

文章编号: 0258-7025(2010)05-1294-04

一种高灵敏度浓度传感解调技术

赵洪霞 丁志群 王金霞 方晓惠 贾 辉 鲍吉龙

(宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016)

摘要 长周期光纤光栅(LPFG)传感器具有非常广泛的应用价值,低成本、高精度解调技术是实用化的关键。利用全反射特性的光纤环形镜和 2 根 LPFG 构成干涉仪,采用法布里-珀罗(F-P)可调滤波器对某级干涉小峰进行波长扫描,借助探测器和示波器对信号光波在驱动信号周期内所形成的两负脉冲间隔进行测量,实现信号解调。利用此系统对质量浓度从 0 到饱和的蔗糖溶液进行测量,测得系统传感灵敏度的实验值为 $0.04 \text{ ms} \cdot \text{L} / \text{g}$ 。

关键词 传感技术;解调;长周期光纤光栅;光纤环形镜;F-P 可调滤波器

中图分类号 TN253;TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1294

A High Sensitivity Concentration Sensing Demodulation Technique

Zhao Hongxia Ding Zhiqun Wang Jinxia Fang Xiaohui Jia Hui Bao Jilong

(Electronic and Information Engineering College, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China)

Abstract There are wide range of potential applications about long period fiber grating (LPFG), in order to utilize LPFG as sensing element, it is necessary to develop low cost and high precision wavelength demodulation schemes. An high sensitivity technique for LPFG sensor signal demodulation is introduced. A interferometer based on fiber ring mirror and two LPFGs are designed, the wavelength-shift of sensor grating affected by the measured concentration is converted into variation of time-interval between negative-going pulses that is scanning by F-P tunable filter controlled by PZT. The experiment results show that the sensing sensitivity of this system is $0.04 \text{ ms} \cdot \text{L} / \text{g}$, with the sucrose solution concentration being from 0 to saturated.

Key words sensor technique; demodulation; long period fiber grating; fiber ring mirror; F-P tunable filter

1 引 言

自从 1995 年 V. Bhatia 等^[1]在光纤中成功地写入长周期光纤光栅(LPFG)以来,有关 LPFG 在传感方面^[2~5]的研究引起了学者们的广泛关注。LPFG 把纤芯中传输的基模能量耦合到同向传输的包层模中损耗掉,因此它的透射光谱极易受包层和周围环境的影响,这一特点使其比光纤布拉格光栅具有更大的浓度测量灵敏度。但长周期光纤光栅透射谱存在多个透射峰且谱宽较宽,其传感解调技术不成熟,解调精度也有待提高。

光谱仪是实验室中常用的检测 LPFG 传感信号的仪器,由于光谱仪过于昂贵,使得 LPFG 传感系统难以普及。发展成本低、结构简单和高精度的解调技术是 LPFG 传感系统走向实用化的关键。本文利用光纤环形镜和 2 根完全相同的 LPFG 构成

干涉仪,引入受压电陶瓷(PZT)驱动的 F-P 可调滤波器,扫描选定的干涉小峰,借助探测器和示波器观测来自此级干涉小峰光波经滤波后的功率谱,通过分析同一扫描周期内 2 个负脉冲在时域中间隔的变化来确定待测溶液浓度的变化。该解调方案结构简单、操作便捷、精度高,对长周期光纤光栅传感器实用化具有重要的现实意义。

2 理论分析

由 2 个完全相同的 LPFG 级联可得干涉谱^[6],干涉峰之间的距离和精细度与光栅个数有关,光栅个数越多,相邻干涉小峰间距越大,同时精细度越高。为了减小 LPFG 的个数,降低成本,且得到一定动态范围和带宽窄的干涉峰, N 个完全相同的 LPFG 和全光纤反射镜构成干涉仪,如图 1 所示,此

收稿日期: 2009-09-02; 收到修改稿日期: 2009-10-12

基金项目: 宁波市自然科学基金项目(2009A610067)资助课题。

作者简介: 赵洪霞(1970—),女,副教授,主要从事光纤激光器和光纤传感方面的研究。E-mail: zhx-1228@163.com

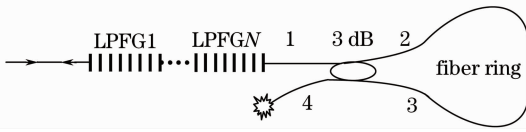


图 1 干涉仪结构示意图

Fig. 1 Scheme of interferometer

结构相当于 $2N$ 个 LPFG 级联。

根据模式耦合理论,同向传输的纤芯基模和第 m 次包层模经历一个长度为 d 的 LPFG 后再经历长度为 L 的光纤传输后纤芯基模和包层模的幅值为^[7]

