

# 纤芯失配型光纤传感器折射率敏感特性

杨建春<sup>1,2</sup> 徐龙君<sup>2</sup> 章 鹏<sup>1</sup> 陈伟民<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>重庆大学光电工程学院, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)  
(<sup>2</sup>重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要** 根据菲涅耳公式和功率反射系数关系式, 分析纤芯失配型光纤传感器折射率传感原理; 采用单模/多模光纤制作传感器, 研究传感器输出光功率随甘油溶液折射率变化特征, 并验证理论计算结果。表明媒质折射率  $n_2 = 1.300 \sim 1.441$  时, 传感器输出光功率强且几乎不发生变化;  $n_2 = 1.441 \sim 1.452$  时, 传感器输出光功率呈线性快速下降, 其斜率为  $-155.91$ ; 当媒质折射率与单模光纤包层折射率接近时, 传感器输出光功率几乎为 0。验证实验发现, 传感器线性快速下降的折射率范围为  $1.442 \sim 1.454$ , 斜率为  $-49.67$ , 其输出光功率随甘油溶液折射率变化规律与数值模拟结果基本一致。该传感器具有结构简单、成本低、传感系统全光纤化等特点, 能用于有毒有害、易燃易爆等特殊环境下物质折射率的高精度测量。

**关键词** 光纤光学; 纤芯失配型光纤; 菲涅耳公式; 折射率传感器

**中图分类号** TN253; TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1183

## Sensing Characteristic of Optical Fiber Refractive Index Sensor Based on Core Diameter Mismatch

Yang Jianchun<sup>1,2</sup> Xu Longjun<sup>2</sup> Zhang Peng<sup>1</sup> Chen Weimin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

<sup>2</sup>Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** According to Fresnel formula and power reflectance, the sensing principle of optical fiber refractive index sensor based on core diameter mismatch is analyzed. The sensor consists of a multimode fiber in which a short section of standard single-mode fiber is inserted. To validate the theoretical result, output light power of the sensor is studied by glycerin aquatic solution experiments with different refractive indexes. The results show that output light power of the sensor strongly depends on the refractive index of the external medium. The sensor exhibits output light power with no change in the refractive index range of  $1.300 \sim 1.441$ . Output light power drops linearly in the range of  $1.441 \sim 1.452$ , with slope of  $-155.91$ . As the refractive index of the external medium is close to that of single-mode fiber cladding, the corresponding output light power is almost zero. The glycerin aquatic solution experimental result agrees with the theoretical result, and the refractive index range of linear light power dropping is  $1.442 \sim 1.454$ , with slope of  $-49.67$ . The method is simple and low-cost. All signals of the sensing system are transmitted by fiber. It can measure refractive index of toxic and hazardous solutions with high resolution, and is suitable for gas concentrations measurement in flammable and explosive, strong electromagnetic interference environments and other particular conditions.

**Key words** fiber optics; core diameter mismatch structured fiber; Fresnel formula; refractive index sensor

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(60871039)和重庆市自然科学基金(2007BB2177)资助课题。

作者简介: 杨建春(1970-), 女, 副研究员, 博士研究生, 主要从事光纤传感及检测技术等方面的研究。

E-mail: jcyang@cqu.edu.cn

导师简介: 徐龙君(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事安全检测技术与信息化等方面的研究。

E-mail: xulj@cqu.edu.cn

## 1 引 言

折射率是物质的重要光学参数之一,其测量可分为几何光学法、波动光学法、光纤传感法等三类<sup>[1~3]</sup>。目前,用于折射率测量的光纤传感器有锥形<sup>[4,5]</sup>、纤芯裸露型<sup>[6,7]</sup>、布拉格(Bragg)光纤光栅<sup>[8,9]</sup>、长周期光纤光栅传感器<sup>[10,11]</sup>、纤芯失配型光纤传感器<sup>[12]</sup>等类型。

