

基于无芯光纤的单模-多模-单模折射率传感器的研究

陈耀飞^{1,2} 韩 群^{1,2*} 何 洋³ 刘铁根^{1,2} 洪成青^{1,4}

¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

² 光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072

³ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ⁴ 理科大学, 朝鲜

摘要 提出了一种基于无芯光纤的单模-多模-单模(SMS)结构的折射率光纤传感器并对其进行了理论和实验研究。用一种新颖的无芯光纤来作为 SMS 结构中的多模波导,避免了常规 SMS 折射率传感器制作过程中的化学腐蚀所带来的问题,具有易于设计和制作的优点。制作了一支基于无芯光纤的 SMS 折射率光纤传感器,并用具有不同折射率的蔗糖溶液对其进行了实验测试,在 1.356~1.392 的折射率范围内得到了 431.4 nm/RIU 的平均折射率灵敏度,实验结果与模拟结果符合得很好。进一步的理论研究发现,通过减小无芯光纤的直径可以进一步提高传感器对折射率的灵敏度。

关键词 光纤光学; 无芯光纤; 单模-多模-单模; 折射率测量

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0905001

Study of Single Mode-Multimode-Single Mode Refractive Index Sensor Based on No Core Fiber

Chen Yaofei^{1,2} Han Qun^{1,2} He Yang³ Liu Tiegeng^{1,2} Hong Chengqing^{1,4}

¹ College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology (Tianjin University),
Ministry of Education, Tianjin 300072, China

³ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China;

⁴ University of Science, DPR Korea

Abstract A fiber sensor based on the single mode-multimode-single mode (SMS) structure for refractive index (RI) sensing is proposed. A kind of no core fiber is used as the multimode waveguide. Compared with the conventional SMS with an etched multimode fiber, the proposed sensor is easy to design and fabricate. A model RI sensor based on the proposed structure is designed and experimentally tested with sucrose solutions with different RI values. The results show that the sensitivity of the sensor is 431.4 nm/RIU on average in the range of 1.356~1.392. The experimental results agree well with the simulation results. Besides, computer simulation is also performed to systematically analyze the sensor's characteristics. The results show that the sensitivity of the sensor can be improved by reducing the diameter of the no core fiber.

Key words fiber optics; no core fiber; single mode-multimode-single mode; refractive index measurement

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2430

收稿日期: 2013-03-05; **收到修改稿日期**: 2013-05-13

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(11004150,61107035,61227011)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16100)

作者简介: 陈耀飞(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: yaofeichen@tju.edu.cn

导师简介: 刘铁根(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术、嵌入式图像检测技术和防伪检测技术等方面的研究。E-mail: tgliu@tju.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: hanqun@tju.edu.cn

1 引 言

基于单模-多模-单模(SMS)结构的光纤传感器具有结构简单、易于制作、抗电磁干扰等优点,近年来受到了人们的重视。SMS结构的光纤传感器的原理是基于其中多模波导中的多模干涉^[1-6],它不仅可用来作为滤波器^[7-8],而且因其传输特性易受外界环境的影响,还可用于对外界温度^[9-12]、应力^[13]、位移^[14]和折射率^[15-22]等物理量的传感。液体折射率的准确测量在生物和医学等领域有重要意义,已经报道的光纤折射率计分别基于光纤布拉格光栅^[23]、长周期光纤光栅^[24]、法布里-珀罗干涉仪^[25]、光子晶体光纤^[26]等结构,但这些传感器结构较为复杂、制作成本较高,而且灵敏度也不高^[15]。相比之下,基于SMS结构的折射率计不仅结构简单、成本低,而且灵敏度高。为提高对折射率的灵敏度,常规的SMS结构需要对其中的多模光纤的包层进行化学腐蚀^[17,20,22],甚至还要将多模光纤的纤芯腐蚀掉一部分^[17,22],但是化学腐蚀不但危险,而且难以精确控制,并且还会造成光纤的机械强度降低,增大后续的切割和熔接的难度,难以进行准确的设计和制作。

针对以上问题,本文用一种无芯光纤(NCF)来替代SMS结构中的多模光纤,设计和制作了SMS结构的折射率传感器,分别在空气和不同折射率的蔗糖溶液环境下进行了实验,并与理论模拟的结果进行对比,发现模拟结果与实验结果吻合得很好,说明了这种制作方法是可行的。本文所采取的方法相比于化学腐蚀多模光纤的方法,具有操作简单、易于实现的优点。最后还对此传感器的特性做了进一步的模拟分析。

