

# 双锥形光纤光栅实现温度、折射率和液位同时测量

赵洪霞 程培红 丁志群 鲍吉龙 蒋鹏 李银杰

宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315010

**摘要** 为了解决光纤光栅传感器同时测量多个参量的难题,结合锥形光纤技术和光纤光栅技术,设计了一款新型双锥形光纤光栅。采用传输矩阵法,借助二层和三层单模光纤纤芯基模有效折射率的色散方程及标量有限元法理论建模,数值分析了均匀腐蚀区直径为  $3\ \mu\text{m}$  时双锥形光纤光栅的反射谱特性。采用氢氟酸渐变腐蚀法实验制备了双锥形光纤光栅,均匀腐蚀区直径为  $3\ \mu\text{m}$  时,呈现 12 个反射峰,2 个主峰和 10 个次峰,与理论分析结果基本吻合。同时选取其中 3 个反射峰测量了温度、折射率和液位,同步测量灵敏度分别为  $9.63\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 、 $1975.96\ \text{nm}/\text{RIU}$ 、 $26.07\ \text{nm}/\text{cm}$ 。双锥形光纤光栅制作简单,作为传感器可同时测量多个参量,不但能有效降低成本,还能拓宽光纤光栅传感器的设计思路。

**关键词** 传感器; 光纤光学; 多参量测量; 双锥形光纤光栅; 温度; 折射率; 液位

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1010005

## Simultaneous Measurement of Temperature, Refractive Index and Liquid Level Based on Biconical Fiber Gratings

Zhao Hongxia Chen Peihong Ding Zhiquan Bao Jilong Jiang Peng Li Yinjie

College of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315010, China

**Abstract** In order to solve the problem of simultaneous multi-parameter measurement with a fiber optic sensor, we proposed a novel biconical optical fiber grating structure based on combination of the tapered optical fiber and optical fiber grating. The reflection spectral characteristics of the biconical optical fiber grating were analyzed by using the transfer matrix method, the fundamental mode effective refractive index dispersion equation of two- and three-layer single-mode fiber and the scalar finite element method. The reflection spectrum was illustrated when the diameter of uniform erosion region was  $3\ \mu\text{m}$ . The hydrofluoric acid etching was used to prepare the biconical fiber Bragg grating. When the diameter of uniform erosion region was  $3\ \mu\text{m}$ , 12 reflection peaks including 2 primary peaks and 10 secondary peaks were observed, which is consistent with the theoretical analyses. Furthermore, three of the resonance peaks were selected to test the sensing response to temperature, refractive index and liquid level. The simultaneous detection sensitivity was found to be  $9.63\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ ,  $1975.96\ \text{nm}/\text{RIU}$  and  $26.07\ \text{nm}/\text{cm}$ , respectively. This biconical fiber grating has a simple fabrication process, it can be used as the multiple-parameter sensors with low cost, and it can also extend the design concept of optical fiber sensor.

**Key words** sensors; fiber optics; multi-parameter measurement; biconical fiber grating; temperature; refractive index; liquid level

**OCIS codes** 280.4788; 060.3735; 060.2370

## 1 引言

光纤光栅传感器具有体积小、灵敏度高、耐腐蚀、安全防爆、不受电磁场干扰等诸多优点,同时对外界应变、温度、折射率和液位等物理量的变化敏感,可用于许多传统传感器难以涉足的极端恶劣场合,并能在极限温度、腐蚀、真空等危险的环境中正常工作,成为最具应用价值和应用前景的多参量传感器。已提出的多参

收稿日期: 2016-06-16; 收到修改稿日期: 2016-07-24

基金项目: 浙江省自然科学基金(Q14A040006)、宁波市自然科学基金(2015A610115, 2015A610081)

作者简介: 赵洪霞(1970—),女,硕士,副教授,主要从事光纤光栅传感技术方面的研究。E-mail: zhx-1228@163.com

量光纤光栅传感器大致可分为两类,多传感器法和单传感器法。多传感器法需要两个或两个以上传感器的组合,这不但增加了系统的复杂性<sup>[1-3]</sup>、体积和连接损耗<sup>[4-5]</sup>,而且提高了成本<sup>[6-7]</sup>;单传感器法可以弥补上述不足,但有些方法成本过高<sup>[8-9]</sup>,有些系统过于复杂<sup>[10]</sup>,有些仅适用于特殊的应用场合<sup>[11-13]</sup>,不具普适性,实用化的并不多,还不能满足实际需要。因此制作简单、成本低廉、实用性强的新型多参量光纤光栅传感器的设计和开发受到了越来越多的关注,亟待进行更深入的研究和探索。