纤芯失配型光纤传感器是近年来发展起来的一种新型传感器,它具有灵敏度高、响应速度快、制作工艺简单、采用标准通讯光纤、成本低等特点,是有毒有害、易燃易爆、强电磁干扰等特殊环境下物质折射率或浓度高精度测量的最佳选择<sup>[12~13]</sup>。文献[12]将62.5/125  $\mu\text{m}$  标准多模光纤(MMF)和9/125  $\mu\text{m}$  标准单模光纤(SMF)熔接制作多模-单模-多模(MM-SM-MM)结构的纤芯失配型光纤传感器,对不同浓度的Cargille溶液进行折射率敏感实验,发现其折射率线性响应范围为1.435~1.455,传感器在折射率为1.450附近的最大分辨率为 $7 \times 10^{-5}$ 。但该文献只开展了折射率传感实验,而没有分析传感原理。D. Luna-Moreno等<sup>[14,15]</sup>将厚度10 nm的纯钯或钯-金合金薄膜镀覆于SMF传感区域,进而形成基于薄膜折射率变化的具有MM-SM-MM结构的纤芯失配型光纤氢气传感器,结果表明这种含钯-金合金薄膜的传感器对氢气的浓度测量范围为0~4%(低爆炸限),响应时间小于15 s,且表现出稳健性和可逆性好等特点;实验还发现沉积钯-金合金薄膜的均匀性并不会影响传感器响应时间<sup>[16]</sup>。杨建春等<sup>[17]</sup>针对煤矿瓦斯提出一种基于薄膜折射率变化的含笼形分子聚合物膜的纤芯失配型光纤甲烷传感器,初步实验发现该传感器对甲烷气体的浓度响应范围为0~5%(低爆炸限),灵敏度0.004,响应时间为40 s。

鉴于纤芯失配型光纤传感器对物质(溶液、气体)测量具有灵敏度高、响应速度快等特点。在前期工作基础上,采用菲涅耳公式和功率反射系数关系式研究纤芯失配型传感器折射率传感原理,并分析其折射率敏感特性,以不同折射率(浓度)甘油溶液验证数值模拟结果。

## 2 纤芯失配型光纤传感器基本结构

以常规G.652普通单模、多模通讯光纤作为纤芯失配型光纤传感器材料,其中单模光纤(SMF)纤芯折射率 $n_0 = 1.45223$ ,包层折射率 $n_1 = 1.44726$ ;多模光纤(MMF)纤芯折射率 $n_3 = 1.4930$ ,包层折射率 $n_4 = 1.4573$ ;单/多模光纤纤芯直径分别为

9  $\mu\text{m}$ /62.5  $\mu\text{m}$ ,包层直径均为125  $\mu\text{m}$ 。实验选取长度 $L_{\text{SM}} = 3 \text{ mm}$ 单模光纤作为传感区域长度,用剥除钳剥除光纤上的涂覆层,再用光纤切割刀将光纤两端面切割平整,分别与多模光纤尾纤按如图1所示结构进行光纤熔接,即可获取MM-SM-MM结构且传感区域长度为 $L_{\text{SM}}$ 的纤芯失配型光纤传感器。

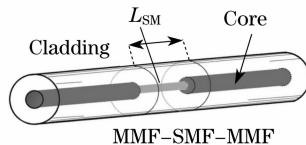


图1 纤芯失配型光纤传感器结构

Fig. 1 Schematic diagram of the core diameter mismatch structured fiber sensor

## 3 理论分析与数值模拟

### 3.1 传感过程分析

根据几何光学原理,光纤输出光功率可采用光电探测器获取,其输出光功率与光在传输过程中纤芯和包层界面上的反射系数 $R$ 有关。图2给出基于子午光线的纤芯失配型光纤传感器工作的光传播路径图,光在传感器入射端面上满足斯涅耳(Snell)定律,即

$$n_a \sin \alpha_0 = n_3 \sin \beta_1, \quad (1)$$

式中 $n_a$ 为空气折射率, $n_3$ 为多模光纤纤芯折射率。

当光在多模光纤MM中传输时,其临界角 $\theta_c^{\text{MM}} = \arcsin(n_4/n_3)$ 。若多模光纤 $n_4 = 1.4573$ , $n_3 = 1.4930$ 时,则 $\theta_c^{\text{MM}} = 77.445^\circ$ 。即当 $77.445^\circ < \alpha_1 \leq 90^\circ$ 时,光能够在多模光纤中稳定地传输。

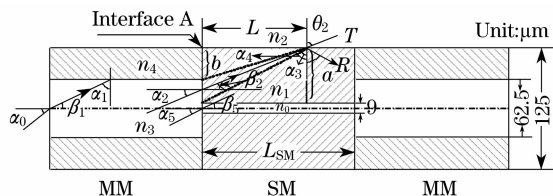


图2 子午光线的传播

( $\theta_1$  的变化范围从 $\alpha_3$  变化到 $\alpha_4$ )

