时域地址查询技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 865~868
- 6 Youlong Yu, Luenfu Lui, Hwayaw Tam *et al.*. Fiber laser based wavelength division multiplexed fiber Bragg grating sensor system[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(7): 702~704
- 7 Helin Wang, Weihong Bi, Aijun Yang *et al.*. Application of two-mode fiber in voltage sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 631~632
- 8 A. D. Kersey, W. W. Morey. Multi-element Bragg grating based fiber-laser strain sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(11): 964~966
- 9 A. D. Kersey, W. W. Morey. Multiplexed Bragg grating fiber-laser strain - sensor system with mode-locked interrogation[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1): 112~114
- 10 Yu Youlong, Tam Hwayaw, Chung Wenghong. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 987~989 (in Chinese)
- 余有龙,谭华耀,锤永康. 基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 987~989
- 11 Hao Zhang, Ling Yu, Yange Liu *et al.*. Wavelength-tunable erbium-doped fiber laser with FBG and HiBi fiber loop mirror as reflectors[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1): 9~11
- 12 D. B. Mortimore. Fiber loop reflectors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1217~1224
- 13 Wang Yiping, Li Anmin, Yun Bin Feng *et al.*. Fiber bragg grating sensor system based on virtual instrument and tunable laser technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1132~1135 (in Chinese)
- 汪弋平,李安民,恽斌峰等. 基于虚拟仪器和可调谐激光技术的光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1132~1135
- 14 Chen Changyong, Qiao Xueguang, Wang Xiaofeng *et al.*. Demodulation system for fiber Bragg grating sensors based on a real-time calibration technique[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(6): 825~828 (in Chinese)
- 陈长勇,乔学光,王小凤等. 基于实时校准技术的光纤光栅传感解调系统[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 825~828
- 15 Qian Jingren, Luo Jiatong, Yu Benli. Frequency filtering characteristics of active fiber ring resonators [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2003, **20**(1): 89~93 (in Chinese)
- 钱景仁,罗家童,俞本立. 有源光纤环形腔的频率滤波特性[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(1): 89~93
- 16 G. A. Ball, W. W. Morey. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6): 420~422