

基于强度检测的包层模谐振特种光纤传感系统

齐 博^{1,2} 庞拂飞^{1,2} 曹雯馨^{1,2} 陈振宜^{1,2} 王廷云^{1,2}

(¹ 上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室培育基地, 上海 200072)

² 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072

摘要 提出了一种基于强度检测的包层模谐振特种光纤传感系统。包层模谐振特种光纤是一种新型的传感元件, 对折射率和弯曲等物理量十分敏感。利用它的光谱滤波特性, 结合分布式反馈激光器的窄带光谱, 可将传感参量改变而引起的光谱移动, 最终转化为光强度的变化。在该传感系统中设置了参考光路, 抑制了光源波动对实验结果的影响。分析了传感系统中其他影响传感精度的因素。这种方法基于光强度的测量, 采用全光设计, 无需机械部件调谐, 具有方法简单、成本低廉等优点。通过实验, 实现了 0.0005 R. I. U. (单位折射率) 的解调精度。

关键词 光纤传感; 强度检测; 特种光纤; 包层模谐振

中图分类号 TN253; TP212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0505007

Cladding-Mode Resonance of Specialty Fiber Sensing System Based on Intensity Detection Method

Qi Bo^{1,2} Pang Fufei^{1,2} Cao Wenxin^{1,2} Chen Zhenyi^{1,2} Wang Tingyun^{1,2}

¹ Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network, Shanghai University, Shanghai 200072, China

² School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract A cladding-mode resonant specialty fiber sensor system is presented by using an intensity detection method. As a new type of fiber-optic sensor technology, the cladding-mode resonant fiber is sensitive to the measurands of the refractive index and bending. Based on the filtering transmission spectrum and narrow band distributed feedback laser, the variation of measurands can be transformed to intensity changes. In the proposed sensor system, a reference arm is added to reduce the affect of laser power fluctuation. The factors that affect the resolution are analyzed. This intensity-based all fiber demodulation technique has the advantages of low cost, simple configuration and requiring no mechanical adjustment. According to the experimental results of the refractive index sensor, a resolution of 0.0005 R. I. U. (refractive index unit) is achieved.

Key words fiber-optic sensing; intensity detection; specialty fiber; cladding-mode resonance

OCIS codes 060.2370; 120.0280; 060.2310; 120.2440

1 引 言

近年来,在传感器领域,光纤传感器具有体积小、质量轻、耐腐蚀和抗电磁干扰等独特优势而受到人们的极大关注^[1,2]。各种新型的光纤传感器相继出现,如光纤布拉格光栅(FBG)^[1~3]、长周期光纤光栅(LPG)^[4]、法布里-珀罗腔(F-P)^[5]、马赫-曾德尔

干涉仪(MZI)^[6]等。其中FBG与LPG需要用紫外曝光法或CO₂激光器在光纤纤芯中写入周期性波导^[7],制备过程较为复杂。而且,若要实现折射率(RI)传感,需要对FBG进行腐蚀或侧面抛磨处理,工艺控制难度较高;F-P型传感器制作容易,但其波长解调系统结构复杂且造价昂贵,为普及工业应用

收稿日期: 2010-12-07; **收到修改稿日期:** 2011-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(60807031)和上海市科委“科技启明星”(10QA1402600)资助课题。

作者简介: 齐 博(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: qibo2009@gmail.com

导师简介: 王廷云(1963—),男,博士后,教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: tywang@mail.shu.edu.cn

(通信联系人)

带来了一定的阻碍^[5];MZI型传感器能够获得极高的传感精度,但是对光源要求很高,并且容易受到环境的干扰^[2,6]。

本文提出了一种新型的光纤传感器,传感头为包层模谐振特种光纤。它由改进化学气相沉淀(MCVD)技术制备而成,具有结构简单、成本低、制备工艺成熟等优点。上海大学庞拂飞等^[8~10]提出将这种结构的光纤应用到弯曲、温度及RI传感等领域,已经获得了很好的实验结果。目前,上述传感技术研究都是通过光谱仪(OSA)扫描光谱来解调传感信号的,这种方法解调速度慢,成本极高。本文利用光强度直接检测的方法解调传感信号,其方法简单、成本低廉,在FBG和LPG等传感器领域已得到广泛的应用^[11,12]。将此方法应用于本系统,能够保证在较低成本下获得较高的传感精度,使本系统具有更广泛的应用价值。

