

双包层单模光纤传感器及其在温度/湿度 传感方面的应用

张小康 叶晓靖 陈志东

(华南理工大学理学院物理系, 广东 广州 510641)

摘要 提出了一种双包层单模光纤传感器结构,根据波导理论推导出了光纤中导模变为泄漏模时,外包层折射率与双包层结构参量之间的关系,获得了这种光强调制型传感器可测量的折射率变化范围。利用已知热光系数的材料制作的温度传感器,从实验上证实了理论分析结果,并由理论与实验结果的分析得到了传感器的工作原理是:导模变为泄漏模后,输出光强与外包层一定范围的折射率变化有准线性关系。获得了在 55~105 °C 的温度范围内的具有准线性响应的温度传感器,光强变化范围达到了 39 dB;提出了利用一种围栏结构在光纤上涂覆敏感材料的简便方法,用琼脂糖制作出了插入损耗仅 0.5 dB、相对湿度(RH)在 30%~100%范围具有准线性响应、光强变化范围接近 9 dB 的光纤湿度传感器。

关键词 传感器;双包层单模光纤;波导理论;泄漏模;折射率测量范围;温度传感器;湿度传感器

中图分类号 TN253;TP212.11;TH837 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0606004

Doubly Cladding Single-Mode Optical Fiber Sensors and its Application in Temperature and Humidity Sensing

Zhang Xiaokang Ye Xiaojing Chen Zhidong

(Department of Physics, School of Sciences, South China University of Technology,
Guangzhou, Guangdong 510641, China)

Abstract A new type of sensor based on a doubly cladding single-mode optical fiber is proposed. The measurable range of the refractive index changes for the sensors is analyzed theoretically and demonstrated experimentally, which corresponds to the case that the fundamental mode in the fiber becomes leaky. Based on the analysis for the theoretical and the experimental results, the principle of the sensor is got. The output of the optical power of the sensor is almost inversely proportional to the refractive index of the outer cladding in some range of variation after the base mode in the fiber becoming leaky. A sensor with a linear response in the temperature range of 55~105 °C and an optical power variation of 39 dB is obtained. A new method of recoating hydrogels on optical fibers is verified. A humidity sensor fabricated by agarose shows a power variation of 9 dB in the moisture range of 30%~100% RH and insertion loss of 0.5 dB.

Key words sensors; doubly cladding single-mode fiber; waveguide theory; leaky mode; measurable range of refractive index; temperature sensors; humidity sensor

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2430

1 引 言

光纤传感器可将某些环境物理量转换为光信号,经光纤传输后在终端转换为便于处理、显示和记录的电信号,进而实现对环境的远程检测与控制。由于光纤传感器具有抗电磁干扰能力强、绝缘性能好等独特优势,它在武器装备与易燃易爆化学制品

的仓储、石油、化工和电力环境的远程监控方面有独特的应用价值。光纤传感系统将是支撑未来物联网中的传感网的基础技术之一。经过三十多年的努力,人们已研制出了 7 种以上的光纤传感器类型,其中最引人关注的是光纤光栅传感器^[1,2]。2002 年在美国俄勒冈州波特兰召开的第 15 届光纤传感器国

收稿日期: 2010-11-18; 收到修改稿日期: 2010-12-29

基金项目: 华南理工大学学生研究计划资助课题。

作者简介: 张小康(1957—),女,博士,副教授,主要从事光学检测、光纤传感等方面的研究。E-mail: xkzhang@scut.edu.cn

际会议上,有关光纤光栅传感器的论文最多,占会议论文总数的 44.2%,其次是干涉型传感器的^[3]。但是,基于光纤光栅的传感系统需要对传感器数据进行还原和融合,不能直接解释传感数据,使得解调信号成本很高^[4];基于干涉型的光纤传感系统中,传感器输出光强信号十分微弱,也需要代价很高的信号采集与处理技术。这些技术尤其不适用于单点的监测。而光强调制型光纤传感器具有制作成本低、信号解调设备成本低、可以实现实时监控等特点,十分有利于应用推广^[5,6],因此也一直受到人们的关注。

