

doi: 10.3788/gzxb20164503.0306003

基于光纤微腔的温度及折射率同时测量型传感器

时菲菲, 赵春柳, 徐贲, 王东宁

(中国计量学院 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

摘 要: 基于多光束干涉原理, 设计了一种基于光纤微腔的温度及折射率同时测量的反射型光纤传感器. 该传感器将渐变折射率多模光纤的一端用氢氟酸腐蚀形成一个空气腔, 带空气腔的渐变折射率多模光纤一端和单模光纤熔接, 另一端切平构成传感头. 实验选取渐变折射率多模光纤的长度为 $538.1 \mu\text{m}$, 空气腔长度为 $40.8 \mu\text{m}$. 结果表明: 光纤微腔结构所形成的多光束干涉光谱条纹对比度与光纤微腔外的溶液折射率相关, 干涉波峰移动与环境温度相关, 通过监测条纹对比度和干涉波峰的移动, 可以实现对折射率和温度的同时测量. 当折射率在 $1.3415 \sim 1.4320$ RIU 变化时, 反射强度对折射率的灵敏度为 57.24 dB/RIU ; 当温度在 $30 \text{ }^\circ\text{C} \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间变化时, 谐振波长对温度的灵敏度为 $12.3 \text{ pm/}^\circ\text{C}$, 可检测到的最小温度变化为 $1.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 测得最小折射率变化为 3.4×10^{-4} . 该传感器也可应用于其他参量的测量, 具有良好的应用前景.

关键词: 光纤传感器; 微腔; 多光束干涉; 多模光纤; 腐蚀; 温度; 折射率

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0306003-5

Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on Optical Fiber Cavity Sensor

SHI Fei-fei, ZHAO Chun-liu, XU Ben, WANG Dong-ning

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on an optical fiber cavity sensor was demonstrated, which is a reflective and multi-beam interference based sensor. The sensor head is made up of a normal single mode fiber, a graded-index multimode fiber and an air gap. The air gap just locates between the single mode fiber and the graded-index multimode fiber. The lengths of the graded-index multimode fiber and the air gap are $538.1 \mu\text{m}$ and $40.8 \mu\text{m}$, respectively. The fringe contrast and the wavelength of the interference, due to multiple beam interferences in the sensor head, vary with the RI and temperature of the solution, respectively. Hence, the simultaneous measurements of refractive index and temperature, by monitoring the movement of the fringe contrast and the wavelength of the interference, were achieved. Experimental results show that the proposed optical fiber cavity sensor presents a RI sensitivity of 57.24 dB/RIU in the measurement $1.3415 \sim 1.4320$ RIU and a temperature sensitivity of $12.3 \text{ pm/}^\circ\text{C}$ in the range of $30 \text{ }^\circ\text{C} \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$. The minimum temperature that can be detected is $1.2 \text{ }^\circ\text{C}$, the minimum resolution of RI that can be detected is 3.4×10^{-4} . This optical fiber cavity sensor can also be applied in other sensing fields and has good prospects.

Key words: Fiber sensors; Cavity; Multiple beam interferences; Multimode fiber; Corrosion; Temperature; Refractive index

OCIS Codes: 060.2310; 060.2380; 060.4005; 120.2230

基金项目: 浙江省国际科技合作专项项目(No. 2013C24018)资助

第一作者: 时菲菲(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感. Email: 392237045@qq.com

导师(通讯作者): 赵春柳(1973-), 女, 博士后, 教授, 主要研究方向为光纤传感. Email: zhchunliu@hotmail.com

收稿日期: 2015-10-28; 录用日期: 2015-12-22

0 引言

近年来,光纤传感器因具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强以及成本低等特点,被广泛应用于折射率^[1-3]、应变和曲率^[4-5]、温度和湿度^[6-9]等参数的测量.其中,温度和折射率是两个对于材料本身非常重要的参数,在化学、生物和医疗等领域都需要对材料的折射率和温度进行测量.而且在工业生产、环境监测和食品监测方面也具有广泛的应用.迄今为止,测量折射率和温度的方法有很多.在折射率测量方面,主要有光纤表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)折射率传感器^[10]、光纤光栅型折射率传感器、光纤 Fabry-Perot 折射率传感器和菲涅尔光纤折射率传感器^[11],其中光纤光栅型折射率传感器可分为光纤布喇格(Fiber Bragg Grating, FBG)折射率传感器和长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)型折射率传感器.

