

文章编号: 0258-7025(2010)08-2001-04

基于白光干涉的新型微纳光纤传感器

赵浙明¹ 吴平辉^{2,3} 隋成华³

(¹ 嘉兴学院机电工程学院, 浙江 嘉兴 314001; ² 湖州师范学院理学院, 浙江 湖州 313000)
³ 浙江工业大学激光与光电子技术研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要 提出一种基于白光干涉原理的新型微纳光纤传感器, 并利用该传感器测量不同浓度的葡萄糖溶液引起的折射率的微小变化, 通过数值求解麦克斯韦方程获得微纳光纤信号光的相位变化与外界溶液的折射率变化关系。实验测量结果证明利用该传感器获得的测量值与理论值基本一致。所设计的传感器具有灵敏度高、结构紧凑、易于和其他光电器件集成等优点。

关键词 传感器; 微纳光纤; 白光干涉; 折射率; 灵敏度

中图分类号 TN253; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.2001

A Novel Microfiber Sensor Based on White Light Interferometer

Zhao Zheming¹ Wu Pinghui^{2,3} Sui Chenghua³

¹ Mechanical & Electrical Engineering College, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China

² School of Science, Huzhou Teachers College, Huzhou, Zhejiang 313000, China

³ Institute of Laser and Optoelectronic Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract A novel refractometric sensor used to measure the refractive indices of glucose solutions of different concentrations using microfiber is presented. In addition, by solving Maxwell equations and numerical calculations, phase shift of microfiber caused by index change of ambient medium is obtained. Experimental results show that the measured values are in close agreement with the theoretical values. The sensor demonstrated here is featured with high sensitivity, compact size, and easy integration with the optoelectronic devices.

Key words sensors; microfiber; white light interferometer; refractive index; sensitivity

1 引 言

同电子器件一样, 光子器件也必然要经历微型化和集成化的发展过程。通过减小器件的尺寸, 这些微型光学器件呈现出了很多肉眼无法观测到的物理现象。纳米光子学就是这样一门以微光子为基础的新型前沿学科。其中微纳光纤作为微光子器件的基本结构单元, 因为具有小尺寸、易裁剪、低损耗和强倏逝波传输等优良特性而受到越来越多的关注^[1~8]。J. Hecht^[9]指出具备亚波长光学新概念的

近场光学成像、表面等离子体激元天线、负折射率透镜和纳米光纤研究已成为光子学前沿的研究热点。J. Giles^[10]指出纳米线和纳米光纤已经成为当前物理学的五大研究热点之一。随着纳米技术的快速发展, 特别是纳米技术与化学、生物、医学和光子技术等有机结合和大范围应用, 急需设计新型结构紧凑、灵敏度较高的传感器用于检测各种生物、化学样品^[11~17]。基于微纳光纤的光学传感器在这方面拥有广阔的应用前景, 它们除了具备传统光纤传感器

收稿日期: 2010-02-02; 收到修改稿日期: 2010-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(60777034)资助课题。

作者简介: 赵浙明(1982—), 男, 硕士研究生, 助教, 主要从事光电子器件、光纤技术及其应用等方面的研究。

E-mail: planck.zhao@yahoo.com.cn

导师简介: 隋成华(1956—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤传感器及光电信息处理系统的开发与应用等方面的研究。

E-mail: suich@zjut.edu.cn(通信联系人)

的优点,诸如高灵敏度、快响应度、不受电磁干扰以及在易燃易爆环境中可以安全工作外,还具有结构紧凑、成本低和对样品需求量少等优势。

本文基于白光干涉原理,提出一种新型微纳光纤传感器,该系统可以检测各种生物或化学试剂折射率的微小变化。

2 实验原理及设计

光纤白光干涉测量技术是一种采用低相干、宽光谱光源的光纤传感技术。相对传统的光干涉,例如迈克尔孙干涉、法布里-珀罗干涉和马赫-曾德尔干涉等,光纤白光干涉因为具有可测量绝对光程、系统抗干扰能力强、结构简单和相干长度较短的光源即可产生干涉等优点,在最近几年得到快速发展并在各个领域中获得广泛应用。

基于光纤白光干涉原理,构建的传感器系统如图 1 所示。系统由 1 个超辐射发光二极管(SLD,中心波长为 1310 nm,谱宽 45 nm,最大输出功率 $50 \mu\text{W}$)光源,1 个隔离器,1 个 3×3 光纤耦合器,1 个 2×2 光纤耦合器,2 个 InGaAs 型 PIN 光电探测