光强调制型光纤传感器主要有吸收型和折射率变化型^[7]。但用于吸收型传感器的敏感材料大部分都含有 CoC₁₂,这是一种有毒材料,而且这种传感器对光源有选择性要求。折射率变化型传感器的结构主要有:多模光纤纤芯外涂感应层、光纤尾端面涂覆敏感材料、经熔融拉锥形成的锥形光纤以及 D 形光纤(也称为边抛光光纤)。在这些不同类型的光强调制型光纤传感器中,锥形光纤和 D 形光纤采用了单模光纤,只有这类传感器才适用于远程监测。

D 形光纤是用机械方法打磨掉一定长度上某个侧面的部分包层、在抛光面上涂覆敏感材料后形成传感段。人们早在 1985 年就提出了用于温度传感的 D 形光纤结构^[8],但一直未能获得具有很好的线性响应特性^[9]。2008 年 Lei Zhang 等^[10]用锥形光纤制作的湿度传感器,检测范围是 9%~94% 相对湿度(RH),但相应的输出光强变化范围是 -59~-68 dB,插入损耗很大。这是因为拉锥过程中纤芯直径也会同时减小,当湿敏材料折射率与包层的相同时,光束通过锥腰时仍将经历模场变化,会引起光束的传输损耗。因此锥形光纤不可避免的存在较大的插入损耗。

黄旭光等^[11]在 2006 提出了利用腐蚀技术制作基于单模光纤的传感器,在一定长度的光纤上用敏感材料尽可能地完全替代原有的包层材料。与相同传感段长度的 D 形光纤传感器相比,增大了敏感材料与光纤的接触面,因此增大了调制深度;同时,由于在器件制作中采用了细致的腐蚀工艺,能获得光洁度很好的腐蚀界面,获得了小于 1 dB 的插入损耗。但由于单模光纤的纤芯直径小于 9 μm,这样制作的传感器的可靠性低、制作中的操作难度较大。为此提出了基于单模光纤的双包层光纤传感器^[12]。实验研究发现,在内包层外径大于 20 μm 后,外包层材料折射率变化时仍能影响纤芯中传输光束。本文中 4 个传感器中的 3 个的内包层外径都达到了 28 μm,

具有这样尺寸的腐蚀后的光纤,仍可承受 60 g 的重力。因此,采用双包层结构提高了传感器的可靠性、增加了实用性、并减轻了后续制作的操作难度。在选取了较大的内包层外径后,可以通过设计不同的传感段长度,实现不同的光强的调制范围。

本文根据波导理论,从双包层单模光纤中传输光束的模式变化分析了传感器的工作原理及其可测量的折射率变化范围;用不同的热敏材料制作了双包层单模光纤温度传感器,利用已知热光系数的材料制作的温度传感器,从实验上验证了理论分析结果;还提出了在光纤上涂覆湿敏材料的一种简便方法,并用此方法制作了双包层单模光纤湿度传感器。

2 理论分析

考虑图 1 所示的双包层结构,其中 a 是通信用的单模光纤纤芯的直径,纤芯折射率为 n_1 ; b 是内包层外直径,内包层折射率为 n_2 ; 外包层是温敏材料或湿敏材料,其折射率为 n 。设

$$\Delta n = n_1 - n_2, \quad \Delta n' = n - n_2.$$

由于讨论仅限于外包层材料折射率在单模光纤的纤芯与包层的之间变化的情况,因此, $0 \leq \Delta n' \leq \Delta n$ 。假设双包层光纤有两个归一化频率参量:

$$V = V_1 = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = k_0 a \sqrt{2n(\Delta n - \Delta n')},$$

$$V_2 = k_0 b \sqrt{n^2 - n_2^2} = k_0 b \sqrt{2n\Delta n'},$$

并定义如下模式参量:

$$u = a(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}, \quad v = b(k_0^2 n^2 - \beta^2)^{1/2},$$

$$v' = b(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2},$$

式中 k_0 是真空中波数, β 是光纤中的传播常数。

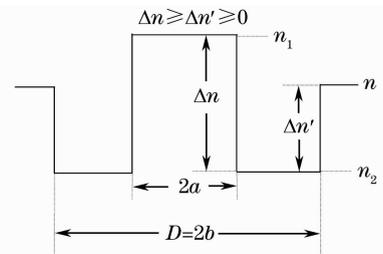


图 1 双包层光纤上材料折射率沿径向的分布
Fig. 1 Refractive index variation along a cross section diameter of a doubly cladding single-mode fiber