Fig. 2 Propagation of meridional ray

(From  $\alpha_3$  to  $\alpha_4$  for angle change range of  $\theta_1$ )

当光传输到达多模光纤MM与单模光纤SM接触界面A时,一部分光从介质 $n_3$ 折射入单模光纤包层 $n_1$ ,根据 $\alpha_1$ 可知其对应的界面A法线方向入射角 $\alpha_2$ 取值范围为 $0^\circ \leq \alpha_2 \leq 12.555^\circ$ ;而单模光纤包层 $n_1$ 与媒质折射率 $n_2$ 界面处入射角 $\theta_1$ 的变化范围从 $\alpha_3$ 变化到 $\alpha_4$ ,即从 $\arctan(L/a)$ 到 $\arctan(L/b)$ ,其中 $L$ 如图2中所示。

若由介质 $n_3$ 到达界面A的不同角度的光在临

界面角  $\theta_c^{MM}$  到  $90^\circ$  范围内分布是均匀的, 则经界面 A 进入单模光纤  $n_1$  区、 $n_0$  区的光功率  $I_1$ 、 $I'_1$  比例分别为:  $I_1$  在包层中为  $(\pi r_1^2 - \pi r_0^2) / \pi r_1^2 = 0.99482$ ,  $I'_1$  在纤芯中为  $\pi r_0^2 / \pi r_1^2 = 0.00518$  (其中  $r_1$  为 SMF 包层半径,  $r_0$  为纤芯半径)。

当光从介质  $n_3$  折射入单模光纤纤芯  $n_0$ , 临界角  $\theta_c^{SM} = \arcsin(n_1/n_0) = 85.258^\circ$ ,  $\beta_5 = 4.742^\circ$ , 即 SM 纤芯中只有入射角为  $0 \sim 4.612^\circ$  的光能稳定输出, 而  $4.612^\circ \sim 12.555^\circ$  的光因不满足全反射条件而会迅速衰减。因此, 单模光纤  $n_0$  区进入到 MM 段的  $n_3$  区的光功率是非常小的, 在后面功率反射系数计算中只考虑 SM 段的  $n_1$  区进入到 MM 段的  $n_3$  区的光功率贡献。这也可以从后续实验中证明, 当溶液折射率大于 1.454 时, 虽然纤芯的光依然在传输, 但探测器输出光功率几乎为 0。

### 3.2 菲涅耳 (Fresnel) 公式与功率反射系数

根据光波导理论, 到达  $n_1$ 、 $n_2$  交界面的光分两部分传输, 一部分透射 ( $T$ ) 到单模光纤包层表面的媒质折射率  $n_2$  里去。另一部分光反射 ( $R$ ) 返回至单模光纤包层  $n_1$ , 然后再折射回单模光纤或多模光纤, 并沿着此连接的多模光纤传输并产生输出光。反射与透射的比例与单模光纤包层  $n_1$  表面的媒质折射率  $n_2$  变化密切相关。

由菲涅耳公式可知, 当光波入射到两种媒质  $n_1$ 、 $n_2$  交界面时, 振幅反射系数为:

$$\rho_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (2)$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (3)$$

式中  $\rho_{\perp}$  为入射波的电场垂直于入射面 (垂直极化) 时的振幅反射系数;  $\rho_{\parallel}$  为入射波的电场平行于入射面 (平行极化) 时的振幅反射系数;  $n_1$ 、 $n_2$  分别为两种媒质的折射率;  $\theta_1$  为  $n_1$  媒质中的入射角, 其变化范围从  $\alpha_3 = \arctan(L/a)$  变化到  $\alpha_4 = \arctan(L/b)$ 。若  $L$  取 1.5 mm,  $a$  为  $(125-9) \mu\text{m}/2$ ,  $b$  为  $(125-62.5) \mu\text{m}/2$ , 即  $\theta_1 = 87.786^\circ \sim 88.807^\circ$ ;  $\theta_2$  为  $n_2$  媒质中的折射角,  $\theta_2 = \arcsin[(n_1/n_2) \cdot \sin \theta_1]$ 。

光入射到两种媒质交界面时的功率反射系数为

$$R = \frac{R_{\perp} + R_{\parallel}}{2} = \frac{\rho_{\perp}^2 + \rho_{\parallel}^2}{2}, \quad (4)$$

