

文章编号: 0258-7025(2010)06-1516-04

基于多模干涉的光纤折射率传感器的实验研究

赵 宇 金永兴 董新永 王剑锋

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 报道了一种基于多模干涉理论的光纤折射率传感器,其传感器结构由两段单模光纤中嵌入一小段无包层多模光纤组成。研究了传感器的传输光谱与折射率的关系。实验结果表明,当外界折射率变化范围为 1.336~1.372 时,传感器获得灵敏度为 5.4×10^{-5} RIU(RIU 为折射率单元)。该传感器在生物化学测量中有比较好的应用前景。

关键词 光纤光学; 多模干涉; 光纤传感器; 折射率测量

中图分类号 TN 212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1516

Experimental Studies of Multimode Interference Based Fiber Optic Refractive Index Sensors

Zhao Yu Jin Yongxing Dong Xinyong Wang Jianfeng

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract A fiber-optic refractometer based on the multimode interference in the singlemode-multimode core-singlemode fiber structure is demonstrated. The refractive index dependence of re-imaging resonant wavelength shift of the devices is investigated. It shows that the proposed sensor has a measurement resolution of 5.4×10^{-5} for the change of refractive indices from 1.336 to 1.372. The proposed sensor has great potential for biological and chemical applications.

Key words fiber optics; multimode interference; fiber optic sensors; refractive index measurement

1 引 言

随着生物化工产业的蓬勃发展,生化传感器越来越受到国内外科科学者的关注。新型生化探测技术也成为环境监测、临床检验、食品检测等众多领域的重要研究课题。液体的折射率作为反映液体本质的重要物理参量,在生产实践中具有举足轻重的地位,因此对折射率检测方法的探究有着重要的研究意义与价值。关于折射率的测量方法有很多,由于光纤传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰、抗化学腐蚀、尺寸小和快速响应等特点^[1~3],在折射率传感领域的应用引起了人们的广泛兴趣,目前基于光纤的各种折射率传感器已得到广泛的研究。如各种基于光纤布拉格光栅(FBG)^[4,5]、长周期光纤光栅

(LPG)^[6]、倾斜光纤布拉格光栅(TFBG)^[7]、光子晶体光纤和单模光纤(SMF)宏弯的折射率传感器,但已有方法在测量折射率 1.4 以下液体时获得的灵敏度不是很理想。

近年来,基于单模-多模-单模(SMS)结构的多模干涉被广泛应用在光纤带通滤波器^[8]、应变传感器^[9]、温度传感器^[10]、位移传感器^[11]和波长可调光纤透镜^[12]等设计领域,但对利用 SMS 结构的折射率传感特性未见报道。本文给出了一种基于多模干涉 SMS 结构的光纤折射率传感器。传感器主要由一段去掉包层的多模光纤(MMF)嵌入到两根单模光纤之间组成,基本原理主要基于耦合模在多模光纤中形成的模场干涉。实验研究了液体折射率与多

收稿日期: 2010-03-05; 收到修改稿日期: 2010-04-26

基金项目: 浙江省科技厅重大项目(2008C13041-1)资助课题。

作者简介: 赵 宇(1986—),女,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感技术方面的研究。E-mail: haitun8649@163.com

导师简介: 金永兴(1972—),男,副教授,主要从事光纤传感和光纤通信等方面的研究。

E-mail: jinyongxing@cjlu.edu.cn(通信联系人)

模谐振波长之间的关系,在测量折射率 1.4 以下液体时,获得了较高的灵敏度。

2 传感器的制作和工作原理

光纤传感头如图 1 所示,长度为 L 的多模光纤芯(MMFC)嵌入一段标准的单模光纤(SMF-28)之间。

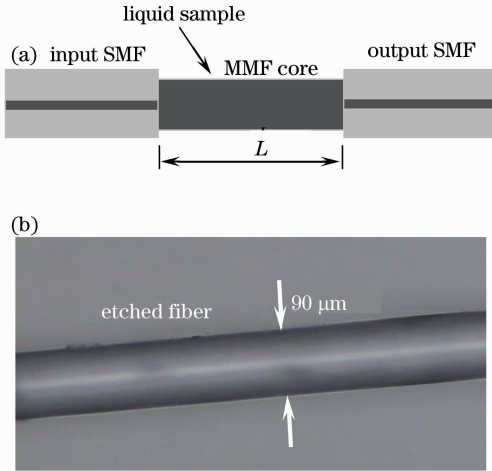


图 1 (a)传感器结构示意图;(b)刻蚀后多模光纤纤芯图

Fig.1 (a) Schematic of proposed sensor device;