本文结合锥形光纤技术<sup>[14-15]</sup>和光纤光栅技术,提出一种原创结构多参量双锥形光纤光栅传感器。对光纤光栅结构进行特殊的设计后,反射谱呈现多个亚纳米量级的谐振峰,通过差分调制可实现多个参量的区分和测量,为高精度双锥形多参量光纤光栅传感器的应用推广提供理论依据和技术参考。

## 2 双锥形光纤光栅结构模型

双锥形光纤光栅结构如图 1 所示。整个光栅区被分成对称的 5 段:均匀腐蚀区,光栅只有芯层,包层为栅区外环境;渐变腐蚀区,对称分布于均匀腐蚀区两侧,柱形结构呈渐变分布,是最复杂的部分,包括单层结构和双层结构;标准光栅区,对称分布于渐变区两侧,由标准纤芯和包层组成。 $d$  为均匀腐蚀区直径, $\Lambda$  为光栅周期。

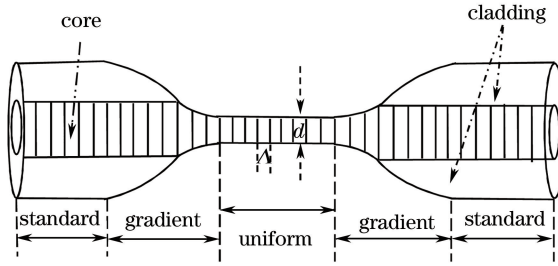


图 1 双锥形光纤光栅结构模型

Fig. 1 Structural model of the biconical fiber grating

## 3 理论分析

根据模式耦合理论,长为  $dz$  的光纤光栅可用传输矩阵  $T_K$  表示<sup>[16]</sup>:

$$T_K = \begin{pmatrix} \cosh(\Omega dz) - i \frac{\zeta}{\Omega} \sinh(\Omega dz) & -i \frac{K}{\Omega} \sinh(\Omega dz) \\ i \frac{K}{\Omega} \sinh(\Omega dz) & \cosh(\Omega dz) + i \frac{\zeta}{\Omega} \sinh(\Omega dz) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\Omega = \sqrt{K^2 - \zeta^2}$ ,  $\zeta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$ ,  $K = \frac{\pi \delta_n}{\lambda}$ ,  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}$ ,  $\delta_n$  为调制深度, $K$  为耦合系数, $n_{\text{eff}}$  为纤芯有效折射率, $\lambda$  为激光波长。

双锥形光纤光栅可等效为标准光栅区、渐变腐蚀区及均匀腐蚀区,按图 1 所示的结构图顺次级联。采用传输矩阵法可得纤芯基模经过整个光栅后的电场幅度为

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = T_K(dz_3, n_{3\text{eff}}) T_M(dz_2, n_{2\text{eff}}) T_K(dz_1, n_{1\text{eff}}) T_M(dz_2, n_{2\text{eff}}) T_K(dz_3, n_{3\text{eff}}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $A$  和  $B$  分别表示模场沿正向和反向缓慢变化的幅度。 $T_M(dz_2, n_{\text{eff}})$  是采用传输矩阵法均匀分段得到的渐变腐蚀区总矩阵,其表达式为

$$T_M(dz_2, n_{2\text{eff}}) = T_M T_{M-1} \cdots T_L \cdots T_1 \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $A_0$  和  $B_0$  分别表示模场沿正向和反向缓慢变化的初始边界条件。

由(1)式,光栅的传输矩阵与纤芯有效折射率密切相关。由于整个光栅各区段结构不同,有效折射率的计算方法各异。

均匀腐蚀区光栅只有纤芯,包层为外界环境。满足单模微纳光纤基模有效折射率的条件<sup>[17]</sup>

$$n_{\text{eff}}^2 = n_0^2 - \left(\frac{U}{V}\right)^2 (n_0^2 - n_1^2), \quad (4)$$