器,1 个流水槽,1 面反射镜,1 段光纤延迟线,1 段微纳光纤及其他引导光纤组成。在图 1 中,稳定光源 SLD 发出的激光通过隔离器,经 3×3 耦合器分成两路,一路光经延迟线后进入 2×2 耦合器,另一路光直接经直通光纤进入 2×2 耦合器。经过 2×2 耦合器的光通过微纳光纤后被反射镜反射,反射光沿两路返回 3×3 耦合器。由于传输路径的不同,共形成 4 条不同传输方式的光束,分别为:

- (1)1-4-6-8-9-10-9-8-6-4;
- (2)1-4-6-8-9-10-9-8-7-5;
- (3)1-5-7-8-9-10-9-8-6-4;
- (4)1-5-7-8-9-10-9-8-7-5。

在 4 条光束中,由于光纤延迟线的长度要远远大于激光器的相干长度,所以仅有光束(2)和(3)能够形成稳定干涉,输出两路干涉信号至 PIN1 和 PIN2,其余光束形成直流信号。光电探测器 PIN 采集得到的干涉光信号在转换成电信号后由 National Instrument 公司的 DAQ 采集卡将数据采集到计算机内,并用自编 Labview 程序实现信号解调处理。

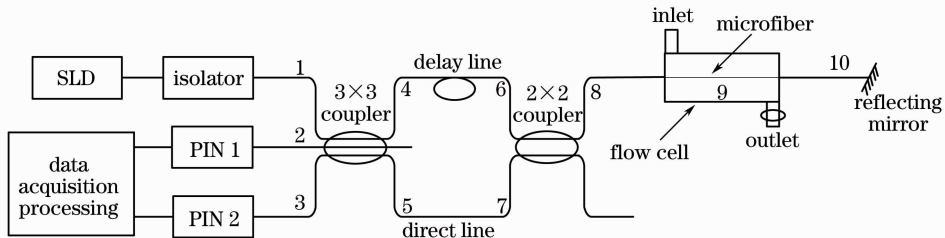


图 1 微纳光纤传感器结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensor

相对传统光纤作为传感臂,微纳光纤由于具有更大比例倏逝波传输特性使其对外界环境折射率变化更加灵敏,因此,微纳光纤也更适合作为高灵敏传感器中的传感元件^[18~20]。微纳光纤的传感原理如图 2 所示,如果在光纤的一端输入信号光,当微纳光纤所处的外界环境折射率发生微小变化时,将会引起信号光的传播常数发生改变,进而导致信号光相位的变化($\Delta\Phi$),通过检测另一端输出光的强度或相

位等参量的变化,就可以获得被测溶液的相关信息,达到传感作用。

3 实验及结果

为了验证所设计传感器系统的可行性,在实验中,利用上述传感器测量多种不同折射率的葡萄糖溶液。

首先,通过在葡萄糖溶液中添加不同比例的去离子水(即改变葡萄糖溶液的浓度),配制 5 种不同折射率的葡萄糖溶液,溶液折射率变化范围为 1.3337~1.3353(每种溶液折射率之差为 0.0004),所有折射率均由阿贝折射仪在常温条件下进行测量。其次,利用高温火焰加热拉伸普通单模光纤(Corning, SMF-28)制备一段微纳光纤(长度约 7 mm,直径约 680 nm),图 3 给出了其扫描电子显

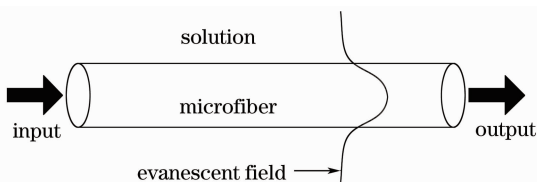


图 2 微纳光纤传感示意图

Fig. 2 A microfiber sensing element in solution

微(SEM)照片。为了维持微纳光纤实验过程的稳定和减小耦合损耗,实验中采取直接对单模光纤加热拉伸且保持微纳光纤两端与普通单模光纤连接状态。同时,利用塑料材料设计了一个带有溶液进出口的微型流水槽,流水槽的设计便于不同溶液的更换,也避免微纳光纤重复进出溶液引起的机械形变而导致测量结果的不准确。然后,将微纳光纤缓慢浸入盛有折射率为 1.3337 的葡萄糖溶液的流水槽中。

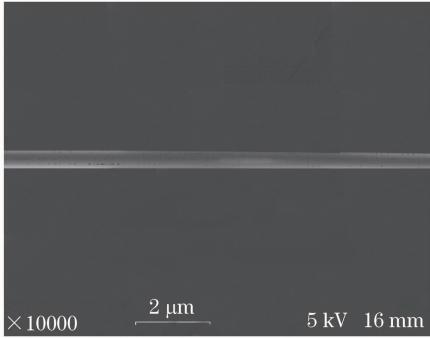


图 3 微纳光纤电子显微照片

Fig. 3 Electron micrograph of microfiber

依照上述方法,逐次增加流水槽中的溶液折射率(按折射率从小到大的顺序),并监测采集由于溶液折射率微小变化引起的干涉信号的变化。图 4 给出实验测量的两个 PIN 采集到的干涉信号。从图 4 中可以很清楚地看到,随着葡萄糖溶液折射率的增加相应的干涉信号也发生了变化。