2 包层模谐振特种光纤原理

传感头结构如图1所示,在普通单模光纤之间焊接一定长度的包层模谐振特种光纤。与单模光纤相比,包层模谐振特种光纤有着3层结构——芯层、内包层以及外包层,如图2所示。可以将其等效成两个同轴的光纤波导——心波导和环波导,两光波导中分别传输纤芯模式和包层模式^[10,13]。由于两波导间距非常小,根据耦合模理论,纤芯模式和包层

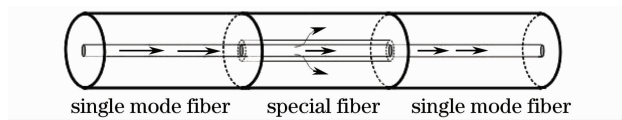


图1 传感头示意图

Fig. 1 Schematic drawing of sensor head

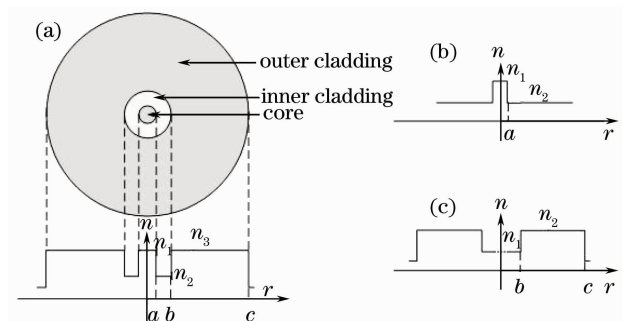


图2 (a)包层模谐振特种光纤 RI 分布,(b)芯波导, (c)环波导

Fig. 2 (a)RI profile of cladding-mode resonance of specialty optical fiber, (b) core waveguide, (c) tube waveguide

模式之间将发生渐逝波耦合,当满足相位匹配条件时,芯层中的光将会耦合到外包层中传播,发生包层模谐振现象。此时,其传输特性如图3中实线所示,谐振峰为1472 nm,光谱对比度为18 dB。由于包层模在外界存在渐逝波,其相位对外界 RI 变化非常敏感。此外,波导结构、温度等能够影响相位匹配的因素最终也会导致传输特性的变化。文献^[10]中指出,随着外界 RI 增加,传输光谱将有规律地向长波方向移动。

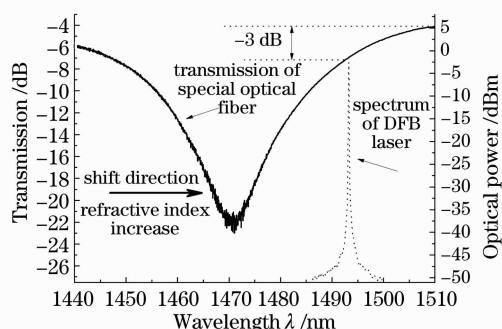


图3 边沿滤波效应示意图

Fig. 3 Sketch graph of the edge filter

3 包层模谐振特种光纤传感系统

图4为包层模谐振特种光纤 RI 传感示意图。图中分布反馈(DFB)激光器光源为155 Mb/s 光纤传输系统中所用的光发送模块,输出波长在1493 nm左右,3 dB带宽1 nm,输出功率1 mW,其光谱如图3中虚线所示。由图3可知,DFB激光器中心波长刚好位于其右边沿下降约3 dB的位置,此处在线性坐标下斜率最大,能够获得最高的传感精度^[14]。

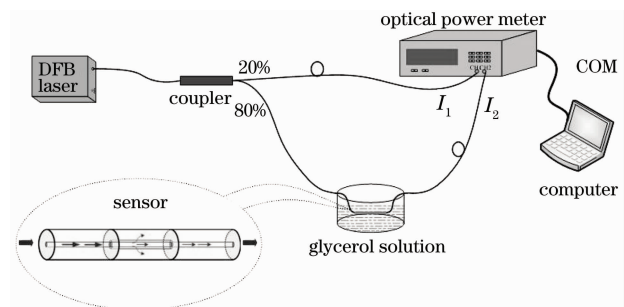


图4 RI 传感系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of RI sensing system

