

基于在线型光纤迈克耳孙干涉仪的液位传感器

邵敏¹, 韩亮¹, 兆雪¹, 傅海威¹, 乔学光²

¹西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;

²西北大学物理学院, 陕西 西安 710069

摘要 为了简化光纤液位传感器的设计与制作工艺, 提出了一种基于纤芯失配模间干涉的在线型光纤迈克耳孙干涉仪, 由单模光纤熔接一段细径光纤构成。单模-细径光纤熔点处充当耦合器, 激发出光纤高阶包层模, 纤芯基模与高阶包层模被细径光纤端面反射后传输至单模光纤产生模间干涉并输出。传感器干涉条纹清晰、对比度高, 对环境液位改变敏感。对细径光纤长度为 12 mm 的传感器进行了不同溶液液位和温度响应特性的实验研究, 实验结果表明在 0~9 mm 的液位变化范围内, 干涉谷波长与液位呈线性关系, 水液位灵敏度为 -0.116 nm/mm, 质量分数为 4.7% 的 NaCl 溶液液位灵敏度为 -0.129 nm/mm; 在 20~80 °C 的水温变化范围内, 干涉谷的温度灵敏度为 0.038 nm/°C。传感器结构简单、制作简便, 而且成本低廉, 在石油化工等领域具有较好的应用前景。

关键词 光纤光学; 传感器; 迈克耳孙干涉仪; 液位传感器; 模间干涉

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328021

Liquid Level Sensor Based on In-Fiber Michelson Interferometer

Shao Min¹, Han Liang¹, Zhao Xue¹, Fu Haiwei¹, Qiao Xueguang²

¹ School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

² School of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

Abstract In order to simplify the design and fabrication of optical fiber liquid level sensor, we propose an in-fiber Michelson interferometer based on fiber-core mismatching intermodal interference, which consists of a single mode fiber (SMF) fusion-spliced with a section of thinned fiber (TF). The fusion point of the SMF-TF acts as a fiber coupler to excite the high-order cladding modes. The core mode and high-order cladding modes are reflected by the end face of the TF and transmitted to SMF to generate intermodal interference. The output interference fringes are clear and in high contrast, which are sensitive to the change of environment liquid level. The sensing characteristics of a sensor sample with 12-mm-long TF to liquid level and temperature are investigated. The experimental results show that the reflection dip wavelength linearly changes for a liquid level variation of 0-9 mm, and the sensitivities to water and NaCl solution with mass fraction of 4.7% are -0.116 and -0.129 nm/mm; the temperature sensitivity to water is 0.038 nm/°C in the temperature range of 20-80 °C. The sensor has advantages of simple structure, easy fabrication, and low cost, which offers the prospective application in petroleum industrial and chemical industry.

Key words fiber optics; sensors; Michelson interferometer; liquid level sensor; intermodal interference

OCIS codes 280.4788, 060.2310; 060.2370; 060.2430

1 引 言

液位是指液面高度信息, 液位检测在日常生活和石油化工等行业中具有重要意义。光纤传感器耐腐蚀、抗电磁干扰、可远距离传输, 尤其是可在易燃易爆环境中工作, 这是其他类传感器所不具备的优

势, 因此光纤液位传感器在液位传感领域受到了广泛关注。目前已研制出了多种光纤液位传感器, 例如光纤光栅型液位传感器具有波长编码和可实现分布式测量等优点, 一般通过采用腐蚀或抛磨光纤^[1-2], 写制特殊光栅如倾斜斜光纤光栅^[3-4]、聚合物光纤光栅^[5]等, 或者将光栅粘接在机械结构^[6]等方法

收稿日期: 2017-10-17; 收到修改稿日期: 2017-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(61327012, 61505160)、陕西省自然科学基金(2016JQ6021)

作者简介: 邵敏(1979—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤原理与技术方面的研究。

E-mail: shaomin@xsyu.edu.cn

进行液位增敏。但是这些方案的制作过程相对复杂,制作成本较高。光纤干涉仪型液位传感器的灵敏度较高,这是因为干涉仪自身对外界环境折射率的变化较为敏感。已报道的光纤干涉仪型液位传感器有光纤马赫-曾德尔干涉仪^[7-8]、光纤法布里-珀罗干涉仪^[9-10]和光纤迈克耳孙干涉仪^[11]。不同于光纤马赫-曾德尔干涉仪,光纤迈克耳孙干涉仪是反射式结构,使得传感器更加紧凑,可以实现探针式测量,同时与光纤法布里-珀罗干涉仪相比,制作过程无须进行严格、精密的控制,这使得其在实际应用中的优势明显。