式中  $U = d\sqrt{k_0^2 n_0^2 - \beta^2} / 2$  为横向传播常数,  $V = \pi d\sqrt{n_0^2 - n_1^2} / \lambda$  表示归一化频率,  $n_0$  和  $n_1$  分别为纤芯材料折射率和包层材料折射率,  $\beta$  和  $k_0$  分别为传播常数和真空中的波数。同时  $U$  和  $V$  满足光纤线偏振模式的本征方程

$$\frac{U J_{m-1}(U)}{J_m(U)} = -\frac{W K_{m-1}(W)}{K_m(W)}, \quad (5)$$

$$U^2 + W^2 = V^2, \quad (6)$$

式中  $J_m, K_m$  分别是第一类贝塞尔函数, 第二类变型的贝塞尔函数,  $m$  表示贝塞尔函数的阶数。

标准光栅区纤芯有效折射率可由表征单模弱导光纤纤芯基模有效折射率的色散方程求得<sup>[18]</sup>:

$$V\sqrt{1-b} \frac{J_1(V\sqrt{1-b})}{J_0(V\sqrt{1-b})} = V\sqrt{b} \frac{N_1(V\sqrt{b})}{N_0(V\sqrt{b})}, \quad (7)$$

式中  $J_0$  和  $J_1$  是 0 阶和 1 阶第一类 Bessel 函数,  $N_0$  和  $N_1$  是 0 阶和 1 阶修正的第二类 Bessel 函数,  $b = (n_{\text{eff}}^2 - n_1^2) / (n_0^2 - n_1^2)$  表示模式的归一化有效折射率, 渐变腐蚀区结构复杂, 有效折射率没有固定的计算公式, 因此采用有限元法计算。有限元法是求解几何形状复杂的数学边值问题的一种有效数学计算方法。其基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限个单元区域按一定方式连接在一起的组合体。由于单元区域能按不同的连接方式进行组合, 本身又可以有不同的形状, 所以适用于渐变光栅区有效折射率的计算。

根据麦克斯韦方程, 阶跃单模石英光纤的本征值方程为

$$\nabla^2 \Phi = (\beta^2 - k_0^2 n^2) \Phi. \quad (8)$$

利用有限元法将渐变光栅区单元化, 由 (8) 式得特征值方程为

$$(\mathbf{C} - \beta^2 \mathbf{D}) \Phi = 0, \quad (9)$$

式中  $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{D}$  是稀疏矩阵,  $\Phi$  为特征向量, 代表全矢量形式的磁场分量或电场分量。求出特性值  $\beta$ , 再由  $\beta = 2\pi n_{\text{eff}} / \lambda$  求出相应的有效折射率。

## 4 数值模拟与结果分析

利用 Matlab2007 软件对此双锥形光纤光栅光谱特性进行数值仿真。图 2 为理论模拟得到的设计光栅反射谱, 其中有关参数为:  $n_0 = 1.458$ ;  $n_1 = 1.45$ ; 标准光栅区纤芯半径为  $4.15 \mu\text{m}$ ; 包层半径为  $62.5 \mu\text{m}$ ; 整个光栅区长度为  $1 \text{ cm}$ , 标准光栅区、渐变腐蚀区和均匀腐蚀区长度比为  $4.5:1:4.5$ ; 均匀腐蚀区纤芯直径为  $3 \mu\text{m}$ ; 光栅制作周期  $\Lambda = 534.6 \text{ nm}$ , 调制深度  $\delta_n = 0.5 \times 10^{-3}$ 。

如图 2 所示, 双锥形光纤光栅的反射谱由多个谐振峰构成, 其中 2 个主反射峰是 2 个标准光栅区所在光栅形成的, 2 个主反射峰之间的多个次峰是渐变光栅区在直径逐渐减小的过程中, 芯模场直径变大, 激发多个包层模, 形成多模干涉的结果。2 个主峰两侧的振荡峰是由于光栅两端折射率调制突变形成的旁瓣。根据多谐振峰形成的原理, 均匀腐蚀区直径对谐振峰起决定性作用。当  $d = 3 \mu\text{m}$  时, 有 10 个次级谐振峰, 2 个主反射峰。