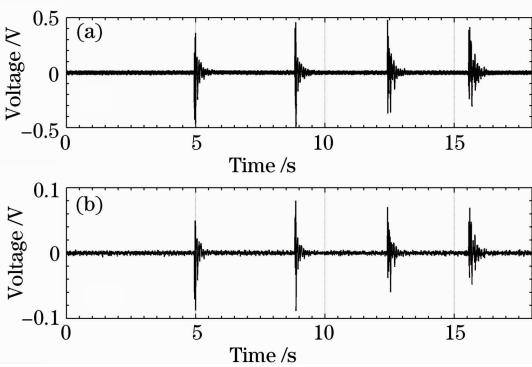


图 4 光电探测器采取的干涉信号

(a) PIN 1, (b) PIN 2

Fig. 4 Response of interferometric sensor: the output signal of (a) PIN 1 and (b) PIN 2

根据光纤干涉型传感器的特点,干涉信号相位的变化与外界折射率变化成正比。因此,通过自编 Labview 程序对干涉信号进行解调处理^[21],可得到相位变化($\Delta\Phi$)随时间变化的关系,如图 5 所示。比较图 4 和图 5(a),可以发现经过信号解调处理后的

干涉信号的突变和不同折射率的葡萄糖溶液加入的时间完全一致。

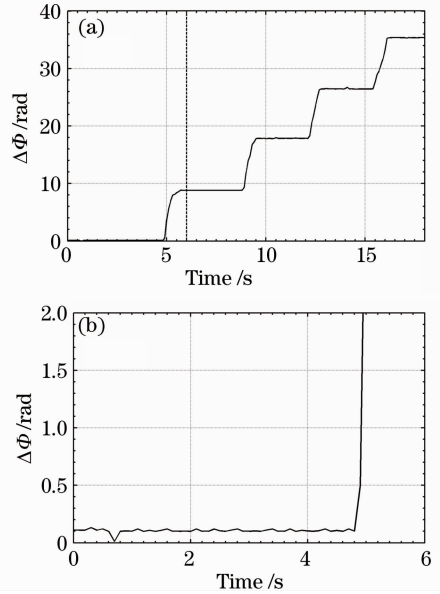


图 5 传感器相位随时间的变化关系

(a) 0~15 s; (b) 0~6 s

Fig. 5 Sensor phase shifts as a function of time

(a) 0~15 s; (b) 0~6 s

为了进一步验证实验测量和相位解调的准确性,根据上述提供的数据,图 6 给出通过数值求解 Maxwell 方程得到溶液折射率微小变化和相位变化关系,同时图中还标记出了经信号处理后获得的实验值。由图 6 可知,当外界溶液折射率从 1.3337 逐步增加至 1.3353 时,微纳光纤的信号光相位相应变化约为 35 rad。此外,该图还表明外界溶液折射率变化与信号光相位变化成线性关系,这在实际应用中也有利于信号的处理。比较图 6 的实验值和理论值,可以发现理论值和实验值两者基本一致,这也验证了传感器系统在实际应用中的可行性和准确性。

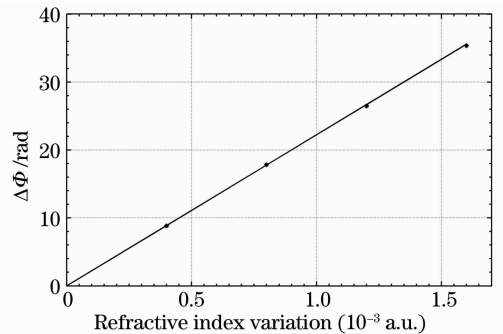


图 6 溶液折射率变化与相位变化关系

(* 为实验值)

Fig. 6 Phase shift of the sensor versus the refractive index variation (* are experimental values)

4 讨 论

灵敏度是衡量光纤传感器性能的一个重要参数。微纳光纤传感器的灵敏度可由图 6 曲线斜率计算获得,即 $\frac{1}{L} \times \frac{d(\Delta\Phi)}{dn} \approx 3.18 \text{ (rad}/\mu\text{m)}$,该数值远高于使用平面波导制作的类似传感器的灵敏度^[22]。从测量结果图 5(b)可知,由系统噪声引起的相位差为 0.12 rad,这意味着该传感器对折射率的探测限为 10^{-6} 。而且,随着微纳光纤直径的减小,传感器的灵敏度还将进一步提高,例如,当微纳光纤直径减小到 400 nm 时,通过数值求解 Maxwell 方程,相应的传感器灵敏度理论上可以达到 4.796 (rad/ μm)^[23]。相信随着纳米加工技术的进一步发展,微纳光纤传感器的灵敏度还将进一步提高。