由于所讨论的双包层结构是以单模光纤为基础,光波导理论中的径向场分量只取 0 阶的表示,即

$$\begin{cases} \psi = A_0 J_0(ur/a), & r \leq a \\ \psi = A_1 I_0(v'r/b) + A_2 K_0(v'r/b), & a \leq r \leq b \\ \psi = A_3 K_0(vr/b), & r \geq b \end{cases} \quad (1)$$

式中 J_0 是 0 阶贝塞尔函数, I_0 和 K_0 是 0 阶变型贝塞尔函数; A_0 是归一化系数, A_1 、 A_2 和 A_3 是 A_0 的函数, 它们可以从下面的方程组中求解,

$$\begin{bmatrix} J_0(u) & I_0(v'c) & K_0(v'c) & 0 \\ uJ_0'(u) & v'cI_0'(v'c) & v'cK_0'(v'c) & 0 \\ 0 & I_0(v') & K_0(v') & K_0(v) \\ 0 & v'I_0'(v') & v'K_0'(v') & vK_0'(v) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_0 \\ -A_1 \\ -A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = 0, \quad (2)$$

上式是在 $r = a$ 和 $r = b$ 的两个分界面上光场 Ψ 和 $\delta\Psi/\delta r$ 的连续性边界条件下推导出来的, 其中, $Z' = dZ/dr$ (Z 表示贝塞尔函数 J, I 或 K), $c = a/b$. 因为在弱导的条件下, 横向场分量在上述两个分界面上满足连续性条件. 要保证 (2) 式中 A_0 、 A_1 、 A_2 和 A_3 有非零解, 则要求该式中的 4×4 矩阵的行列式为零, 由此可得到特征方程

$$\frac{[\hat{J}_0(u) - \hat{K}_0(v'c)][\hat{K}_0(v) + \hat{I}_0(v')]}{[\hat{J}_0(u) + \hat{I}_0(v'c)][\hat{K}_0(v) - \hat{K}_0(v')]} = \frac{I_1(v'c)K_1(v')}{I_1(v')K_1(v')}, \quad (3)$$

式中, 利用了恒等式 $Z'_0(x) = Z_1(x)$, 并且,

$$\hat{Z}_0(x) = \frac{Z_0(x)}{xZ_1(x)}.$$

当 $\beta = k_0 n$ 时, 导模截止, 基模变为泄露模, 横向传播常数变化为

$$\begin{cases} u = V, & r < a \\ v' = V_2, & a < r < b \\ v = 0, & r > b \end{cases} \quad (4)$$

在 $v \rightarrow 0$ 时, $\hat{K}_0(v) \sim -\ln v$, 删除 (3) 式中含有 $\hat{K}_0(v)$ 的项后可得到

$$\frac{[\hat{J}_0(V) - \hat{K}_0(V_2c)]}{[\hat{J}_0(V) + \hat{I}_0(V_2c)]} = \frac{I_1(V_2c)K_1(V_2)}{I_1(V_2)K_1(V_2c)}. \quad (5)$$

从 (5) 式可推导出导模截止时的与 V 、 V_2 和 V_2c 等参量相关的函数, $f(V, V_2, c) = 0$. 根据 V 、 V_2 和 V_2c 的定义, 从 (5) 式也可以推导出导模截止时, 外包层折射率与双包层结构参量之间的关系: $g(k_0, a, b, \Delta n, \Delta n') = 0$. Michel Monerie^[13] 在 $V \rightarrow 0$ 的极限条件下推导出

$$\frac{b}{a} = \left(\frac{\Delta n'}{\Delta n} \right)^{-1/2}. \quad (6)$$

因此, 在 $V \rightarrow 0$ 时基模变为泄露模的条件是

$$\Delta n' \geq \frac{a^2}{b^2} \Delta n. \quad (7)$$

而且, 在基模变为泄露模后, 外包层折射率的变化将更明显地影响纤芯中的光功率. 如果考虑 $\Delta n' = \Delta n$ 时, 纤芯中的绝大多数光功率都已泄漏到包层中了, 那么, 这种光强调制型光纤传感器的工作范围是: 导模变为泄露模后输出光强随一定范围的外包层折射率变化. 其可测量的折射率变化范围是