在测量溶液折射率的同时,温度变化会引起折射率的变化,为了更准确地测量溶液的参数,需要对折射率和温度同时测量^[12-13].如利用倾斜光栅的纤芯耦合和包层耦合形成的不同透射峰对温度和折射率的不同灵敏度,用敏感矩阵实现同时测量^[14].齐亮^[15]等人提出基于光子晶体光纤长周期光栅的强度解调测量系统,包括 FBG 传感头、基于光子晶体光纤长周期光栅的强度解调部分以及光栅匹配和信号处理部分,利用现有成熟的 FBG 制作技术,通过相同 FBG 的实时补偿来实现折射率和温度的同时测量.文献^[16]将 3 个长周期光栅(Long Period Grating, LPG)级联,利用导模与高阶模和低阶模分别耦合的不同透射峰对温度和折射率的不同灵敏度,用敏感矩阵实现同时测量.文献^[17]提出基于 MSM 结构与 FBG 级联可同时测量温度和折射率的传感器,实验测得 MSM 结构和 FBG 的温度灵敏度分别为 0.055 2 nm/°C 和 0.015 8 nm/°C, MSM 结构的温度灵敏度是 FBG 的 5 倍,折射率灵敏度为 109.702 nm/RIU,而 FBG 对折射率变化相对不敏感.但是,这些传感器大都是透射型传感器,测量时需要将传感头穿过被测溶液,因此,在某些环境下测量具有局限性.

本文提出了一种基于光纤微腔的温度及折射率同时测量的反射型光纤传感器.传感头由渐变折射率多模光纤(Graded-Index Multimode Fiber, GI-MMF)、空气腔和单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)构成,将一端腐蚀的 GI-MMF 和 SMF 熔接,熔接处形成空气腔,然后将 GI-MMF 的另一端切平构成传感头.因为在两根光纤中加入一个空气腔,使得干涉条纹的精细度得到了提高,可以更准确读出波长大小.测量液体折射率时,只需将传感头插入被测溶液中即可,在生物和

化学领域有很好的应用前景.

1 实验装置及传感原理

图 1 是实验装置图.宽带光源(Broadband Light Source, BBS)的光通过 SMF 从 1 口进入环形器(Circulator)中,从环形器的 2 口出射,经过传感头时发生干涉,传感头将入射的光反射,进入环形器的 2 口,经环形器的 3 口将反射光传输到光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)中.传感头的结构如图 2,用 GI-MMF 左端用氢氟酸(HF)腐蚀一个空气腔,将单模光纤(SMF)与腐蚀后的 GI-MMF 熔接,然后将 GI-MMF 的右端切平制成传感头.

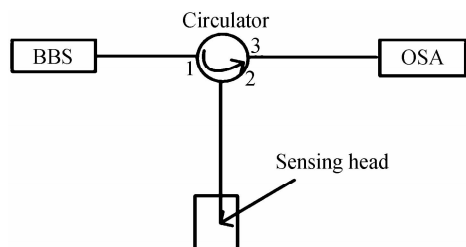


图 1 实验系统结构

Fig. 1 Sensor system structure

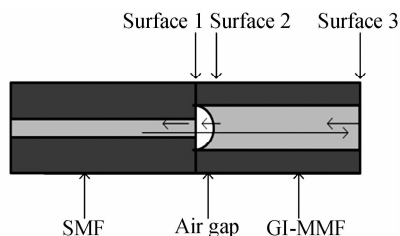


图 2 传感头结构

Fig. 2 Sensor head structure

由 SMF 的右端面、空气腔以及 GI-MMF 的右端面构成了三个反射面,当入射光经过第一个反射面时,一部分光束被反射,另一部分光继续传输;经过第二个反射面时,也有一部分光被反射,剩下的光束继续传输;经过第三个反射面时,又有一部分的光束被反射,其余光束透射到空气中.经第一反射面、第二反射面和第三反射面反射回的光会发生干涉. θ_1 表示在第一个反射面上形成的相位差, θ_2 表示在第二个反射面上形成的相位差.通过计算可以得出相位差为

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (1)$$

式中, n 为介质折射率, L 为与 n 对应的法珀腔腔长, λ 为自由空间光波长.

从式(1)可以看出,当温度发生变化时, L 会变化,导致相位差发生改变,从而使反射谱中产生干涉的光波长发生变化,因此可以用来测量温度变化.