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} \exp[j(\beta_{co} - \beta_{cl}^m)L/2] & 0 \\ 0 & \exp[-j(\beta_{co} - \beta_{cl}^m)L/2] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{co}(d+L) \\ a_{cl}^m(d+L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{co}(0) \\ a_{cl}^m(0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} t & r \\ r & t^* \end{bmatrix}$, a_{co} 和 a_{cl}^m 为纤芯基模和第 m 次包层模的幅值; β_{co} 和 β_{cl}^m 为纤芯基模和第 m 次包层模的传输系数; t 和 r 分别为 LP_{01} 和 LP_{0m} 模的透射系数, 可计算为

$$t = \exp\left(j \frac{\varphi}{2} d\right) \left[\cos(sd) + j \frac{\Delta\beta^m}{2s} \sin(sd) \right], \quad (2)$$

$$r = \exp\left(j \frac{\varphi}{2} d\right) \frac{jk}{s} \sin(sd), \quad (3)$$

式中

$$s = (k^* k + \frac{\Delta\beta^{m^2}}{4})^{1/2}, \quad (4)$$

$$\Delta\beta^m = \beta_{co} - \beta_{cl}^m - \frac{\pi}{\Lambda}, \quad (5)$$

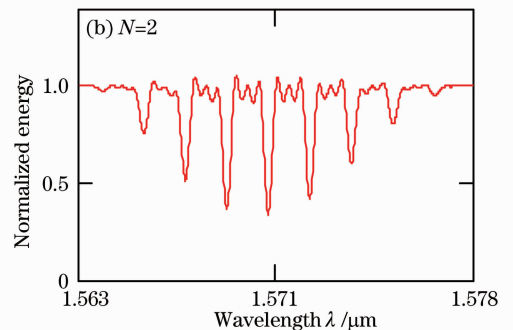
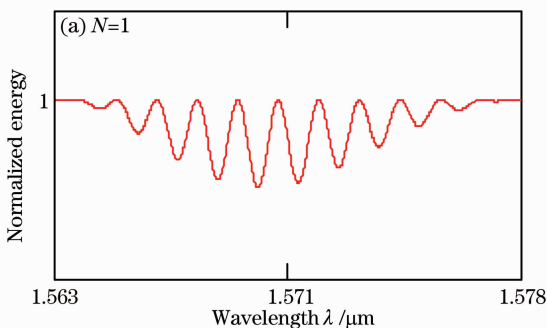


图 2 干涉结构透射谱

Fig. 2 Transmission spectrums of the interferometer

3 实验结果

实验装置如图 3 所示,宽带光源 SLED 发出的

$$\varphi = \frac{2\pi}{\Lambda}. \quad (6)$$

而根据文献[8]光纤环形镜的传输矩阵为

$$2j \sqrt{\alpha(\alpha-1)} \times \begin{bmatrix} \exp[j(\beta_{co} - \beta_{cl}^m)L'/2] & 0 \\ 0 & \exp[-j(\beta_{co} - \beta_{cl}^m)L'/2] \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 α 为耦合器的耦合比, L' 为光纤环长度。

最后得入射光波按图 1 所示的结构第二次经过 LPFG1 后纤芯基模和包层模的幅值为

$$\mathbf{M} = 2j \sqrt{\alpha(\alpha-1)} \times \begin{bmatrix} \exp[j(\beta_{co} - \beta_{cl}^m)NL] & 0 \\ 0 & \exp[-j(\beta_{co} - \beta_{cl}^m)NL] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp[j(\beta_{co} - \beta_{cl}^m)L'/2] & 0 \\ 0 & \exp[-j(\beta_{co} - \beta_{cl}^m)L'/2] \end{bmatrix} \mathbf{A}^{2N} \times \begin{bmatrix} a_{co}(0) \\ a_{cl}(0) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

为了方便分析级联长周期光纤光栅透射谱,在讨论中均设光栅周期 $\Lambda = 450 \mu\text{m}$; $\lambda_D = 1.57 \mu\text{m}$; $k = \pi/(6d)$; $\alpha = 0.5$; $L = 0.2 \text{ m}$; $L' = 0.3 \text{ m}$; $d = 0.05 \text{ m}$, 分别取 $N = 1$ 和 $N = 2$ 得图 2 所示的干涉结构透射谱。