此时, 功率反射系数  $R$  与入射光的极化状态、入射角  $\theta_1$  以及媒质折射率  $n_1$ 、 $n_2$  有关。

采用数值模拟方法可以分析以上传光过程。当媒质折射率  $n_2$  在 1.300~1.452 之间变化时, 根据 (2) 式~(4) 式, 可计算出功率反射系数  $R$  随入射角

$\theta_1$  的变化, 图 3 给出不同折射率处功率反射系数  $R$  与入射角  $\theta_1$  的关系, 计算时  $L$  取 1.5 mm。由图 3 可知, 功率反射系数  $R$  随入射角  $\theta_1$ 、媒质折射率  $n_2$  的增加呈有规律变化。当媒质折射率  $n_2$  介于 1.300~1.441 时,  $R$  均为 1, 即功率反射系数  $R$  不随入射角  $\theta_1$  的变化而改变, 满足全反射条件;  $n_2 = 1.441 \sim 1.452$  时, 随着媒质折射率  $n_2$  增大, 满足功率反射系数  $R=1$  的临界角  $\theta_c$  从  $87.786^\circ$  逐渐增加至  $88.807^\circ$ , 其中  $\theta_c = \arcsin[(n_2/n_1) \cdot \sin \theta_2]$ 。当待测媒质折射率  $n_2$  与单模光纤包层  $n_1$  接近时, 反射回单模光纤包层  $n_1$  的光非常少,  $R$  趋于 0, 如图中曲线  $g$  所示。

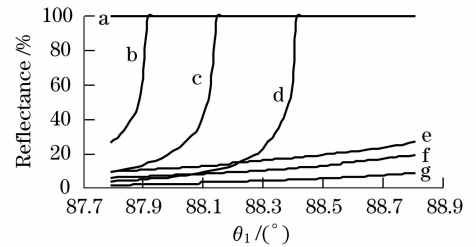


图 3 不同折射率处功率反射系数  $R$  与入射角  $\theta_1$  的关系 ( $n_2$ : a. 1.300~1.441, b. 1.445, c. 1.446, d. 1.447, e. 1.448, f. 1.450, g. 1.452)

Fig. 3 Relation between power reflectance  $R$  and incident angles  $\theta_1$  in different refractive indexes

( $n_2$ : a. 1.300~1.441, b. 1.445, c. 1.446, d. 1.447, e. 1.448, f. 1.450, g. 1.452)

图 4 进一步给出传感器输出光功率与媒质折射率的关系, 它来源于对不同入射角  $\theta_1$  的功率反射系数  $R$  积分。分析表明, 当媒质折射率  $n_2$  介于 1.300~1.441 时, 传感器输出归一化光功率对媒质折射率  $n_2$  变化不敏感, 其相对值几乎达 100%; 当  $n_2$  介于 1.441~1.452 时, 增大媒质折射率  $n_2$  会导致传感器输出光功率呈线性快速下降, 其斜率为  $-155.91$ , 相关系数  $R^2 = 0.8634$ ; 当  $n_2 = 1.452$  时, 光功率几乎为 0。

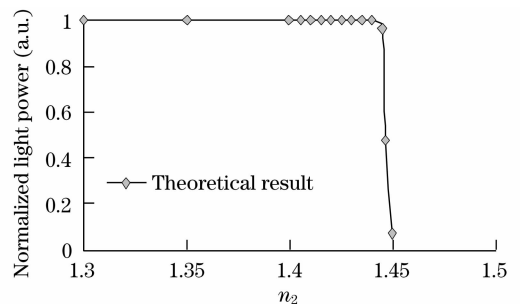


图 4 媒质折射率对传感器输出光功率的影响  
Fig. 4 Effect of the external refractive index on output light power of the sensor

## 4 验证实验与讨论

为了验证纤芯失配型光纤传感器对外界媒质折射率变化的敏感特性,实验以甘油为测量对象。通过调整甘油、蒸馏水体积比,配制 18 个不同体积分数甘油溶液,分别为 20%、40%、60%、64%、68%、72%、76%、80%、82%、84%、86%、88%、90%、92%、94%、96%、98%、100%。采用阿贝折射仪标定不同体积分数甘油折射率,结果如图 5 所示。从图可知,甘油溶液折射率  $n_2$  与其体积分数  $C$  密切相关,当甘油浓度升高时,相应的折射率呈线性增加,其斜率为 0.0017,相关系数  $R^2 = 0.9951$ ,即通过测量溶液折射率即可间接获取待测液体浓度信息。