近年来,基于光纤迈克耳孙干涉仪的液位传感器的研究取得了一系列成果,如 Antonio-Lopez 等^[12]设计制作了一种基于单模-无芯光纤结构的在线型光纤迈克耳孙干涉仪,实现了液位测量。Rong 等^[13]提出了一种单模-多模-单模光纤结构的在线型光纤迈克耳孙干涉仪,传感器的液位灵敏度可达 -0.057 nm/mm 。Liang 等^[14]将一段双模椭圆多芯光纤熔接在两段单模光纤之间,其中单模光纤端面镀制银膜进行增反,实验测得该传感器的液位灵敏度为 -0.048 nm/mm 。但这些传感器系统较为复杂,有些方法成本过高,而且灵敏度仍需进一步的提高。

本文提出了一种在线型光纤迈克耳孙干涉仪,干涉仪由单模光纤(SMF)和细径光纤(TF)组成,通过熔接单模光纤与细径光纤形成的纤芯失配激发了高阶包层模,其与纤芯基模之间产生的模间干涉对环境溶液的液位变化敏感,引起干涉光谱的漂移,从而实现了液位测量。传感器结构紧凑、制作简便、成本低廉,具有广泛的应用前景。

2 传感器原理

传感器的结构如图 1 所示,在一根单模光纤的一端熔接一段细径光纤。当光从单模光纤进入细径光纤时,由于细径光纤的纤芯比单模光纤的纤芯直径小,因而造成了纤芯失配,使得单模光纤中的一部分能量进入细径光纤的包层而成为包层模。这些包层模和纤芯基模在细径光纤的纤芯中传输后被细径光纤的端面反射回细径光纤继续传输,然后在细径光纤与单模光纤的熔接点处相遇产生模间干涉,最后经由单模光纤输出。传感器中单模光纤与细径光纤的熔点充当了耦合器,既激发出光纤的高阶包层模,又对纤芯基模和高阶包层模进行了耦合,光纤端面为反射镜,细径光纤则作为干涉臂,因此是一个典

型的在线型光纤迈克耳孙干涉仪。由于光在细径光纤中传输了两次,有效增加了干涉臂的长度,使得传感器的结构更为紧凑。

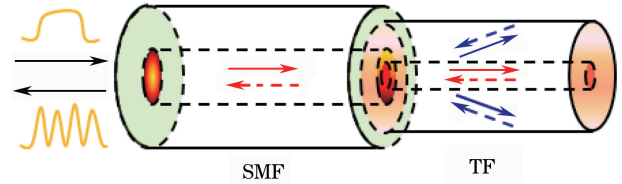


图 1 马赫-曾德尔传感器结构

Fig. 1 Schematic of the in-fiber Michelson interferometer sensor

因为纤芯基模与高阶包层模之间存在有效折射率差,所以在细径光纤中传输后,二者之间会产生光程差和相位差。由干涉理论可知,迈克耳孙干涉仪的输出光强为

$$I = I_{\text{core}} + \sum_m I_{\text{cladding}}^m + \sum_m 2\sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m} \cos \Delta\varphi, \quad (1)$$

式中, I_{core} 为纤芯基模的光强, I_{cladding}^m 为第 m 阶包层模 $\text{LP}_{0,m}$ 的光强, $\Delta\varphi$ 为 $\text{LP}_{0,m}$ 与纤芯基模间的相位差。当传感器被放入待测溶液时,由于溶液液位变化而引起的相位差可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} [\Delta n_{\text{eff1}} L_1 + \Delta n_{\text{eff2}} (L - L_1)], \quad (2)$$

式中, λ 为入射波长, L 为细径光纤的长度, Δn_{eff1} 为溶液中细径光纤纤芯基模与高阶包层模 $\text{LP}_{0,m}$ 的有效折射率差, L_1 为浸在溶液中细径光纤的长度, Δn_{eff2} 为空气中细径光纤纤芯基模与高阶包层模 $\text{LP}_{0,m}$ 的有效折射率差。当纤芯基模与高阶包层模之间的相位差为 $\Delta\varphi = (2N + 1)\pi$ ($N = 0, 1, 2, \dots$) 时,为干涉极小值,对应的干涉谷波长可写作

$$\lambda_N = \frac{4}{2N + 1} [\Delta n_{\text{eff1}} L_1 + \Delta n_{\text{eff2}} (L - L_1)]. \quad (3)$$