图 2(a) 为 $N = 1$ 时的透射谱,图 2(b) 为 $N = 2$ 时的透射谱。由图可知,LPFG 透射谱被干涉峰调制,随着光栅个数的增多,相邻干涉小峰间距增大,精细度增高。并且 4 个 LPFG 级联后相邻主峰之间存在 2 个次峰。因为纤芯基模和包层模在 2 个 LPFG 和 1 个光纤环型镜构成系统中的干涉过程类似于 4 光束干涉,所以相邻主峰之间存在 2 个次峰。

光波经环行器的 1 端进入,2 端输出,传到 LPFG1 满足相位匹配条件的光波部分耦合到包层,两路光

分别经长度为 L 的光纤传输后,包层光波部分耦合回 LPFG2 与纤芯模干涉,干涉光波经全光纤环形镜反射后再次经过两个光栅后,干涉谱经环形器的 3 端输出,传至受压电陶瓷驱动的 F-P 可调滤波器,滤波后的光波由光电探测器接收,被转变为电信号。当 F-P 可调滤波器的输出光波扫过携带待测参量

的干涉小峰与之交迭时,探测器接收的光强大为减弱,假如 PZT 的驱动电压有足够的幅值,在三角波的驱动下,1 个周期内,功率谱曲线上将形成 2 个负脉冲。通过观测 2 个负脉冲在时域中间隔的变化,可实现溶液浓度的测量。

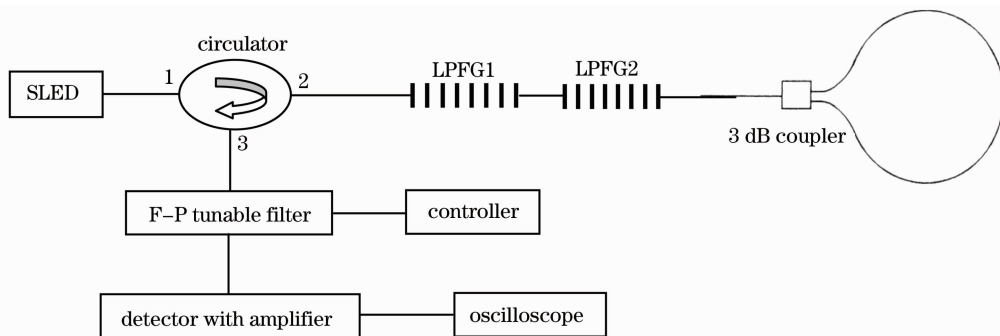


图 3 实验装置图

Fig. 3 Scheme of experimental setup

实验中所用的 2 个长周期光纤光栅是利用周期为 $450\ \mu\text{m}$ 的不锈钢幅度模板, B-Ge 共掺单模光纤在 $248\ \text{nm}$ 准分子激光照射下制成的。光栅长度和耦合强度分别为 $3\ \text{cm}$ 和 $\pi/3$, 在室温且不弯曲不受力情况下的透射谱谐振波长为 $\lambda = 1498.96\ \text{nm}$ 。

120 Hz。

光波经探测器(New Focus 2011)光电转换和放大器增益设置为 $165\ \text{V/mW}$, 放大处理后, 由示波器检测到扫描周期内 2 个负脉冲在时域中间隔随溶液浓度变化, 如图 5 所示。

干涉谱如图 4 所示。两光栅间的距离及 LPFG2 末端与 3 dB 耦合器的距离都为 $23\ \text{cm}$, 全光纤反射环的长度为 $32\ \text{cm}$ 。

由图 6 可知, 时间间隔随浓度变化非常有规律, 基本上是按照一个二次曲线向长间距方向移动。当

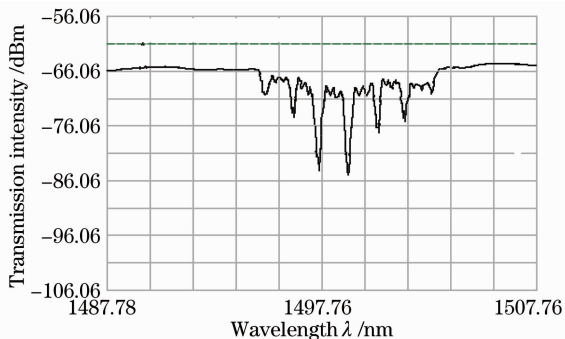


图 4 干涉结构透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of the interferometer