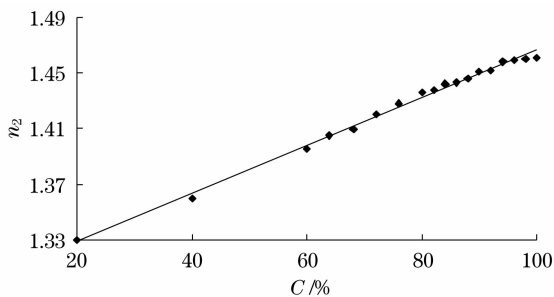


图 5 甘油溶液体积分数  $C$  与折射率  $n_2$  的关系

Fig. 5 Relation between volume fraction  $C$  of glycerin aquatic solution and its refractive index  $n_2$

根据文献[12]搭建光纤折射率传感实验装置,将传感区域长度为 3 mm 的传感器浸入至不同浓度甘油溶液中,再将传感器多模光纤两端分别与光源和光功率计连接;其中光源选用 AQ4215 (131) 1310 nm LED,光电探测器选用波长范围 700~1700 nm 的 AQ2140 光功率计,实验温度  $t = 20 \pm 1$  °C。传感器每次测量前均需用分析纯无水乙醇清洗干净后再用热空气流吹干。为了减小测量误差,每个测量值为 5 次重复实验平均,相对误差小于 3%。

图 6 给出不同折射率甘油溶液处传感器输出光功率变化实验结果。表明随甘油溶液折射率增加,传感器输出光功率呈规律性变化。当  $n_2$  从 1.330 变化到 1.440 时,传感器输出光功率几乎无变化,即输出光功率相对值  $R \approx 100\%$ ;但当  $n_2 = 1.442 \sim 1.454$  时,传感器输出光功率发生巨大变化,呈线性快速下降趋势,其斜率为 -49.67,相关系数  $R^2 = 0.9549$ 。这是因为当传感区域单模光纤包层表面的甘油溶液折射率逐渐接近单模光纤包层的折射率时,几乎没有光能量从传感区域反射回包层,而是被甘油溶液吸收。此时在光功率计的接收端观察不到光信号的变化。

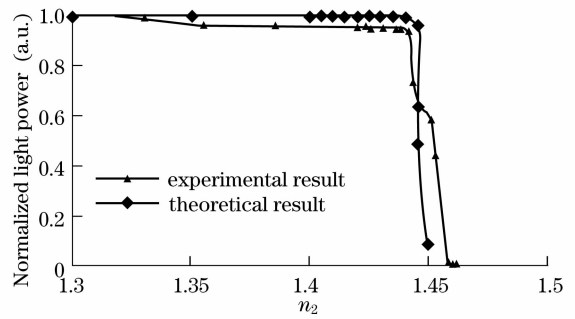


图 6 理论模拟值与甘油溶液实验值对比

Fig. 6 Comparison of theoretical result with experimental result in glycerin aquatic solution

对比图中实验值与数值模拟结果,可以看出两条曲线变化规律十分一致,均呈先稳定不变然后急剧下降过程。且两者的转折点均在  $n_2 = 1.440$  附近(实验值 1.442,理论值 1.441),其快速下降的折射率范围均在  $n_2 = 1.440 \sim 1.454$  附近(实验值  $n_2 = 1.442 \sim 1.454$ ,理论值  $n_2 = 1.441 \sim 1.452$ )。只要待测液体折射率介于 1.442~1.454 之间,根据纤芯失配型传感器输出光信号相对变化即可计算出待测溶液的折射率并进而计算浓度。由此可见,将纤芯失配型光纤传感器用于溶液折射率传感是完全可行的。