$$\Delta n_m = \Delta n - \Delta n'_c, \quad (8)$$

式中

$$\Delta n'_c = \frac{a^2}{b^2} \Delta n. \quad (9)$$

双包层单模光纤传感器可用于温度、湿度或某些气体的远程检测, (8) 式提供了寻找适合的敏感材料的理论依据.

3 传感器制作与实验装置

实验中所用的光纤是康宁 SMF-28 (8.3/125 μm) 裸纤. 双包层单模光纤温度传感器的制作仍采用文献[12]中所介绍的工艺过程. 本文涉及了两种热敏材料, OE-4110 (Dow Corning Co.) 和由两种聚合物混合的材料: 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 与聚偏氟乙烯 (PVDF). 文献[12]中介绍了使用 OE-4110 时的处理工艺. 使用混合材料时, 质量分数比是 $m(\text{PMMA}) : m(\text{PVDF}) = 3 : 2$, 溶剂是二甲基甲酰胺 (DMF). 在完成外包层材料的涂覆后, 让器件在低温 (约 80 $^\circ\text{C}$) 电子加热器上置放 10 h, 使溶剂完全挥发.

湿度传感器制作中的去包层的过程与文献[12]中所介绍的一样, 但涂覆外包层的方法不同 (已申请发明专利). 腐蚀后的光纤用胶带黏贴在一个 U 型基板上, 在传感段以及两端延伸 5 mm 的长度范围内的光纤是悬空的. 另外两条附加的光纤分别用胶带黏贴于传感段两侧并尽量靠近, 每条附加光纤的两端长度超过腐蚀区约 2 cm, 用光纤钳去除其保护层后其直径仅 125 μm . 两条附加光纤在传感段两侧形成准闭合区间, 图 2 是通过显微镜目镜拍摄的闭合区一端的照片. 利用液体的表面张力, 可以将任何水溶胶涂覆在闭合区间上, 从而在传感段上形成外包层. 由于附加纤维直径小, 使得所涂覆的大部分外包层的厚度都很薄, 这将使传感器的响应速度很快. 本文中 choice 琼脂糖作为湿敏材料, 用去离子水作溶剂, 配制了质量分数为 0.37% 的水溶胶. 外包层的厚度取决于涂敷材料浓度和涂敷次数. 在完成外包层材料的涂覆后, 将器件置于室内让其水分自然挥发一天, 使其含水量与室内空气湿度达到平衡.

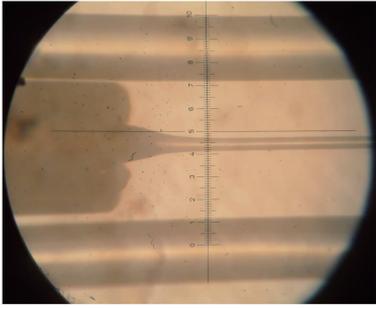


图 2 通过显微镜拍摄的腐蚀后的光纤及其闭合区的一端的照片

Fig. 2 Photograph of one end of an etched fiber with enclosure, taken through an eyepiece of an optic microscope

光源(DFB-LD, 1550 nm, 功率为 0 dBm)输入到一个 1×2 光束分路器,其分光比为 1:99。含有传感头的光纤的两端熔接上尾纤,分别连接上光功率为 99%的分路器输出和光功率计 1;光功率为 1%的分路器输出到光功率计 2,用于监测光源的输出功率稳定性。光源与光功率计均由武汉光讯公司提供。检测温度传感器的实验装置与文献[12]中所介绍的一样。