E_0 为入射光的电场分量, E_1 、 E_2 和 E_3 分别为三个面的反射光重新耦合进单模光纤的电场分量.假设

R_1 、 $R_{2\text{eff}}$ 和 $R_{3\text{eff}}$ 分别表示三个反射面的有效反射率. 传感器的归一化反射光强可表示为

$$\frac{I_r}{I_0} = \frac{|E_1 + E_2 + E_3|^2}{|E_0|^2} = R_1 + R_{2\text{eff}} + R_{3\text{eff}} - 2\sqrt{R_1 R_{2\text{eff}}} \cos\theta_1 + 2\sqrt{R_{2\text{eff}} R_{3\text{eff}}} \cos\theta_2 - 2\sqrt{R_1 R_{3\text{eff}}} \cos(\theta_1 \theta_2) \quad (2)$$

从式(2)可以看出,当外界折射率发生变化时,只有 $R_{3\text{eff}}$ 发生改变,导致发生变化,因此可以通过的变化来测量折射率的变化. 由此,可以推导出三光束干涉条纹对比度达到最大值的条件为

$$-1 \leq \frac{R_1 + R_{\text{eff}} - R_{2\text{eff}}}{2\sqrt{R_1 R_{2\text{eff}}}} \leq 1 \quad (3)$$

式(3)是一个不等式,对三个面反射率的要求并不是严格不变的,也就是说达到最大对比度的条件并不唯一,这让我们更容易做出好的传感器.

2 实验分析与讨论

实验使用的渐变折射率多模光纤是长飞公司生产的 GI 62.5/125 型多模光纤,纤芯直径为 62.5 μm . 在传感器制作过程中,腐蚀时间的长短影响了反射光谱的形状,腐蚀时间越长,法珀腔腔长越长,切割后反射光谱的周期越小,仪器显示的波形周期数越多. 而观察只需要在一个周期内,因为使用的是干涉条纹的最大对比度来计算传感器的性能,而最大对比度出现的位置是在双光束干涉波形的波谷位置或者其附近. GI-MMF 的长短则对应于传感器光谱的自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)的大小,即两个相邻的谐振波长之间的差值大小,GI-MMF 越长,FSR 越小,条纹越密集,反之,则条纹越稀疏.

图 3 是显微镜下的传感器结构图. 实验选取 GI-MMF 长度为 538.1 μm ,空气腔长度为 40.8 μm 的传感头对温度和折射率同时测量.

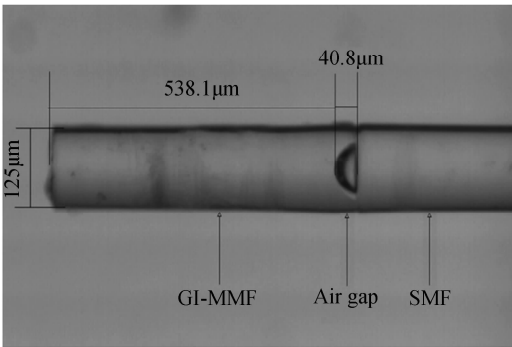


图 3 显微镜下传感器结构

Fig. 3 The sensor head's picture in microscope

图 4 是反射光谱随折射率变化的光谱图及其局部放大图. 保持温度不变,将传感器插入不同浓度的甘油溶液中,对传感器进行折射率传感特性测量. 实验配制了不同浓度的甘油溶液,折射率范围为 1.341 5~

1.432 0. 图 5 是图 4 在 1 520~1 525 nm 处的局部放大图,当折射率为 1.341 5 时,三个波峰强度依此为 -20.81 dB,-20.72 dB,-20.84 dB,三个波谷强度依此为 -25.14 dB,-25.21 dB,-25.49 dB. 如图 3 所示,折射率从 1.341 5~1.432 0 变化时,干涉波长保持不变,反射强度会随着折射率的变化而变化.