同时在显微镜下记录双锥形光纤光栅渐变腐蚀区的光栅直径, 其分布曲线如图 3 所示。其中横轴为均匀腐蚀段中心到原点的距离。腐蚀后的渐变光栅区切面直径呈对数分布, 同时测得渐变光栅区的长度为  $0.503 \text{ mm}$ , 标准光栅区的长度为  $2.97 \text{ mm}$ 。

## 5 实验研究

实验采用氢氟酸渐变腐蚀法制备双锥形光纤光栅, 此方法获得的光栅完全满足短渐变腐蚀区的非绝热条件, 可以产生多模干涉, 激发多个谐振峰。首先将 SMF-28e+ 光纤(美国 Corning 公司) 在  $10 \text{ MPa}$  气压下载氢 14 d, 然后采用相位掩模法制作周期为  $534.6 \mu\text{m}$ 、长度为  $1 \text{ cm}$  的普通光纤光栅。其反射谱如图 4 所示, 谐振波

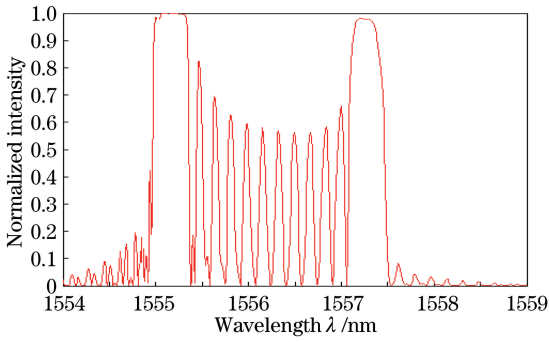


图 2 双锥形光纤光栅反射谱

Fig. 2 Reflection spectrum of the biconical fiber gratings

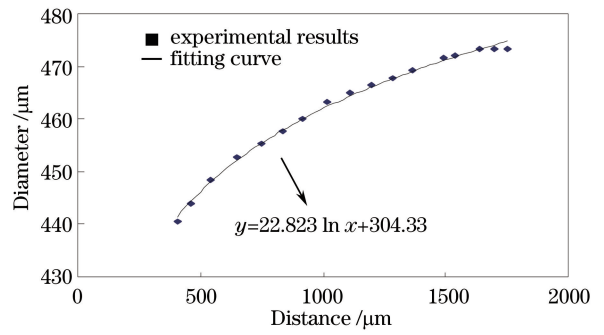


图 3 渐变腐蚀区光栅直径曲线

Fig. 3 Grating diameter in the gradient region

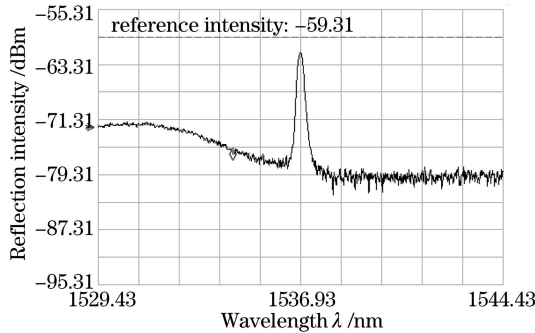


图 4 光纤光栅反射谱

Fig. 4 Reflection spectrum of the fiber grating

长为 1536.93 nm, 3 dB 带宽为 0.24 nm, 幅值为 18 dB。为了使光栅的稳定性较好, 需进行退火处理。

将自制光纤光栅放入由氢氟酸(质量分数为 40%)和纯净水按 1:2 的体积比配制的溶液中, 光栅中间 3 mm 长度完全浸于腐蚀液中, 光纤两端固定, 同时利用光谱仪实时监测腐蚀过程中光栅反射谱的变化。实验装置如图 5 所示, 图中 SLED 为宽带光源, OSA 为光谱分析仪(美国 Agilent 86140B, 精度 0.06 nm), ISO 为光纤隔离器, 防止光波返回光源; IMG 为匹配液。在最初腐蚀的 80 min 内, 光栅反射谱幅值基本不变, 谐振波长缓慢向右漂移, 由 1536.93 nm 增大至 1537.04 nm。随后, 谐振波长快速左移, 幅值急速减小, 谐振峰个数增多。继续腐蚀 10 min 后停止, 用去离子水冲洗腐蚀后的光栅, 晒干后光栅反射谱如图 6 所示。反射谱中谐振峰由 1 个变为 12 个, 两侧各为 1 个主峰, 中间为 10 个次峰。将腐蚀后的光纤光栅放在显微镜(BX51, 日本 Olympus)下观察, 测得光栅形貌如图 7 所示。由于显微镜观察范围限制, 光栅区域分左右两部分呈现。标准圆柱形光纤光栅由于光纤包层和纤芯基质材料二氧化硅对氢氟酸具有极强的吸附作用, 光纤光栅浸入区域完全腐蚀, 而两侧未浸入部分边缘区域渐变腐蚀变成锥形分布, 同时测得均匀腐蚀段光栅直径为 3 μm。