传感系统中,DFB激光器发出的窄带光谱经2:8耦合器后,20%一路光束作为参考信号光,以补偿光源波动对实验结果的影响。80%一路作为传感信号光,通过包层模谐振特种光纤传感头后到达光功率检测设备。将传感头置于不同 RI 的甘油溶液

中,两路光束到达光功率计后,通过串口(COM),用电脑同时记录两路功率值。

4 实验原理

基于强度检测的传感信号解调原理如图3所示,它利用了传感头的边沿滤波效应。由于DFB激光器输出功率对温度非常敏感^[15],假设不同温度下,其光功率谱密度函数为 $P(\lambda)\alpha(T)$, $\alpha(T)$ 为DFB激光器输出功率的温度系数。传感头的传输函数为 $H(\lambda,r)$, r 为甘油溶液的RI。因此,信号光路光功率强度 I 可表示为

$$I = f(T,r) = \int_{-\infty}^{\infty} 0.8\alpha(T)P(\lambda)H(\lambda,r)d\lambda, \quad (1)$$

传感信号光进入传感头之前的光功率为参考光路的4倍

$$I_0 = f_0(T) = 4 \times \int_{-\infty}^{\infty} 0.2\alpha(T)P(\lambda)d\lambda, \quad (2)$$

计算 I/I_0 的值

$$f_{\text{ratio}} = \frac{I}{I_0} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} 0.8\alpha(T)P(\lambda)H(\lambda,r)d\lambda}{4 \times \int_{-\infty}^{\infty} 0.2\alpha(T)P(\lambda)d\lambda} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda)H(\lambda,r)d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda)d\lambda}. \quad (3)$$

假设DFB激光器的光谱范围为 $[\lambda_1, \lambda_2]$,由图3可知,此范围远小于传输函数 $H(\lambda,r)$,因此,(3)式可近似为

$$f_{\text{ratio}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} H(\lambda,r)d\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda)d\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} H(\lambda,r)d\lambda = F(r), \quad (4)$$

(4)式表明, f_{ratio} 与 r 存在一定的函数关系,且做比值后,抑制了DFB激光器的输出功率不稳定性对实验结果的影响。由于随着 r 的增加, $H(\lambda)$ 向长波方向移动,因此 $F(r)$ 即是在 $H(\lambda)$ 上不同波长区间内的积分值。由于在线性坐标下, $H(\lambda)$ 右边带近似线性,积分后, f_{ratio} 值与 r 将接近二次函数关系。

5 实验结果及分析

按照图4搭建了折射率传感系统,将传感头依次置于12组不同浓度的甘油水溶液中,其RI均用阿贝折射率仪进行了精确标定。相邻两组溶液RI差约0.005单位折射率(R. I. U.),RI范围为1.3380~1.4101 R. I. U.。每次测试之前,将传感头清洗干净。测试过程中,保证传感头处于拉直状态,以防止传感头弯曲造成滤波边沿漂移^[8]。每次实验,将传感头置于甘油溶液中1 min,待溶液完全浸润特种光纤表面后,记录信号光路光功率值 I_1 和参考光路光功率值 I_2 ,根据(3)式求得不同 r 时对应的 f_{ratio} 值。实验结果如图5所示。图中实线为二次曲线拟合结果。拟合方程为

$$f_{\text{ratio}} = -15.453r^2 + 40.352r - 26.075. \quad (5)$$

根据(5)式以及实验过程中观察到的 f_{ratio} 波动情况,可以推算出此传感系统的RI传感精度约为0.0005 R. I. U.,在实际应用中,可以将观察到的 f_{ratio} 值代入方程,求解RI大小 r 。