2 传感器的工作原理及制作

本文研究的传感器原理如图1所示,在两段单模光纤(SMF)中熔接一段去除涂覆层的NCF,就构成了一个SMS结构的传感器。由于SMF和NCF结构参数的不同,SMF中的基模传输到NCF中时会激发出NCF中一系列的高阶模式LP_m。设SMF和NCF为无偏心对接,由于NCF本身结构具

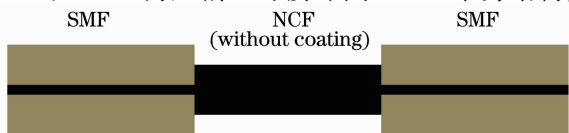


图1 基于NCF的SMS结构的示意图

Fig.1 Schematic diagram of SMS structure based on NCF

有中心对称性,NCF中只有LP_{0m}模式被激发^[2]。设从SMF输入的光场为E(r,0),NCF中的第m阶模式的光场为F_m(r),根据电磁场的连续性条件,在输入端SMF和NCF连接处有

$$E(r,0) = \sum_{m=1}^N c_m F_m(r), \quad (1)$$

式中N为NCF中存在的总的模式数目,c_m为第m阶模式的激发系数。c_m可以由下式得到:

$$c_m = \frac{\int_0^{\infty} E(r,0) F_m(r) r dr}{\int_0^{\infty} F_m(r) F_m(r) r dr}. \quad (2)$$

当光波在NCF中传播z的距离后,其光场可以表示为

$$E(r,z) = \sum_{m=1}^N c_m F_m(r) \exp(i\beta_m z), \quad (3)$$

式中β_m为第m阶模式的纵向传播常数。

最后,光场从NCF耦合入单模光纤后输出,透射率可以由下式得到^[20]:

$$T = \sum_{m=1}^N c_m^2 + \sum_{i \neq j=1}^N c_i \cdot c_j \cdot \cos(\beta_i - \beta_j) \cdot L, \quad (4)$$

式中L为NCF的长度。

当输入平坦的宽带光时,因每个波长对应的透射率不同,用光谱仪就会接收到一条具有一定分布的透射率谱线,在透射率最大的波长处会有一个透射峰。若保持外界其他条件不变,当改变NCF周围的折射率时,会造成NCF中各模式的激发系数c和传播常数β的变化,再由(4)式可知,每个波长处对应的透射率也会随之变化,最终导致光谱仪接收到的整体响应谱线以及透射峰的移动,利用这种现象便可对外界折射率进行传感。

NCF是一种新型的光纤,这种光纤没有纤芯,只由实心包层和涂覆层构成,包层和涂覆层分别由纯熔融石英材料和聚合物材料制成,其结构如图2所示,NCF的涂覆层可以很容易被剥离掉。实验中所用NCF的直径为61.9 μm(台湾Prime Optical Fiber公司生产)。基于NCF的SMS结构的制作过程如下:

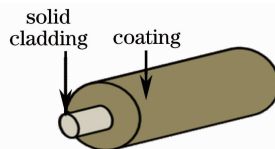


图2 NCF的结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of NCF

1) NCF 涂覆层的去除。将刀片的刀刃轻轻停靠在无芯光纤的涂覆层上,然后自然地滑动将 NCF 外层的涂覆层剥离,此时只剩下直径为 $61.9 \mu\text{m}$ 的实心包层部分,再用酒精擦拭已除去涂覆层的 NCF 表面,以保证实心包层外表面的洁净。

2) NCF 熔接端面的获取。因为 NCF 不是标准光纤,无法用普通的光纤切割刀进行切割。为了获得光洁的端面以便与 SMF 熔接,在用刀片刨除涂覆层后,再用红宝石切割笔在垂直于 NCF 轴向的方向上划出一个划痕,然后小心地将无芯光纤在划痕处折断,由此来获得用于熔接的端面。

3) NCF 与 SMF 的熔接。将已经切好的 NCF 端面和 SMF 端面放入熔接机中,采用手动操作模式即可完成 NCF 与 SMF 的熔接,由此便可获得基于 NCF 的 SMS 结构。最后再用酒精擦拭 NCF 的表面,保证其表面的洁净状态。