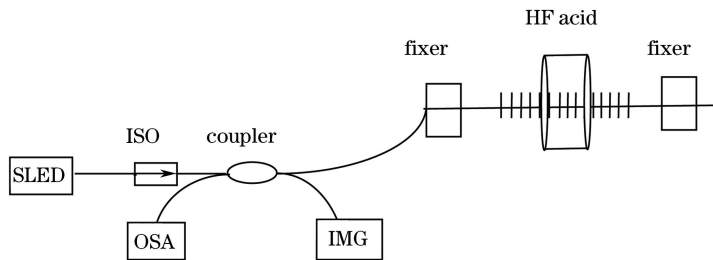


图 5 腐蚀装置图

Fig. 5 Schematic of the etching setup

利用制备的双锥形光纤光栅分别标定温度、折射率和液位三个参量。在光栅不弯曲不受力的情况下对双锥形光纤光栅进行温度传感特性测量。利用温控箱(精度 1 °C)控制温度, 光谱仪监测选取的三个谐振波

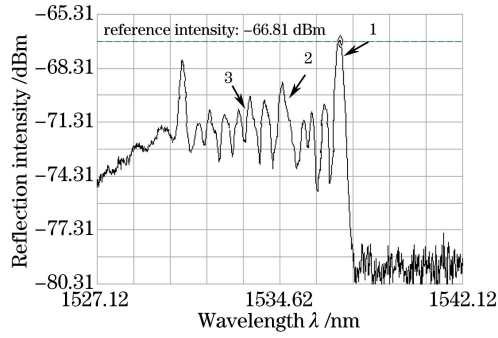


图 6 腐蚀后光纤光栅反射谱

Fig. 6 Reflection spectrum of the etched fiber

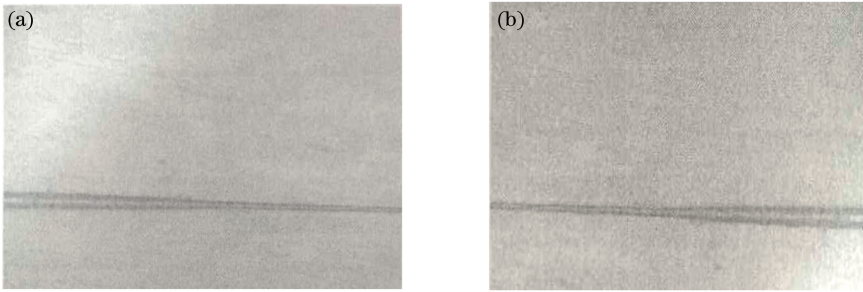


图 7 腐蚀后光纤光栅形貌图。(a)左半部分;(b)右半部分

Fig. 7 Topographic images of the etched fiber grating. (a) Left half; (b) right half

长的变化。三个反射峰的谐振波长分别为 1536.42, 1533.29, 1532.88 nm。测得谐振波长的变化与温度呈线性关系,且重复性较好,对应关系曲线如图 8 所示。

由图 8 可知,三个谐振波长随温度升高均发生红移,且温度灵敏度为正值,说明所选用的光纤纤芯的热光系数大于包层的热光系数。同时还发现温度变化时反射谱形状基本保持不变,只是发生平移。在 23~72 °C 范围内,温度灵敏度系数分别为 0.0114, 0.0255, 0.0316 nm/°C。