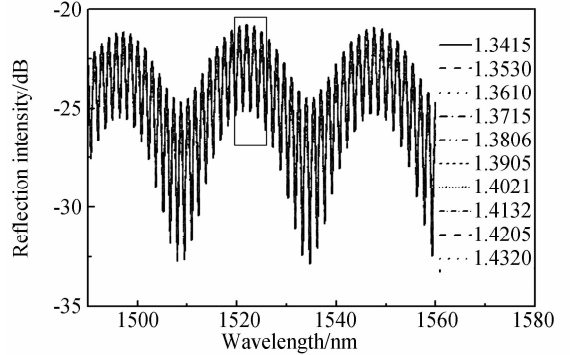


图 4 反射光谱随折射率变化光谱

Fig. 4 The reflection intensity spectra at the RIU change

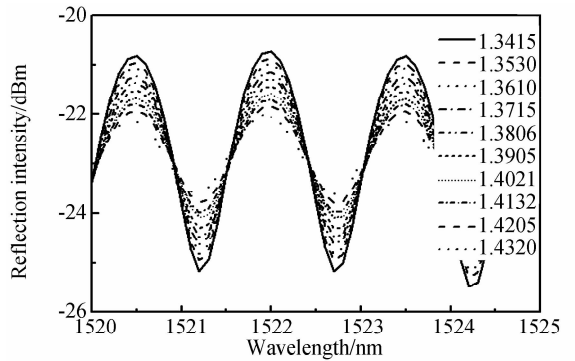


图 5 反射光谱的局部放大

Fig. 5 Spectrum local amplification

图 6 是消光比(Extinction Ratio, EXT)和折射率变化的关系图,其关系为 $y = -57.239x + 85.096$,线性度为 0.998 4,线性度较好,可以看到折射率的灵敏度为 57.24 dB/RIU. 当光谱仪测量的精度为 0.01 dB 时,可以检测到最小的折射率变化为 1.7×10^{-4} .

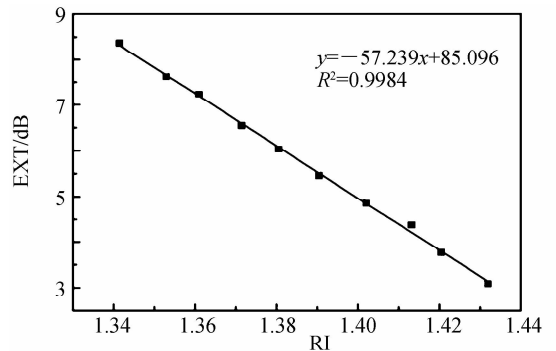


图 6 EXT 和折射率的变化关系

Fig. 6 Relationship between the EXT and solution RI

图 7 是干涉波谱随温度变化的光谱图,图 8 是图 7 在 1 520~1 525 nm 处的局部放大图. 当温度为 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,

三个波峰强度依此为 0.05 dB、0.06 dB、-0.02 dB，三个波谷强度依此为 -4.54 dB、-4.64 dB、-5.02 dB。将传感器放在恒温水浴中，从 30℃ 加热到 70℃，每 10℃ 记录一次反射波谱。如图 7 所示，随着温度的升高，波峰漂移了 0.5 nm。

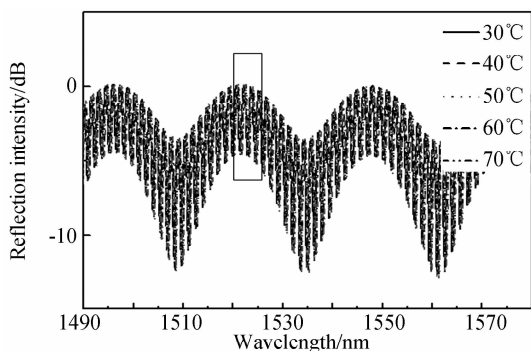


图 7 反射光谱随温度变化

Fig. 7 The spectra at the temperature change

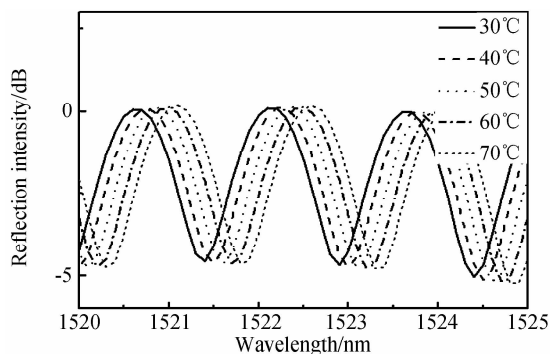


图 8 反射光谱局部放大图

Fig. 8 Spectrum local amplification

图 9 是波长随温度变化的关系图。从图 9 可以看出，波长变化与温度的关系为 $y = 0.0123x + 1521$ ，线性度为 0.9998，线性度较好，传感器对温度的灵敏度为 12.3 pm/℃。