3 实验结果和模拟分析

用上述方法制作了 NCF 长度为 10.4 cm 的实验装置,并根据文献[27]中的室温下蔗糖溶液浓度与其折射率的经验公式分别配置了浓度(质量分数,下同)为 15%、20%、25%、30%、35% 的蔗糖溶液,其相应的折射率 n 分别为 1.356、1.364、1.374、1.381、1.392。本文中所用光纤的参数如表 1 所示。因 NCF 的实心包层为纯石英材料,计算其中色散特性(不同波长处的折射率值)可用 Sellmeier 公式计算得到。

表 1 光纤参数
Table 1 Fiber parameters

	SMF	NCF
Core diameter / μm	8.2	0
Cladding diameter / μm	12.5	61.9
Coating diameter / μm	250	160
Numerical aperture (NA)	0.14	—

将 SMS 结构的一端与宽带光源连接,另一端接入光谱仪,如图 3 所示。放大自发辐射(ASE)宽带光源在 $1520 \sim 1620 \text{ nm}$ 范围内有稳定的光谱输出,光谱仪的最小分辨率为 10 pm 。保持外界温度不变,分别对其在空气和不同折射率的蔗糖溶液中的光谱响应

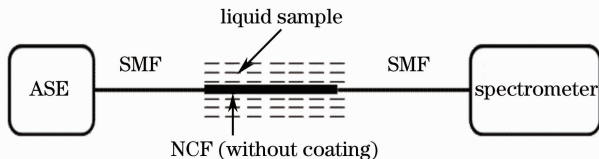


图 3 实验装置连接示意图

Fig. 3 Connection diagram of the experimental apparatus

进行测量。每次改换蔗糖溶液前,需要用酒精擦拭 NCF 部分,使光谱恢复至在空气中的初始状态。

用光谱仪测量 NCF 分别在空气、25% 和 30% 蔗糖溶液环境中的透射谱,得到如图 4 所示的实验结果。从图 4 中可以看出,在空气中的透射谱中有 peak one 和 peak two 两个透射峰,在这里选取 peak one 处的透射峰来作为研究目标。将透射峰处对应的波长称为特征波长,那么这三条谱线的特征波长分别为 1561.5 、 1594.1 、 1596.2 nm ,特征波长处的透射损耗分别为 0.82 dB 、 1.43 dB 、 1.57 dB (包括两个熔接点的熔接损耗)。此外,通过实验测量得到了 NCF 在其他折射率的蔗糖溶液中的特征波长,结果如图 5 中曲线 1 所示。从图 4 和图 5 中可以看出随着外界折射率的增大,透射谱线的形状基本保持不变,而整体向上向长波长方向漂移,同时特征波长也向长波长方向移动,这与文献[22]中的理论分析结果相一致。该传感装置在 $1.356 \sim 1.392$ 的折射率范围内平均有 431.40 nm/RIU (RIU 为相对折射率)的灵敏度。

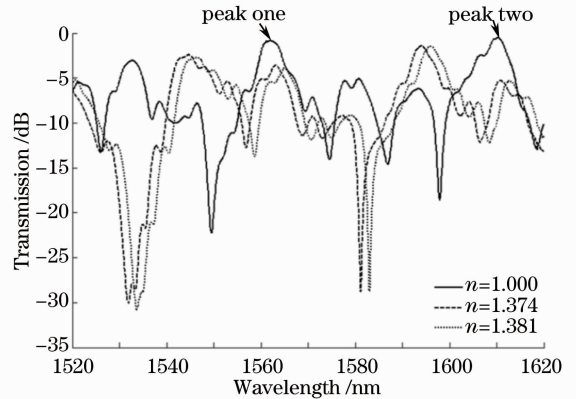


图 4 实验测得在空气、25% 和 30% 蔗糖溶液环境下的透射谱
Fig. 4 Transmission spectra by experiment in the environment of air and sucrose solution with 25% and 30%

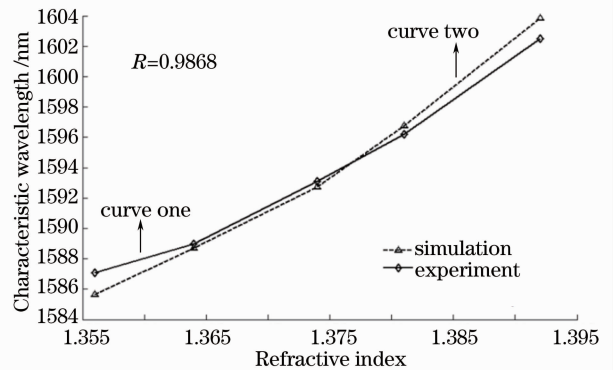


图 5 实验及模拟得到的特征波长与外界折射率的关系
Fig. 5 Relationship between characteristic wavelength and refractive index got by experiment and simulation