选不同折射率的食盐水溶液作为液体环境,测量上述三个谐振波长对折射率的传感特性,实验结果如图 9 所示。

由图 9 可知,折射率在 1.3355~1.3789 范围内,三个选定波长的峰值波长与折射率成正比,随着折射率的增大,谐振波长红移。折射率传感灵敏度分别为 4.4191, 2.8335, 6.8015 nm/RIU, 其中 RIU 表示折射率单位。

图 10 是实验测得的三个谐振波长与水溶液液位的关系曲线。在 5.95~7.15 cm 液位区间内,液位传感灵敏度分别为 0.1101, -0.0097, 0.085 nm/cm。

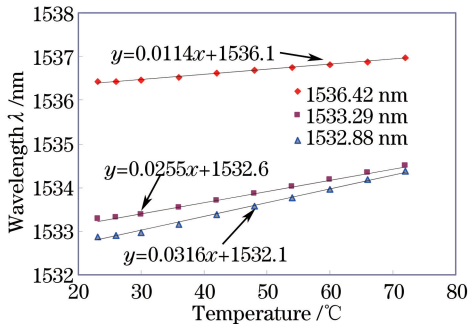


图 8 谐振峰波长与温度之间的关系

Fig. 8 Relationship between resonance wavelength and temperature

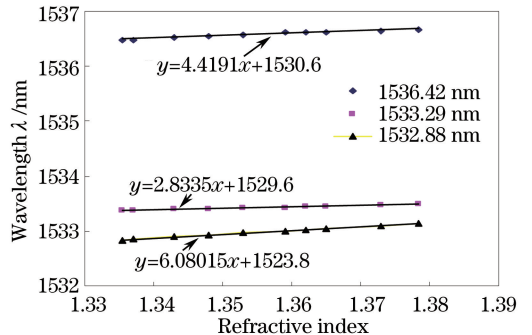


图 9 谐振峰波长与折射率之间的关系

Fig. 9 Resonance wavelength versus refractive index



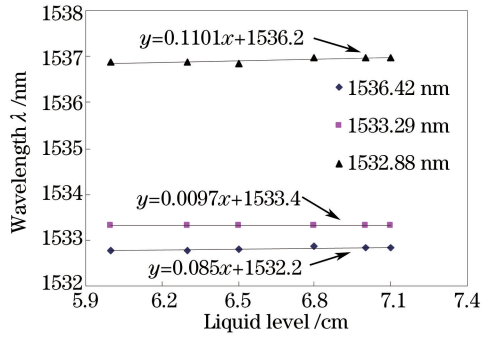


图 10 谐振峰波长与液位之间的关系

Fig. 10 Resonance wavelength versus liquid level

将上述选定的三个谐振波长对应测得的温度传感灵敏度  $T$ 、折射率传感灵敏度  $N$  和液位传感灵敏度  $H$  测量值分别代入矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta N \\ \Delta H \end{bmatrix} = \frac{1}{F} \begin{bmatrix} T_{\lambda_1} & T_{\lambda_2} & T_{\lambda_3} \\ N_{\lambda_1} & N_{\lambda_2} & N_{\lambda_3} \\ H_{\lambda_1} & H_{\lambda_2} & H_{\lambda_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \\ \Delta \lambda_3 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中  $F = T_{\lambda_1} N_{\lambda_2} H_{\lambda_3} - T_{\lambda_3} N_{\lambda_2} H_{\lambda_1}$ ，得一定范围内温度、折射率和液位的同步测量灵敏度分别为 9.63 nm/°C, 1975.96 nm/RIU, 26.07 nm/cm。