## 5 结 论

采用常规的单/多模光纤制成的纤芯失配型光纤传感器对外界环境折射率变化敏感,能够形成一种新型的折射率传感器。以不同浓度的甘油溶液为测量对象,研究了传感器输出光功率随甘油溶液折射率的变化规律,并与理论计算结果进行比较,表明纤芯失配型光纤传感器用于溶液折射率传感是完全可行的。与其它光纤传感器相比,该折射率传感器制造工艺与结构简单、成本低、使用方便,可用于有毒有害、易燃易爆、强电磁干扰等特殊环境下物质折射率的高精度测量。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Shigang. Analysis on measurement of liquid refractive index [J]. *Optical Instruments*, 2007, **29**(4): 1~6  
俞世钢. 液体折射率测定方法分析[J]. *光学仪器*, 2007, **29**(4): 1~6
- 2 Yu Shigang. Study on application of a novel optical fiber sensor [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2004, **21**(1): 64~67  
俞世钢. 一种新型光纤传感器的应用研究[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(1): 64~67
- 3 Zhao Yong, Liao Yanbiao. Novel optical fiber sensor for simultaneous undersea temperature and salinity measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1241~1244  
赵 勇, 廖延彪. 海水盐度和温度实时检测的新型光纤传感器研

- 究[J]. 光学学报, 2002, **22**(10):1241~1244
- 4 J. Villatoro, D. Monzón-Hernández, D. Talavera. High resolution refractive index sensing with cladded multimode tapered optical fibre[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(2): 106~107
- 5 P. Polynkin, A. Polynkin, N. Peyghambarian *et al.*. Evanescent field-based optical fiber sensing device for measuring the refractive index of liquids in microfluidic channels[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1273~1275
- 6 A. M. Cardenas-Valencia, R. H. Byrne, E. T. Steimle. Development of stripped-cladding optical fiber sensors for continuous monitoring—I. Theoretical study of a referencing method for measuring refractive indices of fluids [J]. *Sens. Actuators B, Chem.*, 2006, **115**(1): 178~188
- 7 I. Noiseux, W. Long, A. Cournoyer *et al.*. Simple fiber-optic-based sensors for process monitoring; An application in wine quality control monitoring[J]. *Appl. Spectrosc.*, 2004, **58**(8): 1010~1019
- 8 K. Schroeder, W. Ecke, R. Mueller *et al.*. A fibre Bragg grating refractometer[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 757~764
- 9 Yun Binfeng, Chen Na, Cui Yiping. Refractive index sensing characteristics of fiber bragg grating based on cladding mode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1013~1015  
恽斌峰, 陈娜, 崔一平. 基于包层模的光纤布拉格光栅折射率传感特性[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1013~1015
- 10 H. J. Patrick, A. D. Kersey, F. Bucholtz. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction[J]. *J. Lightw. Technol.*, 1998, **16**(9): 1606~1612
- 11 Chen Genxiang, Liu Chunming, Li Tangjun *et al.*. Study on long-period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 624~628
- 陈根祥, 刘春宁, 李唐军等. 长周期光纤光栅的研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(5): 624~628
- 12 J. Villatoro, D. Monzón-Hernández. Low-cost optical fiber refractive-index sensor based on core diameter mismatch[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(3): 1409~1413
- 13 Yang Jianchun, Xu Longjun, Zhang Peng *et al.*. Review on optical fiber evanescent wave gas sensor[J]. *Opt. Techn.*, 2008, **34**(4): 562~567  
杨建春, 徐龙君, 章鹏等. 倏逝波型光纤气体传感器研究进展[J]. 光学技术, 2008, **34**(4): 562~567
- 14 D. Luna-Moreno, D. Monzón-Hernández, J. Villatoro *et al.*. Optical fiber hydrogen sensor based on core diameter mismatch and annealed Pd-Au thin films[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, **125**(1): 66~71
- 15 D. Monzón-Hernández, D. Luna-Moreno, J. Villatoro *et al.*. All-optical fiber hydrogen sensor based annealed Pd-Au sensing nanolayers[C]. *Third European Workshop on Optical Fibre Sensors, SPIE*, 2007, **6619**: 66191F-1~66191F-4
- 16 D. Luna-Moreno, D. Monzón-Hernández. Effect of the Pd - Au thin film thickness uniformity on the performance of an optical fiber hydrogen sensor[J]. *Applied Surface Science*, 2007, **253**(21): 8615~8619
- 17 Yang Jianchun, Xu Longjun, Zhang Peng *et al.*. An Optical Fiber Methane Gas Sensing System Based on Core Diameter Mismatch[P]. *China Patent*, CN101162197A, 2008.4  
杨建春, 徐龙君, 章鹏等. 一种基于纤芯失配的光纤甲烷传感系统[P]. 中国专利, CN101162197A, 2008.4