根据表 1 中的参数,结合第二节中的理论编写了 Matlab 程序,分别对 NCF 在空气和不同折射率的蔗糖溶液中的透射率谱进行了模拟,模拟与实验得到的特征波长与折射率关系的对比结果如图 5 所示,透射率谱线的对比结果如图 6 所示。图 5 中实

验测量与数值模拟得到的特征波长的平均误差为 1.16 nm,相关性系数 R 为 0.9868。通过图 5 和图 6 中对比结果可知,实验结果与模拟结果能较好地吻合。

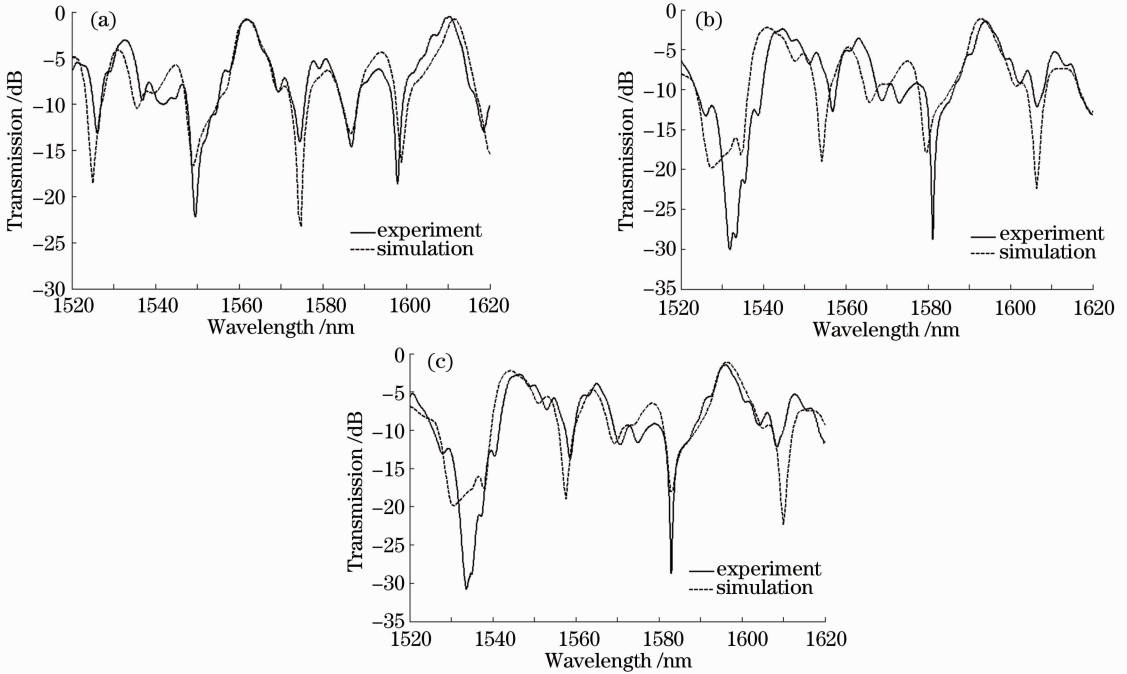


图 6 实验与模拟得到的不同折射率下的透射谱线。(a) 空气($n \approx 1$);(b) 浓度为 25% 的蔗糖溶液($n \approx 1.374$); (c) 浓度为 30% 的蔗糖溶液($n \approx 1.381$)

Fig. 6 Transmission spectra by experiments and simulatons in different refractive indexes. (a) Air ($n \approx 1$); (b) sucrose solution of 25% concentration ($n \approx 1.374$); (c) sucrose solution of 30% concentration ($n \approx 1.381$)

受限与实验条件,没有对不同包层直径的 NCF 进行实验,而是通过计算机模拟分析 NCF 直径大小对其传感特性的影响。取 NCF 的长度为 10.4 cm,当 NCF 的包层直径 D 分别为 $61.9 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m}$ 时,可以得到折射率在 $1 \sim 1.42$ 范围内与特征波长的关系,如图 7 所示。从图 7 可知,两条曲线整体上的变化趋势相同,都是随着折射率的增大特征波长向长波长方向移动;在 $1 \sim 1.2$ 的折射率范围内,折射率与特征波长之间有良好的线性关系,其线性拟合结果如图 8 所示;随着折射率的进一步增大(与 NCF 折射率差的逐渐减小),特征波长与折射率曲线的非线性越来越明显,且外界折射率越接近 NCF 的折射率时灵敏度越高。从图 8 的拟合结果可以看出,当 NCF 直径为 $61.9 \mu\text{m}$ 时, $1 \sim 1.2$ 折射率范围内的灵敏度为 48.7 nm/RIU ,在 $1.41 \sim 1.42$ 内可达到最高的 2170 nm/RIU ;当直径为 $50 \mu\text{m}$ 时, $1 \sim 1.2$ 内有灵敏度 64.3 nm/RIU ,在 $1.41 \sim 1.42$ 内可