5 结 论

通过对白光干涉系统的分析,提出了一种新型微纳光纤传感器。实验结果表明,相对传统传感器,微纳光纤传感器具有灵敏度高、探测极限低、结构紧凑、对被测样品需求量少、易于和其他光电器件集成等优点。因此,该传感器在生物、化学和医药等领域有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 L. M. Tong, R. R. Gattass, J. B. Ashcom *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding [J]. *Nature*, 2003, **426**(6968): 816~819
- 2 G. Brambilla, V. Finazzi, D. J. Richardson. Ultra-low-loss optical fiber nanotapers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(10): 2258~2263
- 3 S. G. Leon-saval, T. A. Birks, W. J. Wadsworth *et al.*. Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(13): 2864~2869
- 4 L. Shi, X. F. Chen, H. J. Liu *et al.*. Fabrication of submicron-diameter silica fibers using electric strip heater [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5055~5060
- 5 M. Sumetsky, Y. Dulashko, J. M. Fini *et al.*. The microfiber loop resonator: theory, experiment, and application [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 242~250
- 6 F. X. Gu, L. Zhang, X. F. Yin *et al.*. Polymer single-nanowire optical sensors [J]. *Nano. Lett.*, 2008, **8**(9): 2757~2761
- 7 X. Guo, L. M. Tong. Supported microfiber loops for optical sensing [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14429~14434
- 8 J. Villatoro, D. Monzon-Hernandez. Fast detection of hydrogen with nano fiber tapers coated with ultra thin palladium layers [J].

- Opt. Express*, 2005, **13**(13): 5087~5092
- 9 J. Hecht. Photonics frontiers: subwavelength optics come into focus [J]. *Laser Focus World*, 2005, **41**(99): 86~90
- 10 J. Giles. Top five in physics [J]. *Nature*, 2006, **441**(7091): 265
- 11 Y. Huang, X. Mao, C. Zhang *et al.*. Photonic crystal waveguides and their applications [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 704~708
- 12 S. Kazuaki, K. Takashi, I. Naoki *et al.*. Purcell effect of GaAs quantum dots by photonic crystal microcavities [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 879~881
- 13 Huang Huijie, Zha Junhui, Zhao Yongkai *et al.*. Multi-probe fiber-optic evanescent wave biosensor and its characterization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 718~722
黄惠杰, 翟俊辉, 赵永凯等. 多探头光纤倏逝波生物传感器及其性能研究 [J]. 中国激光, 2004, **31**(6): 718~722
- 14 Zeng Jie, Liang Dakai, Cao Zhenxin. Study on a novel optical fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 838~841
曾捷, 梁大开, 曹振新. 光纤表面等离子体波共振温度传感器的研究 [J]. 中国激光, 2004, **31**(7): 838~841
- 15 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Perot fiber-optic refractive-index sensor based on laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1400~1404
刘为俊, 饶云江, 冉曾令等. 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器 [J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1400~1404
- 16 Zhang Na, Feng Xia. Using of fiber optical sensor to measure liquid parameters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 67~71
张娜, 冯霞. 光纤传感器在液体参量测量中的应用 [J]. 中国激光, 2006, **33**(1): 67~71
- 17 Chu Fenghong, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Oxygen sensor based on U-shaped plastic optical fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1220~1223
初凤红, 蔡海文, 瞿荣辉等. 基于 U 形塑料光纤的氧气传感器 [J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1220~1223
- 18 J. Y. Lou, L. M. Tong, Z. Z. Ye. Modeling of silica nanowires for optical sensing [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6): 2135~2140
- 19 F. Xu, V. Pruneri, V. Finazzi *et al.*. An embedded optical nanowire loop resonator refractometric sensor [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 1062~1067
- 20 Y. H. Li, L. M. Tong. Mach-Zehnder interferometers assembled with optical microfibers or nanofibers [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 303~305
- 21 Wu Hongyan, Jia Bo, Ye Jia *et al.*. Demodulation techniques for position determination system based on fiber interferometer [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(5): 45~51
吴红艳, 贾波, 叶佳等. 基于光纤干涉定位系统的信号解调技术 [J]. 传感器与微系统, 2007, **26**(5): 45~51
- 22 F. Prieto, B. Sepulveda, A. Calle *et al.*. An integrated optical interferometric nanodevice based on silicon technology for biosensor applications [J]. *J. Nanotechnol.*, 2003, **14**(8): 907~912
- 23 L. M. Tong, J. Y. Lou, E. Mazur. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(6): 1025~1035