检测湿度传感器的实验装置如图 3 所示。湿度传感头放在恒温恒湿箱中(德国 Binder KBF 240),检测过程中温度设置在 25 ℃,手动调节相对湿度。

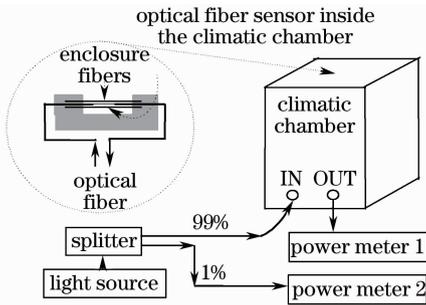


图 3 检测湿度传感器的输出光强随环境相对湿度变化的实验装置

Fig. 3 Experimental setup detecting the optical intensity loss as a function of the relative humidity in ambient air

4 实验结果与分析

4.1 可测量的折射率范围

首先分析图 4 所示的一个温度传感器的光强随温度变化的曲线。该温度传感器的内包层直径 $2b$ 为 16 μm ,其外包层材料是 OE-4110,其热光系数 (dn/dT) 是 $-0.00033 / ^\circ\text{C}$ (在 633 nm 波长上检测)。光纤的群有效折射率和相对折射率为

$$N_{\text{eff}} = 1.4681, (n_1^2 - n_2^2)/n_1^2 = 0.36\%$$

根据上述参量可计算出光纤的纤芯与包层的折射率为

$$n_1 = 1.4685, n_2 = 1.4632.$$

因此, $\Delta n = n_1 - n_2 = 0.0053$ 。如果认为在 1550 nm 波长上, $dn/dT = -0.00033 / ^\circ\text{C}$,那么, $-\Delta n / (dn/dT) = 16 ^\circ\text{C}$ 。由(9)式计算出, $\Delta n' \approx 0.001426$,因此, $-\Delta n' / (dn/dT) = 4 ^\circ\text{C}$ 。在图 4 中, $T = T_1 = 62 ^\circ\text{C}$ 处光强衰减最大,如果将对应的外包层材料折射率看作等同于纤芯的,即 $n = n_1$,那么,在 $T_2 = T_1 + 16 = 78 ^\circ\text{C}$ 处,应有 $n = n_2$;令 $T_c = T_2 - 4 = 74 ^\circ\text{C}$,根据第 2 节的理论分析,在 $T < T_c$ 后光纤中的导模变为了泄漏模。在图 4 中分别标示出 T_1, T_2 和 T_c ,从图中可看出,在 $T_c < T < T_2$ 的温度范围,光强的衰减很小;在 $T_1 < T < T_c$ 的温度范围,光强的衰减很大,这种情况应该对应于导模变为了泄漏模。因此,实验结果与理论分析很一致,并且在 $T_1 < T < T_c$ 的温度范围,光强衰减曲线十分具有线性特点。我们认为,双包层单模光纤对外包层材料折射率具有准线性响应的范围如(8)式所示。图 4 所对应的传感器的折射率检测范围是 $\Delta n_m \approx 0.003874$,温度检测范围是 $12 ^\circ\text{C}$ 。

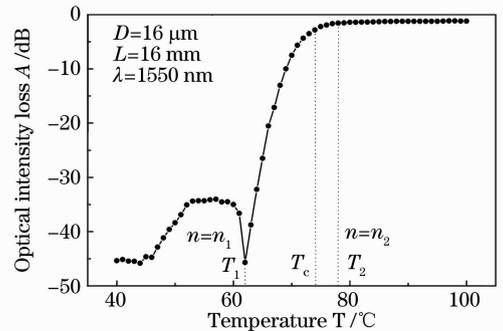


图 4 热敏材料为 OE-4110 的传感器输出光强随环境温度变化的实验曲线

Fig. 4 Plot of the output intensity of a sensor made by OE-4110 versus the temperature in ambient air

4.2 双包层单模光纤温度传感器

双包层单模光纤温度传感器的折射率检测范围由(8)式确定,但其温度检测范围还与外包层材料的热光系数有关。PMMA 和 PVDF 的热光系数小于 OE-4110,在相同温度和波长上 PVDF 的折射率小于 PMMA 的^[14],因此以不同质量比获得的 PMMA 和 PVDF 混合用作外包层材料时,可获得检测范围更大的、可工作在不同温度范围的传感器。图 5 是 $m(\text{PMMA}):m(\text{PVDF}) = 3:2$ 的温度传感器的输出光强随环境温度变化的曲线。从以分贝为光强单位