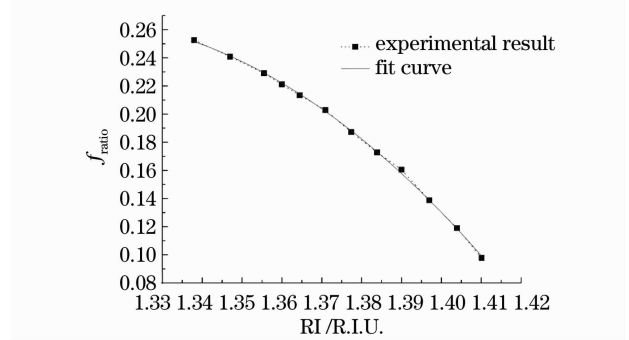


图5 两路光功率比值与折射率关系

Fig. 5 f_{ratio} of two channels' optic power versus RI variation

图6为RI逐渐增加和减小时的两次实验结果对比,发现两次实验结果基本吻合,说明传感系统具有良好的重复性。

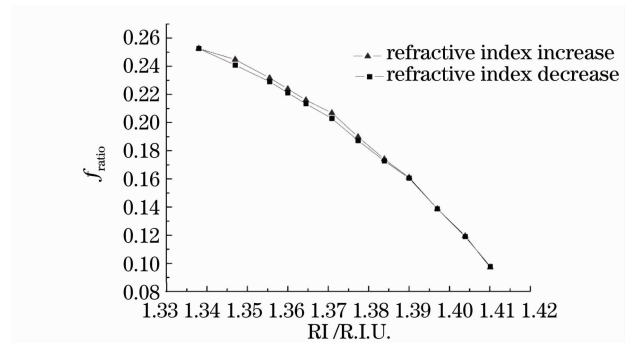


图6 RI传感系统的重复性

Fig. 6 Repeatability of RI sensing system
实验系统中设置了参考光路,基本消除了DFB

激光光源波动对实验结果的影响,但仍有两个因素影响了系统的传感精度:

1) 2:8耦合器分光比不稳定。由于DFB激光光源发出的光具有一定偏振性,光束经过一段光纤传播,进入耦合器之前其偏振态并不确定,而耦合器本身对偏振存在敏感性^[16,17],因此其分光比将会随机波动。

2) DFB激光器中心波长易受温度影响^[14]。由传感头的滤波特性可知,若DFB激光器中心波长发生漂移,传感信号光强度会发生明显变化,而参考光路基本不变。另外,耦合器分光比也存在波长敏感性。这些因素都将影响传感系统的精度。

为了估算以上两种因素对传感精度造成的误差,对RI为1.3380 R. I. U.的甘油溶液进行了10次重复实验。图7为实验测得的折射率 r 与真实折射率差值分布情况。从图中可以看出,RI误差为 ± 0.00025 R. I. U.。由图5可知,折射率 r 越小,同样大小的 f_{ratio} 波动造成的RI误差越大。因此,选用折射率最小的甘油溶液所得误差结果,即是以上两因素导致的最大误差。使用偏振不敏感性耦合器,在耦合器输入端增加退偏装置^[16],制作温度控制电路,使DFB激光器工作在恒温环境中,并且采用更高精度和更高稳定度的光电检测设备能减小上述误差,提高系统精度。

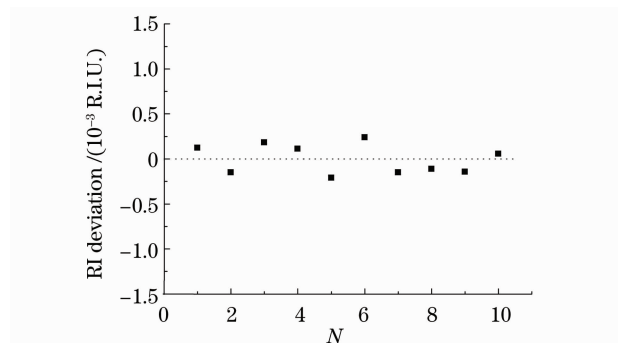


图7 $r=1.3380$ R. I. U. 时的实验结果偏差

Fig. 7 Refractive index deviation at $r=1.3380$ R. I. U.