达到最高的 3000 nm/RIU 。从以上的分析中可知减小 NCF 的直径可以提高传感器对折射率的灵敏度。

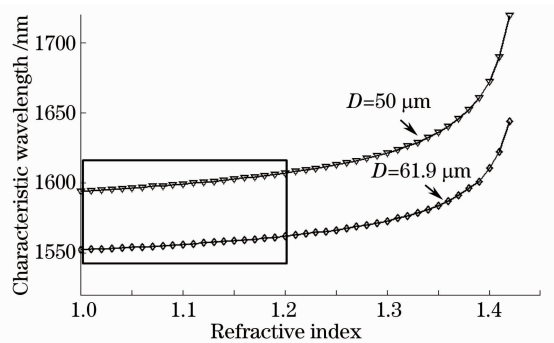


图 7 NCF 长度为 10.4 cm 时,不同直径下的特征波长与外界折射率的关系

Fig. 7 Relationship between characteristic wavelength and outside refractive index for NCFs at different diameters with 10.4 cm length

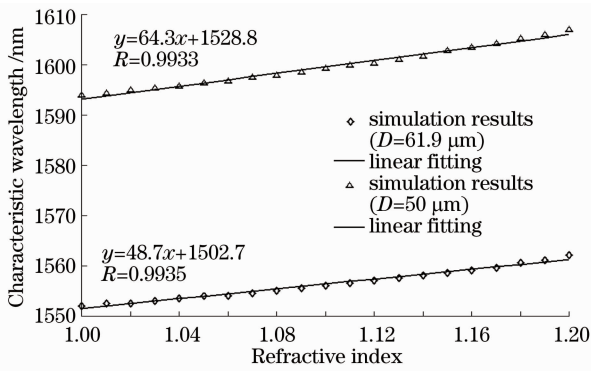


图8 特征波长与折射率关系的线性拟合结果

Fig. 8 Linear fitting results of characteristic wavelength and refractive index

4 结 论

提出一种用 NCF 来制作 SMS 结构的光纤折射率传感器的方法,通过实验与模拟结果的对比分析,证明了此方法的可行性,此方法相比于化学腐蚀多模光纤的方法具有耗时短、更易于操作的优点。实验测得传感器在 1.356~1.392 折射率范围内的灵敏度为 431.40 nm/RIU,理论上可测量 1~1.42 内的折射率,进一步的模拟分析表明灵敏度随外界折射率的增大而提高,且与 NCF 包层直径的大小有关,可通过减小 NCF 包层的直径来获得更高的灵敏度。

参 考 文 献

- 1 Q Wang, G Farrell, W Yan. Investigation on single-mode-multimode-single-mode fiber structure[J]. *J Lightwave Technol.* 2008, 26(5): 512-519.
- 2 W S Mohammed, A Mehta, E G Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *J Lightwave Technol.* 2004, 22(2): 469.
- 3 H Li, M Brio, L Li, *et al.*. Multimode interference in circular step-index fibers studied with the mode expansion approach[J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(10): 2707-2720.
- 4 A Kumar, R K Varshney, C S Antony, *et al.*. Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures [J]. *Opt Commun*, 2003, 219(1-6): 215-219.
- 5 Zhao Yu, Jin Yongxing, Jin Shangzhong. Numerical simulation of spectral transmission characteristics of single-mode-multimode single-mode fiber structure[J]. *Journal of China University of Metrology*, 2011, 22(4): 349-355.
赵宇, 金永兴, 金尚忠. SMS 光纤结构特性的数值模拟分析 [J]. *中国计量学院学报*, 2011, 22(4): 349-355.
- 6 L B Soldano, E C M Pennings. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. *J Lightwave Technol.* 1995, 13(4): 615-627.
- 7 W S Mohammed, P W E Smith, X Gu. All-fiber multimode interference bandpass filter [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(17): 2547-2549.
- 8 J E Antonio-Lopez, A Castillo-Guzman, D A May-Arrijoa, *et al.*. Tunable multimode-interference bandpass fiber filter [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(3): 324-326.