的曲线上可看出,最大衰减达到了-40 dB、最小插入损耗是-1.4 dB;从以毫瓦为光强单位的曲线上可看出,在55~105 °C的温度变化范围内,光强变化有准线性特性。据我们所知,图5所示的曲线是最好的光纤输出光强衰减随温度变化的衰减曲线之一^[14]。根据前面的理论分析和图4,5显示的实验结果,可以得出双包层单模光纤传感器的工作原理是:导模变为泄漏模后输出光强与外包层折射率变化有准线性关系。

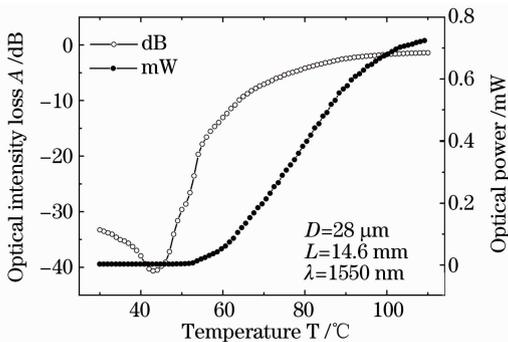


图5 用PMMA和PVDF混合材料制作的传感器的输出光强随环境温度变化的实验曲线

Fig. 5 Plot of the output intensity of a sensor made by the blend of PMMA and PVDF versus the temperature in ambient air

4.3 双包层单模光纤湿度传感器

用长度和内包层外径分别为20 mm和28 μm的传感段制作了湿度传感器。实验检测到的传感器的输出光强随环境湿度变化的曲线如图6所示。图中的两条曲线分别对应于两种不同的外包层厚度,即用质量分数为0.37%的琼脂糖分别涂敷了2次(曲线a)和10次(曲线b)。图中相对湿度100%的数据是在传感头上滴下了几滴水之后获得的。两条曲线的输出光功率的损耗均随着湿度的增加而减小,这是因为水在1550 nm上的折射率小于1.3309^[15],外包层含水量的增加,将使其折射率减小。在100%RH时,光功率的损耗约为0.5 dB,这说明此时外包层材料的折射率已近似等于光纤原包层材料(即本文中的内包层)。这两条曲线在30%~100%RH的范围内,随环境湿度变化呈现出较好的单调响应。

图6中的湿度响应曲线b在30%~100%范围的对应的光强变化范围接近9 dB,优于文献[10]中的一59~-68 dB;文献[16]使用了与本文相同的湿敏材料,其传感度长度(50 mm)比本文的长2.5倍,但其光强变化范围最大才3.5 dB。因此,采用双包层单模光纤的湿度传感器获得了更好的光强调制

范围。

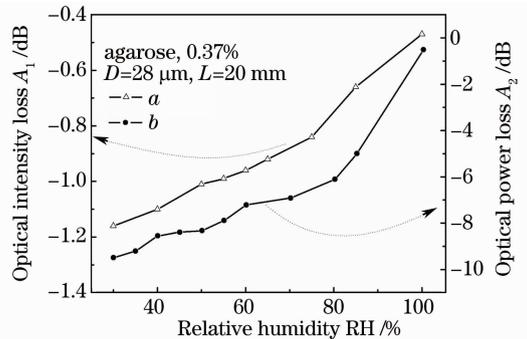


图6 用琼脂糖水溶胶制作的湿度传感器的输出光强随环境湿度变化的实验曲线

Fig. 6 Output intensity of the sensor made by agarose versus the relative humidity in ambient air

5 结 论

本文提出了一种双包层单模光纤传感器结构,根据波导理论推导出了光纤中导模变为泄漏模时,外包层材料折射率与双包层结构参量之间的关系,获得了这种传感器可测量的折射率变化范围。利用已知热光系数的材料制作的温度传感器,从实验上证实了上述理论分析结果,并由理论与实验结果的分析得到了双包层单模光纤传感器的工作原理是:导模变为泄漏模后输出光强与外包层材料一定范围的折射率变化有准线性关系。获得了在55~105 °C的温度范围内的具有准线性响应的光纤温度传感器,对应的光强变化范围达到了39 dB,总的插入损耗是-1.4 dB;提出并证实了在光纤上涂覆敏感材料的一种简便方法,获得了在30%~100%RH范围的光强变化约为9 dB、插入损耗约为0.5 dB的光纤湿度传感器。因此我们认为,双包层单模光纤传感器可能成为插入损耗小、光强变化范围大、具有准线性响应、制作成本低的一种新型光强调制型传感器。