(b) image of the etch-eroded MMF core

多模光纤纤芯是通过纤芯直径 $105\ \mu\text{m}$ 和包层直径 $125\ \mu\text{m}$ 的多模光纤化学腐蚀得到的。考虑到实验条件及加工过程等因素,本 SMS 结构中多模光纤纤芯直径为 $90\ \mu\text{m}$ 。先把多模光纤放入体积分数为 40% 的氢氟酸溶液 5 min,使光纤的直径腐蚀到大致 $105\ \mu\text{m}$ 以下。掺锗的纤芯的腐蚀速度比较快,所以用体积分数为 10% 的氢氟酸代替来减少腐蚀速度,这样可以用来保护纤芯,最后得到直径 $90\ \mu\text{m}$ 的多模光纤纤芯。腐蚀得到的光纤直径均匀,表面光滑,如图 1(b) 所示。首先将一段单模光纤与 MMFC 一端连接,然后在另一端切成长度 L 的 MMFC,最后与另外一段单模光纤连接。制作过程比较简单,同时可以通过普通的光纤熔接设备和工具来完成。

利用光纤熔接设备将单模光纤和多模光纤进行无偏心对接,忽略光在单模光纤和多模光纤连接面的反射。光源发出的光传入单模光纤中,在接近多模光纤前端面其光场分布接近高斯分布,作为多模光纤的入射场,当光束在 MMFC 传输时,多模光纤中的高阶本征模(LP_{0m})被激励,不同模式的光在多模光纤中相互耦合^[9]。设多模光纤中两种不同的传导模式 LP_{0m} 和 LP_{0n} (m, n 是正整数),其模之间的

相位差为

$$\Delta\Phi^{m,n} = \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^m - n_{\text{eff}}^n)L}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}^{m,n}L}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 $\Delta n_{\text{eff}}^{m,n}$ 是导模 LP_{0m} 和 LP_{0n} 之间的等效折射率差, λ 为自由空间光波长。(1)式中两个相邻干涉极小的波长间隔为

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}}^{m,n}L}. \quad (2)$$

由(2)式可以看出,两个干涉极小波长间隔随 MMFC 的长度增加而减小,MMFC 长度越长,在测量范围内可得到的干涉峰越多。同时,导模 LP_{0m} 和 LP_{0n} 之间的等效折射率差随 MMFC 周围的液体折射率的增加而增加,所以随着外界折射率的提高,谐振波长向长波方向移动。不同阶数导模的模场分布的差异导致它们与 SMF 基模耦合系数的不同,所以只有少数导模才有可能被有效地耦合到单模光纤中,其他模式将耦合到单模光纤的包层中,最终被损耗掉^[9]。同时耦合系数大的模式之间在耦合到单模中会产生干涉现象,改变 MMFC 长度、半径、折射率都会引起传输光谱的谐振波长移动,故利用这个效应可以测量液体折射率。

3 实验及结果

利用放大自发辐射宽带光源入射到如图 1 所示的传感器中,用 AQ6370 光纤光谱仪来测量传感系统的透射光谱。实验过程中保持环境温度不变,同时传感光纤被固定在载玻片上面。每次测量后,用无水乙醇清洗传感单元,然后在空气中自然风干直到透射光谱与原来传感器置于空气中透射光谱一致。测量用的液体是盐溶液,折射率从 1.336 变化到 1.372。

不同长度的 MMFC($L=10, 20, 40\ \text{mm}$)置于空气中的透射光谱如图 2 所示。图中的干涉极小值主要是多模干涉效应与单模和多模光纤之间耦合效应共同作用的结果^[13]。当 MMFC 长度为 10 mm 和 20 mm 时,透射光谱中可以观察到一个干涉极小值,分别为 1591.9 nm 和 1571.7 nm。当 MMFC 长度增加到 40 mm 时,透射光谱中可以观察到两个干涉极小值,分别为 1539.9 nm 和 1582.1 nm。此现象与前面理论推断两个干涉极小波长间隔随 MMFC 的长度增加而减小的结论一致。另外,输入波长和实验中多模光纤的长度的变化导致多模光纤中导模模场分布差异,从而改变了耦合到单模光纤基模的功率^[13,14],进而可推断透射光谱中的光谱损耗与传