6 结 论

以DFB激光器作为光源,以包层模谐振特种光纤作为传感器件,使用强度检测的方法,实现了0.0005 R. I. U.的RI解调精度。系统中设置了参考光路,抵消了光源波动对实验结果的影响。分析了影响系统精度的主要因素。系统采用的是强度直接探测的方式,如果采用锁相的方式将会进一步提高系统的稳定性和传感精度。制作滤波边沿斜率更

大的包层模谐振特种光纤传感头也会获得更好的实验结果。系统采用全光结构设计,无需机械部件调谐,方法简单、成本低廉,相信一定会有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 K. T. V. Grattan, Dr. T. Sun. Fiber optic sensor technology: an overview[J]. *Sensors and Actuators*, 2000, **82**(1-3): 40~61
- 2 Clay K. Kirkendall, Anthony Dandridge. Overview of high performance fiber-optic sensing [J]. *Institute of Physics Publishing*, 2004, **37**(18): R197~R216
- 3 Guan Baiou, H. Y. Tam, S. L. Ho *et al.*. Study on strain/temperature two parameters sensing with a single fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4): 372~374
关柏鸥, H. Y. Tam, S. L. Ho 等. 单光纤光栅温度应变双参数传感研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4): 372~374
- 4 Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a long-period fiber grating with rotary refractive index modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1129~1133
宋 韵, 朱 涛, 饶云江 等. 旋转应变型长周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1129~1133
- 5 Zhang Guiju, Yu Qingxu, Song Shide. Fiber optic temperature sensor based on F-P cavity interferometric/intensity modulation mechanism[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 228~231
张桂菊, 于清旭, 宋世德. 基于F-P腔的干涉/强度调制型光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 228~231
- 6 Ge Qiang, Xu Changchun, Wu Xuqiang *et al.*. Two noise reduction methods in interferential optical fiber sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 726~728
葛 强, 徐长春, 吴许强 等. 干涉型光纤传感器中的双重降噪方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 726~728
- 7 Wang Yiping, Chen Jianping, Rao Yunjiang. Study on torsion characteristic of novel long-period fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1091~1096
王义平, 陈建平, 饶云江. 新型长周期光纤光栅的扭曲特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1091~1096
- 8 Fufei Pang, Wenbin Liang, Wenchao Xiang *et al.*. Temperature-insensitivity bending sensor based on cladding-mode resonance of special optical fiber[J]. *Photonics Technology*, 2009, **21**(2): 76~78
- 9 Fufei Pang, Wenchao Xiang, Hairun Guo *et al.*. Special optical fiber for temperature sensing based on cladding-mode resonance [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12967~12972
- 10 Fufei Pang, Huanhuan Liu, Na Chen *et al.*. Cladding-mode resonance of a double-cladding fiber at a near modal cut-off wavelength for RI sensing [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2010, **21**(9): 1~5
- 11 R. W. Fallon, L. Zhang, L. A. Everall *et al.*. All-fibre optical sensing system: Bragg grating sensor interrogated by a long-period grating [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(12): 1969~1973
- 12 Li Jingyi, Rao Yunjiang, Niu Yongchang *et al.*. A strain sensing system based on the novel long-period fiber grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 431~433
李景义, 饶云江, 牛永昌 等. 基于新型长周期光纤光栅的低成本应变传感系统[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 431~433
- 13 A. C. Boucouvalas. Coaxial optical fiber coupling [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(5): 1151~1158
- 14 Francisco M. Araujo, Luis A. Ferreira, José L. Santos *et al.*. Demodulation scheme for fiber Bragg grating sensors based on active control of the spectral response of a wavelength division

- multiplexer[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(34): 7940~7946
- 15 Lian Shanyan, Anlin Yi, Wei Pan. A simple demodulation method for FBG temperature sensors using a narrow band wavelength tunable DFB laser[J]. *Photonics Technology*, 2010, **22**(18): 1391~1393
- 16 Ginu Rajan, Yuliya Semenova, Gerald Farrel *et al.*. A low polarization sensitivity all-fiber wavelength measurement system [J]. *Photonics Technology*, 2008, **20**(17): 1464~1466
- 17 G. Rajan, Q. Wang, Y. Semenova *et al.*. Effect of polarisation-dependent loss on the performance accuracy of a ratiometric wavelength measurement system [J]. *Optoelectronics*, 2008, **2**(2): 63~68