## 6 结 论

分析了一定条件下双锥形光纤光栅反射谱的特性，利用氢氟酸渐变腐蚀法实验室制备了该光栅，并用其实现了温度、折射率和液位三参量的测量。双锥形光纤光栅制作简单、成本低、重复性好，适于石化、农业生产、染料和水利等领域的多参量计量，具有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Zhaoxia, Yan Dongmei, Li Zhiquan. Multi-parameter monitoring system based on FBG for bridge structure [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(1): 114-117.  
吴朝霞, 阎冬梅, 李志全. 光纤光栅多参数桥梁结构监测系统的研究 [J]. 应用光学, 2009, 30(1): 114-117.
- 2 Zhang Shaoxian, Lü Guohui. Multi-parameter fluid measuring system based on fiber Bragg grating [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering, 2010, 37(3): 100-102.  
张少先, 吕国辉. 基于光纤光栅的多参量流体测量系统 [J]. 黑龙江水专学报, 2010, 37(3): 100-102.
- 3 Zhu Tao, Rao Yunjiang, Mo Qiuju, et al. Low cost sensing system for simultaneous measurements of temperature, strain and torsion [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 655-658.  
朱 涛, 饶云江, 莫秋菊, 等. 温度/应变/扭曲三参量同时测量低成本传感系统 [J]. 光子学报, 2006, 35(5): 655-658.
- 4 Wang Jing. Study on optical fiber Bragg grating multi-parameter sensing theory and technology and its application in monitoring underground engineering disasters [D]. Jinan: Shandong University, 2011.  
王 静. 光纤光栅多参数传感理论技术研究及其在地下工程灾害监测中的应用 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- 5 Rao Y J, Henderson P J, Jackson D A, et al. Simultaneous strain, temperature and vibration measurement using a multiplexed in-fibre-Bragg-grating/fibre-Fabry-Perot sensor system [J]. Electronics Letters, 1997, 33(24): 2063-2064.
- 6 Araujo F M, Ferreira L A, Santos J L. Simultaneous determination of curvature, plane of curvature, and temperature by use of a miniaturized sensing head based on fiber Bragg gratings [J]. Applied Optics, 2002, 41(13): 2401-2407.
- 7 Guo Ting. Using FBG sensor to measure strain, of temperature and strain of the fiber grating [D]. Xi'an: Xi'an University of Posts, 2013.  
郭 婷. FBG 传感对应变, 温度以及湿度的同时测量 [D]. 西安: 西安邮电大学, 2013.
- 8 Pan Chonglin, Xi Xiaoliang, Zhang Fumei. Using photonic crystal fiber grating sensor to measure temperature, stain and gas concentration simultaneously [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(2): 374-380.

- 潘崇麟, 惠小强, 张涪梅. 用光子晶体光纤光栅实现温度、应力和气体浓度的同时测量[J]. 应用光学, 2013, 34(2): 374-380.
- 9 Zhan C, Zhu Y, Yin S Z, *et al.* Multi-parameter harsh environment sensing using asymmetric Bragg gratings inscribed by IR femtosecond irradiation[J]. Optical Fiber Technology, 2007, 13(2): 98-107.
- 10 Eric U, Drew V, Nelson C, *et al.* Three-axis strain and temperature fiber optic grating sensor[C]. SPIE, 1996, 2718: 104-109.
- 11 Hu Limin. Investigation on intercity-modulated fiber sensors for multi-parametric measurement[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2012.  
胡李敏. 基于强度解调的光纤多参量传感器研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
- 12 Luo Y Y, Xia L, Yu C, *et al.* Multi-parameter optical fiber sensor based on enhanced multimode interference[J]. Optics Communications, 2015, 344(1): 120-124.
- 13 Luo Jianhua, Zhang Gui, Gu Yanran, *et al.* Multi-parameter sensor based on long period fiber Bragg grating and Mach-Zehnder interferometer: CN103822666A[P]. 2014-05-28.  
罗建花, 张 贵, 谷炎然, 等. 基于长周期光纤光栅和马赫-曾德(编者注: 马赫-曾德尔)干涉仪的多参量传感器: CN103822666A[P]. 2014-05-28.
- 14 Sun Aijuan, Tian Weijian, Qu Youshan, *et al.* Simulation of light propagation in fiber optic taper by Monte Carlo (editor notes: Monte Carlo) method[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(4): 552-554.  
孙爱娟, 田维坚, 屈有山, 等. 锥形光纤中光波传输特性的蒙特卡罗模拟[J]. 光子学报, 2006, 35(4): 552-554.
- 15 Xu Yingying. Multimode evolution and micromixer application of non-adiabatic microfiber taper[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.  
徐颖颖. 非绝热锥形微纳光纤的多模效应及其在微混合器中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- 16 Yamada M, Sakuda K. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguide via a fundamental matrix approach [J]. Applied Optics, 1987, 26(1): 3474-3478.
- 17 Liao Yanbiao. Fiber optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.  
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- 18 Erdogan T. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(8): 1760-1773.