- 9 R X Gao, Q Wang, F Zhao, *et al.*. Optimal design and fabrication of SMS fiber temperature sensor for liquid[J]. *Opt Commun*, 2010, 283(16): 3149-3152.
- 10 Zhao Fang. Investigation of SMS Optical Fiber Sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
赵方. SMS 结构型光纤传感器的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- 11 Wang Wei, Li Enbang, Zhang Chenliang, *et al.*. Simulation and experimental studies of multimode-interference based fiber-optic temperature sensors [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(12): 1571-1575.
王伟, 李恩邦, 张晨亮, 等. 基于多模干涉的光纤温度传感器的 BPM 模拟与实验研究 [J]. *光电子 · 激光*, 2008, 19(12): 1571-1575.
- 12 Wang Jieyu, Tong Zhengrong, Yang Xiufeng, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long-period fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905003.
王洁玉, 童峥嵘, 杨秀峰, 等. 基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量 [J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905003.
- 13 Lü Peng, Li Enbang, Wang Wei, *et al.*. Numerical simulation and experimental study of all fiber multimode interference based strain sensors[J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuator*, 2008, 21(12): 1990-1994.
吕鹏, 李恩邦, 王伟, 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.
- 14 A Mehta, W Mohammed, E G Johnson. Multimode interference-based fiber-optic displacement sensor[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(8): 1129-1131.
- 15 Sun Hao, Hu Manli, Qiao Xueguang, *et al.*. Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0205001.
孙浩, 忽满利, 乔学光, 等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器 [J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0205001.
- 16 Li Enbang, Zheng Danying, Zhang Chenliang, *et al.*. A refractive index sensor based on the multimode interference in a hollow fiber [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(10): 1440-1445.
李恩邦, 郑丹莹, 张晨亮, 等. 基于空心光纤多模干涉的折射率传感器研究 [J]. *光电子 · 激光*, 2010, 21(10): 1440-1445.
- 17 Q Wu, Y Semenova, P Wang, *et al.*. High sensitivity SMS fiber structure based refractometer-analysis and experiment [J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 7937-7944.
- 18 Q Wang, G Farrell. All-fiber multimode-interference-based refractometer sensor: proposal and design [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(3): 317-319.
- 19 P Wang, G Brambilla, M Ding, *et al.*. Investigation of single-mode-multimode-single-mode and single-mode-tapered-multimode-single-mode fiber structures and their application for refractive index sensing [J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(5): 1180-1186.
- 20 Jianzhong Zhang, Shijun Peng. A compact SMS refractometer based on HF corrosion scheme [C]. *Proceedings of the Photonics and Optoelectronic (SOPO)*, 2010. 1-4.
- 21 O Frazão, S O Silva, J Viegas, *et al.*. Optical fiber refractometry based on multimode interference [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(25): E184-E188.
- 22 Zhao Yu, Jin Yongxing, Dong Xinyong, *et al.*. Experimental studies of multimode interference based fiber optic refractive index sensors [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1516-1519.
赵宇, 金永兴, 董新永, 等. 基于多模干涉的光纤折射率传感器的实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1516-1519.
- 23 M Han, F Guo, Y Lu. Optical fiber refractometer based on cladding-mode Bragg grating [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(3):

- 399—401.
- 24 T Allsop, R Reeves, D J Webb, *et al.*. A high sensitivity refractometer based upon a long period grating Mach-Zehnder interferometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(4): 1702—1705.
- 25 O Frazão, P Caldas, J L Santos, *et al.*. Fabry-Perot refractometer based on an end-of-fiber polymer tip[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(16): 2474—2476.
- 26 Deng Ming, Rao Yunjiang, Zhu Tao, *et al.*. Refractive-index sensor based on photonic fiber Fabry-Perot interferometer with self temperature compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1790—1795.
- 邓 明, 饶云江, 朱 涛, 等. 基于光子晶体光纤法布里-珀罗干涉仪的温度自补偿折射率计[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1790—1795.
- 27 Bai Zesheng, Liu Zhuqin, Xu Hong. An experienced formula about the connection of refraction index and consistence of several liquid[J]. *Journal of Yan'an University (Natural Science Edition)*, 2004, 23(1): 33—35.
- 白泽生, 刘竹琴, 徐 红. 几种液体的折射率与其浓度关系的经验公式[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2004, 23(1): 33—35.

栏目编辑: 王晓玻