致谢 感谢华南理工大学付时雨教授对本文中湿度传感实验的支持。

参 考 文 献

- 1 T. L. Yeo, T. Sun, K. T. V. Grattan. Fibre-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement[J]. *Sens. Actuators A*, 2008, **144**(2): 280~295
- 2 Wu Yonghong, Qu Wenjun, Shao Changjiang *et al.*. Basic optical-mechanical transformation theoretical equation for FBG strain sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2067~2070
吴永红, 屈文俊, 邵长江等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的理论方程[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2067~2070

- 3 Byoung-ho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2003, **9**(2): 57~79
- 4 Qiao Xueguang, Ding Feng, Jia Zhenan *et al.*. High precision optical fiber Bragg grating demodulation system based on the source filtering for seismic detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2219~2223
乔学光, 丁 锋, 贾振安 等. 基于光源滤波的高精度光纤光栅地震检波解调系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2219~2223
- 5 Xu Bingshi, Xiao Wen. Research of acoustic sounding sensors over obstructs based on reflective intensity modulated fiber-optic sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2508~2512
许秉时, 肖 文. 基于强度型光纤传感器的声波隔体探测关键技术研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2508~2512
- 6 Yang Jianchun, Xu Longjun, Zhang Peng *et al.*. Sensing characteristic of optical fiber refractive index sensor based on core diameter mismatch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1183~1187
杨建春, 徐龙君, 章 鹏 等. 纤芯失配型光纤传感器折射率敏感特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1183~1187
- 7 Li Yajuan, Dang Yagu, Fei Dejun *et al.*. Review of light intensity modulated humidity sensor [J]. *Transducer & Microsystem Technologies*, 2009, **28**(7): 5~8, 11
李雅娟, 党亚固, 费德君 等. 光强调制型光纤湿度传感器评述[J]. *传感器与微系统*, 2009, **28**(7): 5~8, 11
- 8 L. Falco, H. Berthou, F. Cochet *et al.*. Temperature sensor using single mode fiber evanescent field absorption[C]. *SPIE*, 1985, **586**: 114~119
- 9 Sameer M. Chandani, Nicolas A. F. Jaeger. Fiber-optic temperature sensor using evanescent fields in D fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2706~2708
- 10 Lei Zhang, Fuxing Gu, Jingyi Lou *et al.*. Fast detection of humidity with a subwavelength diameter fiber taper coated with gelatin film[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13349-13353
- 11 Huang Xuguang, Ye Xiaojing, Zhang Xiaokang *et al.*. Design and attenuation analysis for fiber-typed variable optical attenuator based on thermo-optic effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1787~1791
黄旭光, 叶晓靖, 张小康 等. 光纤型热光可调光衰减器的设计及其衰减分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1787~1791
- 12 Xiaokang Zhang, Delin Yan, Shupe Mo *et al.*. Fabrication and characterization of doubly cladding fiber optical temperature sensors[C]. *SPIE*, 2009, **7508**: 750807
- 13 Michel Monerie. Propagation in doubly clad single-mode fibers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **18**(4): 535~542
- 14 Marko Kezmah, Denis Donlagic. All-fiber, low-cost single-point and quasi-distributed evanescent field temperature sensors with extended temperature measurement range, based on standard telecommunication graded index fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(23): 4212~4220
- 15 Xiaokang Zhang, Runhua Li. Determination of zero incident angle by optical feedback effect and its applications in the measurement of refractive indices [C]. *SPIE*, 2009, **7506**: 750620
- 16 Francisco J. Arregui, Zuri Ciaurriz, Maria Oneca *et al.*. An experimental study about hydrogels for the fabrication of optical fiber humidity sensors [J]. *Sens. Actuators B*, 2003, **96**(1-2): 165~172