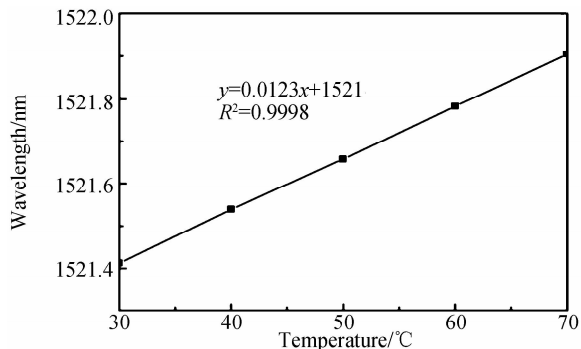


图 9 干涉波长和温度的关系

Fig. 9 Relationship between the wavelength and temperature

图 10 是传感头在水浴中，EXT 随温度的变化情况。从图 10 可以看出，当水浴的温度从 30℃ ~ 70℃ 变化时，EXT 的波动极小，在 0.02 dB 范围内，使得测量精度变为 3.4×10^{-4} ，传感器的稳定性较好。用阿贝折

射仪测量了水的温度从 30℃ ~ 70℃ 变化时，折射率为 1.3343，测不到更微小的变化，与实验测得的结果相吻合。

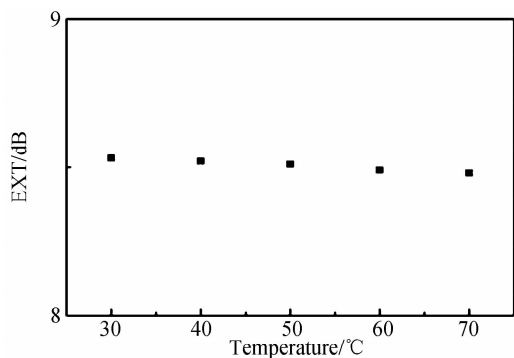


图 10 在水中，EXT 随温度的变化情况

Fig. 10 EXT with the change of temperature in water

由于反射强度直接与折射率相关，干涉波峰移动直接与温度相关，因此，通过监测反射谱强度和谐振波峰的移动，可以得到反射强度的变化和谐振波峰移动的多少，进而可以实现对温度和折射率的同时测量。

3 结论

提出了一种基于光纤微腔的温度及折射率同时测量型传感器。将一段左端腐蚀成凹槽的 GI-MMF 与普通单模光纤熔接，右端切平构成传感头，并选取了 GI-MMF 长度为 538.1 μm，空气腔长度为 40.8 μm 的传感头对温度和折射率双参数测量。实验中使用光谱仪的强度精度为 0.01 dB，波长精度为 15 pm。当采用窄线宽可调谐激光器配合高精度光探测器时，同样可以实现对波长和强度的解调，其波长分辨率为 1 pm，光功率灵敏度为 0.01 dB，所对应的折射率传感精度达到 1.7×10^{-4} ，温度传感精度达到 0.08℃，相比于光谱仪，精度更高，成本更低。实验表明，传感头对折射率的灵敏度为 57.24 dB/RIU，可以检测到的最小折射率变化为 3.4×10^{-4} ；对温度的灵敏度为 12.3 pm/℃，可检测到最小的温度变化为 1.2℃。该传感器具有灵敏度高、结构简单、易制作、成本低廉等优点，具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] PANG F, LIU H, GUO H, *et al.* In-fiber Mach - Zehnder interferometer based on double cladding fibers for refractive index sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(10): 2395-2400.
- [2] RONG Q, QIAO X, WANG R, *et al.* High-sensitive fiber-optic refractometer based on a core diameter mismatch Mach Zehnder interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(7): 2501-2505.
- [3] LEE S M, SAINI S S, JEONG M Y. Simultaneous measurement of refractive index, temperature, and strain using etched-core fiber Bragg grating sensors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(19): 1431-1433.
- [4] ZHU Xiao-hui, ZHANG Ming, ZHOU Hong-pu, *et al.* A