当待测溶液的液位变化时,干涉谷的波长会产生移动,通过检测干涉条纹中波谷波长的变化即可获得溶液液位变化的信息。由于溶液的折射率大于空气的折射率,因此溶液中的纤芯基模与高阶包层模的有效折射率差 Δn_{eff1} 小于空气中的有效折射率差 Δn_{eff2} 。当溶液液位升高时,空气中细径光纤长度变小,所以干涉谷波长应向短波方向移动^[15-16]。

为了说明模间干涉过程,使用光束传播法对光在单模-细径光纤结构中的传输进行了模拟。模拟中入射光波长为 1550 nm ,单模光纤的纤芯和包层直径分别为 $9.1 \mu\text{m}$ 和 $125.0 \mu\text{m}$,纤芯和包层折射率分别为 1.4682 和 1.4628 ;细径光纤的纤芯和包层

直径分别为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $110\ \mu\text{m}$, 纤芯和包层折射率分别为 1.4670 和 1.4584。模拟结果如图 2 所示, 图中 $0\sim 100\ \mu\text{m}$ 为单模光纤, $100\sim 1000\ \mu\text{m}$ 为细径光纤。从图 2 中可以看出, 光从单模光纤进入细径光纤时, 一部分能量进入到细径光纤的包层中, 这意味着成功激发了高阶包层模。

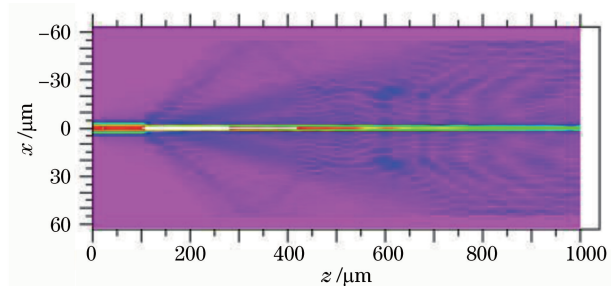


图 2 单模-细径光纤结构中的光场分布

Fig. 2 Optical field distribution in the SMF-TF fiber structure

3 实验与讨论

本文中使用的单模光纤(康宁, SMF28)和细径光纤(长飞, G655)的纤芯/包层直径分别为 $9.1/125\ \mu\text{m}$ 和 $5/110\ \mu\text{m}$, 用光纤切刀将两根光纤的端面切除平整后, 在光纤熔接机(古河, S177)上将二者进行对芯熔接, 然后用光纤切刀对细径光纤的另一端进行切割。为了得到较好的端面反射率, 切割时应严格操作。通过设计细径光纤的长度, 就可得到不同长度干涉臂的干涉仪。实验中, 激光光源发出的光通过传感器后被细径光纤的端面反射, 然后进入解调仪(Micro optics, sm125), 由解调仪记录传感器的反射光谱并由计算机输出。图 3 为不同细径光纤长度时干涉仪的反射光谱。由图 3 可见, 随着细径光纤长度的增加, 干涉条纹数目增多, 这与(1)式相符。图 3 显示干涉仪的干涉光谱具有较高的条纹对比度, 最高可达 20 dB。文献[13-14]均对光纤端面镀制了金属膜以增加光的反射率, 而本文中的干涉仪未作任何增反也能获得较好的条纹对比度, 这使得干涉仪的制作更加简单且成本低廉。

图 3 中干涉仪的干涉条纹并不是严格的余弦曲线, 这说明干涉光谱是多套干涉条纹的叠加, 意味着参与模间干涉的光纤高阶模有多个。因此本文对图 3 中的光谱进行了快速傅里叶变换, 得到的空间频谱如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 空间频谱的明显峰值并非只有一个, 而是多个, 验证了多个模式参与了干涉这一结论。以 12 mm 长的干涉仪为例, 空间频谱的主峰共有 4 个, 而且最高峰值的空间频率

最大。由于模式阶次越高, 对应的空间频率越高^[17], 因此该干涉仪中产生干涉的主要模式为高阶包层模。高阶包层模对环境折射率 n 变化较为敏感, 其与纤芯基模的有效折射率差也明显, 所以该干涉仪有望获得较高的液位灵敏度。