输光波长有关。

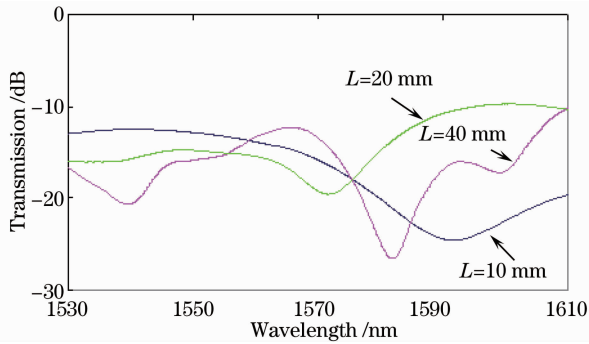


图 2 不同多模光纤纤芯长度传感器的透射光谱
Fig. 2 Transmission spectra for different lengths of MMFC

长度 10 mm 的 MMFC 置于不同折射率溶液的透射光谱如图 3 所示。为了能比较直观观察透射光谱的变化,图中也给出了传感单元置于空气中的透射光谱。由图 3 可知,随折射率的增加,在空气中谐振波长 1591.9 nm 向长波方向移动,这与理论推断折射率增加将导致谐振波长红移的结论一致。当传感器周围溶液的折射率从 1.336 变化到 1.372 时,谐振波长向长波方向移动了大约 2.0 nm。

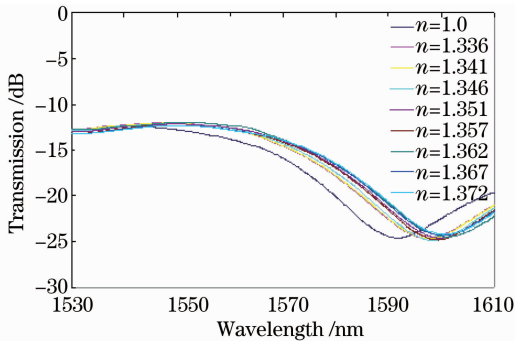


图 3 多模光纤纤芯长度为 10 mm 时透射光谱随外界溶液折射率的变化

Fig. 3 Transmission spectra with different surrounding liquids when interaction length L was 10 mm

长度 20 mm 的 MMFC 置于不同折射率溶液的透射光谱如图 4 所示。当传感器周围溶液的折射率从 1.336 变化到 1.372 时,谐振波长为 1571.7 nm 向长波方向移动了 5.72 nm,不同折射率溶液得到透射光谱损耗相差大约在 1 dB。与长度为 10 mm 的 MMFC 传感器相比,长度为 20 mm 的 MMFC 传感器的灵敏度要高于长度 10 mm 的传感器。

长度 40 mm 的 MMFC 置于不同折射率溶液的透射光谱如图 5 所示。当溶液的折射率从 1.336 变化到 1.372 时,谐振波长为 1539.33 nm,向长波方向移动了 6.67 nm,即随着 MMFC 长度的增加,传

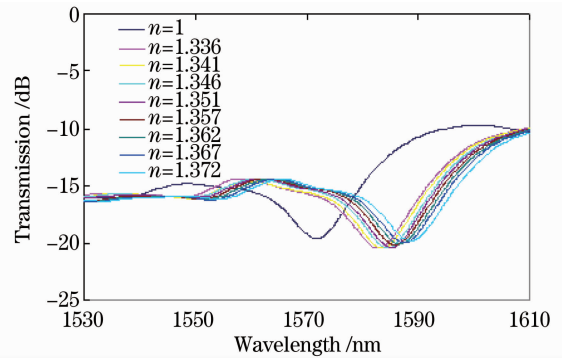


图 4 多模光纤纤芯长度为 20 mm 时透射光谱随外界溶液折射的变化

Fig. 4 Transmission spectra with different surrounding liquids when interaction length L was 20 mm

感器的灵敏度也随之增加。同时,当溶液的折射率从 1.336 增加到 1.372 时,谐振波长为 1582.08 nm,向长波方向移动了 5.31 nm。相对于谐振波长 1539.33 nm 来说,谐振波长 1582.08 nm 由更低阶模式干涉形成^[10]。因此得出结论:形成多模干涉峰的模式阶越高,折射率传感越灵敏。

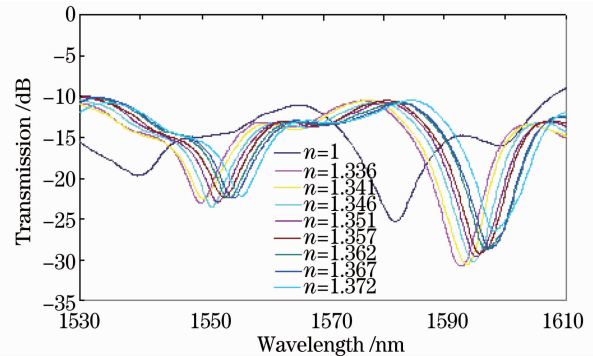


图 5 多模光纤纤芯长度为 40 mm 时透射光谱随外界溶液折射率的变化

Fig. 5 Transmission spectra with different surrounding liquids when interaction length L is 40 mm