利用光纤环中间的一段作为传感头, 检测蔗糖溶液浓度。为防止光栅弯曲的影响, 用夹持器固定好耦合器和 LPFG1 与环形器之间的光纤, 并稍加应力使其成直线。

所用 F-P 可调滤波器是 micron optics C 波段的 FFP-TF2, 其干涉结构的第 4 个小峰的波长为 $1498.73\ \text{nm}$, 带宽为 $0.24\ \text{nm}$, 波长变化范围为 $1498.26 \sim 1499.90\ \text{nm}$, 由此确定 F-P 可调滤波器的电压变化范围为 $6.7 \sim 18.9\ \text{V}$, 电压频率为

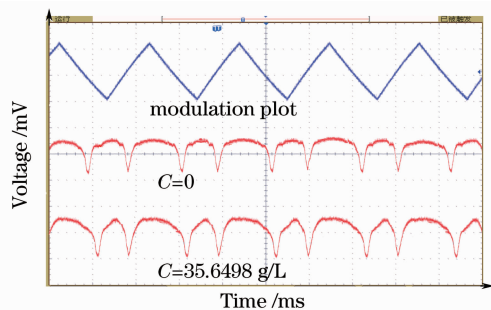


图 5 不同质量浓度下的输出

Fig. 5 Output power with different concentrations

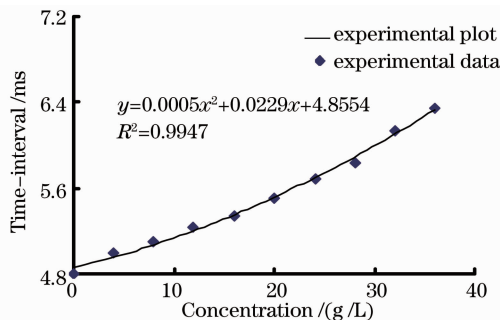


图 6 溶液质量浓度与时间间隔之间的关系曲线

Fig. 6 Plot between concentration and time-interval

蔗糖溶液的质量浓度从 0 变为饱和时,时间间距变化了 1.5 ms,浓度测量灵敏度可达 $0.04 \text{ ms}\cdot\text{L}/\text{g}$,此实验结果具有很好的可重复性,与阿贝折射仪测得的结果相比最大偏差为 0.002。根据所测得的时间间隔变化,可确定 LPFG 周围溶液浓度的大小。

系统传感分辨率主要取决于干涉小峰带宽和探测器的响应特性,干涉小峰的带宽越窄,探测器的响应频率越高,分辨率越高。

4 结 论

利用时域脉冲间隔对长周期光纤光栅波长信号进行解码,为了克服单个 LPFG 带宽的不足,采用 2 个 LPFG 与光纤环形镜结合,相当于 4 个 LPFG 级联,此方案不仅可以避免制作完全相同的 LPFG 的困难,而且降低了 LPFG 的带宽,从而增大了系统传感灵敏度。利用此系统成功地对蔗糖溶液浓度进行了感测,该系统浓度传感灵敏度的实验值为 $0.04 \text{ ms}\cdot\text{L}/\text{g}$ 。实验中用普通示波器进行信号分析,对工作环境要求不高,比较实用。

参 考 文 献

- 1 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694
- 2 Liao Xian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous

- measurement of high-temperature and strain using a combined long-period fiber grating/Fabry-Pérot sensor fabricated by laser pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 884~888
- 廖 弦, 饶云江, 冉曾令等. 激光脉冲制作的长周期光纤光栅/法布里-珀罗高温-应变组合传感器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 884~888
- 3 Yan Jinhua, Jing Meng. A high-sensitivity refractive-index sensor using LPG[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(2): 178~190
- 严金华, 姜 萌. 一种基于 LPG 的高灵敏度折射率传感器[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(2): 178~190
- 4 Gu Zhengtian, Xu Yanping, Deng Chuanlu. Dual-peak resonance and transmission spectrum in coated long-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 219~225
- 顾铮先, 徐艳平, 邓传鲁. 表面镀膜长周期光纤光栅双峰谐振及其透射谱研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 219~225
- 5 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 赵洪霞, 鲍吉龙, 陈 莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 6 J. H. Lim, H. S. Jang, H. S. Lee. Mach-Zehnder interferometer formed in a photonic crystal fiber based on a pair of long-period fiber gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4): 346~348
- 7 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Zhu Tao. Theory and Applications of Fiber Gratings[M]. Beijing: Science Press, 2006. 272~273
- 饶云江, 王义平, 朱 涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 272~273
- 8 Wu Chongqing. Theory of Optical Waveguide [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 210~212
- 吴重庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 210~212