- kind of optical fiber Bragg grating pressure sensor design and experiment[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2009, **38**(11): 2785-2788.
- 褚晓慧, 张敏, 周宏朴, 等. 一种光纤布喇格光栅压力传感器的设计及实验[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2785-2788.
- [5] WU Hao-wei, YING Zhao-fu, PENG Bao-jin, *et al.* Based on the technology of thin fiber modal interference refractive index sensing characteristic experiment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1881-1883.
- 吴浩伟, 应朝福, 彭保进, 等. 基于薄芯光纤模态干涉技术的折射率传感特性实验研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(12): 1881-1883.
- [6] CAO Ye, ZHAO Chen, TONG Zheng-rong. Interferometric type all fiber optic sensor with simultaneous dual parameter measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(10): 1006002.
- 曹晔, 赵晨, 童峥嵘. 双参量同时测量的干涉型全光纤传感器[J]. *光子学报*, 2015, **44**(10): 1006002.
- [7] LÜ An-qiang, LI Yong-qian, LI Jing, *et al.* Simultaneous calibration method for strain and temperature of distributed sensing fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1206002.
- 吕安强, 李永倩, 李静, 等. 分布式传感光纤应变和温度同时标定方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(12): 1206002.
- [8] ZHOU X, CHEN K, MAO X, *et al.* A reflective fiber-optic refractive index sensor based on multimode interference in a coreless silica fiber[J]. *Optics Communications*, 2015, 340: 50-55.
- 周安强, 李永倩, 李静, 等. 分布式传感光纤应变和温度同时标定方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(12): 1206002.
- [9] MINDRAO A, BEMINI R, ZENI L. Distributed temperature sensing in polymer optical fiber by BOFDA [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(4): 387-390.
- 明道, 贝米尼, 泽尼. 基于布喇格光栅的聚合物光学纤维分布式温度传感[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(4): 387-390.
- [10] ZENG Jie, LIAN Da-kai, ZENG Zhen-wu, *et al.* Reflective optical fiber surface plasmon wave resonance sensor characteristic research[J]. *Acta Optica Sinica* 2007, **27**(3): 404-409.
- 曾捷, 梁大开, 曾振武, 等. 反射式光纤表面等离子体波共振传感器特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 404-409.
- [11] YUAN J, ZHAO C, YE M, *et al.* A Fresnel reflection-based optical fiber sensor system for remote refractive index measurement using an OTDR[J]. *Photonic Sensors*, 2014, **4**(1): 48-52.
- 袁健, 赵成, 叶明, 等. 基于菲涅尔反射的光纤传感器系统用于远程折射率测量[J]. *光子传感*, 2014, **4**(1): 48-52.
- [12] ZHAO C L, YANG X, DEMOKAN M S, *et al.* Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3 slanted multimode fiber Bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(2): 879.
- 赵成, 杨旭, 德莫坎, 等. 利用3个斜角多模光纤布拉格光栅同时测量温度和折射率[J]. *光电子技术与应用*, 2006, **24**(2): 879.
- [13] SHAO L Y, DING J F, HE S. Sandwiched long-period gratings for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(11): 2397-2399.
- 邵立宇, 丁景峰, 何松. 三明治式长周期光栅用于同时测量折射率和温度[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(11): 2397-2399.
- [14] WANG Chen, WANG ZHEN Pin, ZHANG Guo-sheng, *et al.* A method for simultaneous measurement of liquid refractive and temperature [J]. *Optical & Optoelectronic Technology*. 2006, **4**(5): 52-54.
- 王成, 王政平, 张国生, 等. 一种同时测量液体折射率和温度的方法[J]. *光学与光电技术*, 2006, **4**(5): 52-54.
- [15] QI L, ZHAO C L, KANG J, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on intensity demodulation using matching grating method[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, **84**(7): 075004.
- 齐立, 赵成, 康健, 等. 基于强度调制匹配光栅法同时测量折射率和温度[J]. *科学仪器*, 2013, **84**(7): 075004.
- [16] ZHAO C L, QI L, ZHANG S, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a partial cone-shaped FBG [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 178: 96-100.
- 赵成, 齐立, 张松, 等. 基于部分锥状光纤布拉格光栅同时测量折射率和温度[J]. *传感器与执行器B: 化学*, 2013, 178: 96-100.
- [17] WANG Jie-yu, TONG Zhen-rong, YANG Xiu-feng, *et al.* Based on multimode interference and long period fiber grating simultaneously temperature and the refractive index measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*. 2012(09): 88-92.
- 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(09): 88-92.