波长 1593.33 nm 与液体折射率变化的关系如图 6 所示。图中外部折射率变化 0.036,谐振波长移动了 6.67 nm。实验中使用的光谱仪 OSA 的波长分辨率为 10 pm,所以得到传感器的折射率灵敏度为 5.4×10^{-5} RIU (RIU 为折射率单元)。LPG^[7],FBG^[15]和 TFBG^[16]等折射率传感器在折射率 1.4 以下时得到的灵敏度就比较差,主要是当环境折射率远离包层的折射率时,折射率的变化对包层的等效折射率的影响比较小,故灵敏度比较低。然而这个折射率区域在生物和化学方面的应用非常重要,所以得到的传感器在化学和生物领域有比较好的应用前景。

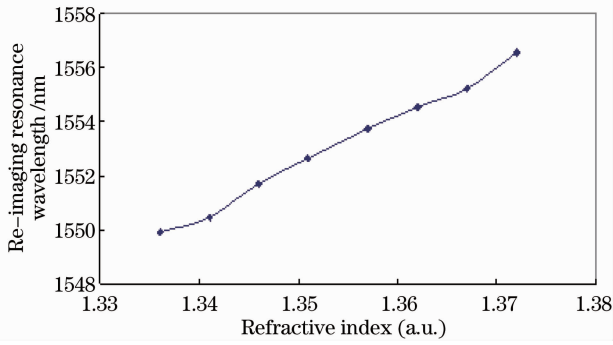


图 6 谐振波长移动量随外界折射率的变化

Fig. 6 Responses of the wavelength of a sensor to surrounding medium with different re-imaging resonance wavelengths

4 结 论

应用多模干涉制作了一种折射率传感器,它由单模光纤中插入一段长度为 L 的多模光纤纤芯组成。实验结果表明,谐振波长随着折射率的增加向长波方向移动,同时形成谐振峰模阶数越高,折射率传感越灵敏。实验所得折射率灵敏度为 5.4×10^{-5} RIU,折射率变化范围为 1.336~1.372,此传感器在生物化学领域有比较好的应用前景。

参 考 文 献

- Li Hongqiang, Yu Xiaogang, Miao Changyun *et al.*. Research of intelligent clothing for body temperature monitoring based on distributed optical fiber Bragg grating sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 208~212
李鸿强,于晓刚,苗长云等. 光纤布拉格光栅人体测温的关键问题研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 208~212
- Li Kun, Wen Hongqiao, Li Hui. A study on miniature interferometer strain sensor based on EFPI[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3282~3285
李 坤,文泓桥,李 慧. 光纤法布里-珀罗结构的微型应变传感器的研制[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3282~3285
- Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on Fresnel reflection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958

- 徐 平,庞拂飞,陈 娜等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1955~1958
- W. Liang, Y. Huang, Y. Xu *et al.*. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(15): 151122
- Xu Junjiao, Li Jie, Rong Huabei *et al.*. Analysis and measurement on refractive index sensing of few mode fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 565~568
徐俊娇,李 杰,戎华北等. 少模光纤布拉格光栅折射率传感的分析与测量[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 565~568
- J. H. Chong, P. Shum, H. Haryono *et al.*. Measurement of refractive index sensitivity using long-period grating refractive refractometer[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**: 65~69
- V. Bhatia. Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing [J]. *Opt. Express*, 1999, **4** (11): 457~466
- W. S. Mohammed, P. W. E. Smith. All-fiber multimode interference bandpass filter[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31** (17): 2547~2549
- Lü Peng, Li Enbang, Wang Wei *et al.*. Numerical simulation and experimental study of all-fiber multimode-interference-based strain sensor [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2008, **21**(12): 1990~1994
吕 鹏,李恩邦,王 玮等. 光纤多模干涉应变传感器的数值模拟及实验研究[J]. 传感技术学报, 2008, **21**(12): 1990~1994
- E. B. Li, X. L. Wang, C. Zhang. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(9): 091119
- A. Mehta, W. Mohammed, E. G. Johnson. Multimode interference-based fiber-optic displacement sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(8): 1129~1131
- W. S. Mohammed, A. Mehta, E. G. Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 469~477
- A. Kumar, R. K. Varshney, A. C. Siny *et al.*. Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **219**: 215~219
- Y. Jung, S. Kim, D. Lee *et al.*. Compact three segmented multimode fiber modal interferometer for high sensitivity refractive-index measurement [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**: 1129~1133
- A. N. Chryssis, S. M. Lee, S. B. Lee *et al.*. High sensitivity evanescent field fiber Bragg grating sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(6): 1253~1255
- G. Laffont, P. Ferdinand. Tilt short-period fiber-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**: 675~770