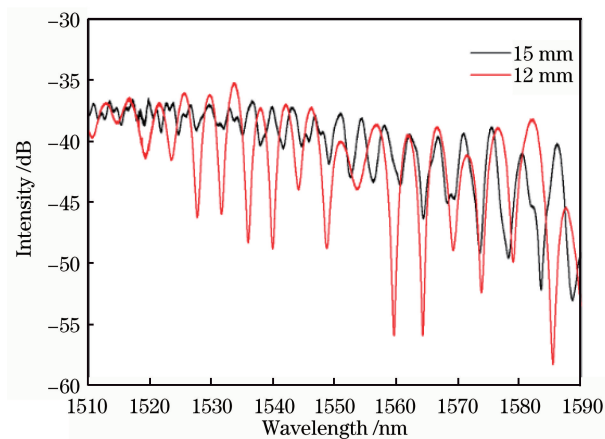


图 3 不同细径光纤长度下干涉仪的反射光谱

Fig. 3 Reflection spectra of the interferometers with different lengths

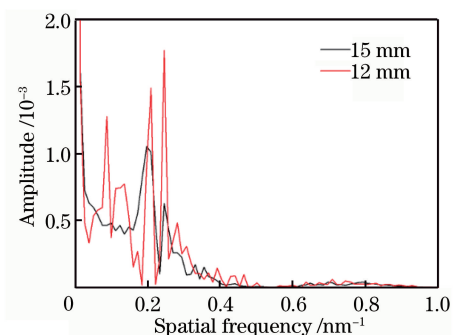


图 4 不同细径光纤长度下干涉仪的空间频谱

Fig. 4 Spatial frequency spectra of the interferometers with different lengths

细径光纤长度为 12 mm 的干涉仪具有较高的条纹对比度, 而且自由光谱范围也较宽, 因此在传感实验中被作为实验研究对象。液位传感实验装置原理见图 5, 将制作好的传感器点粘在一根钢尺上, 钢尺的最小刻度为 mm。用试管夹将钢尺固定好后放入盛有溶液的烧杯中, 并保持与液面垂直。使用滴管给烧杯缓慢注入待测溶液, 当传感器的反射光谱发生变化时, 记录此时的液位, 并标记为起始液位。液位传感实验中, 每间隔 1 mm 液位记录一次光谱。液位实验中, 溶液的温度保持在 $20.3\ ^\circ\text{C}$ 。

传感器在水的不同液位中的光谱响应如图 6 所示, 水的折射率为 1.335。图 6 表明, 随着环境溶液液位的增加, 干涉光谱向短波方向移动, 这与前述的理论分析一致。在 $0\sim 9\ \text{mm}$ 的液位变化范围内, 以

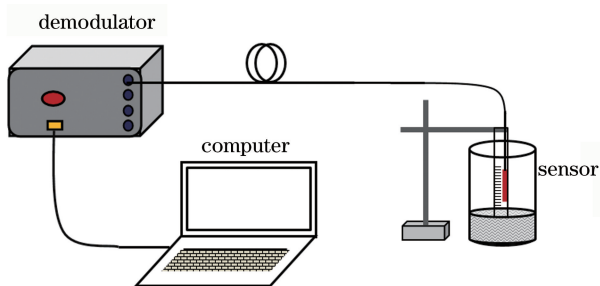


图 5 液位传感实验装置图
Fig. 5 Experimental setup for the liquid level measurement

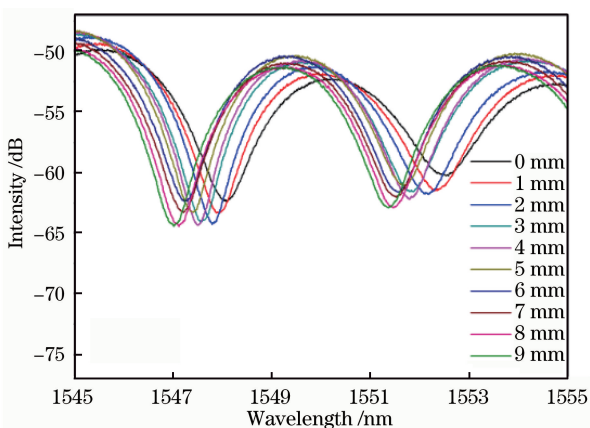


图 6 水不同液位下干涉仪的反射光谱($n = 1.335$)
Fig. 6 Reflection spectra of the interferometer at different liquid levels of water($n = 1.335$)

位于 1548.08 nm 处的干涉谷为例, 漂移量为 1.08 nm。图 7 是干涉谷处波长随液位的变化曲线, 对实验数据拟合后得到传感器的液位灵敏度为 -0.116 nm/mm , 线性拟合度为 0.99。

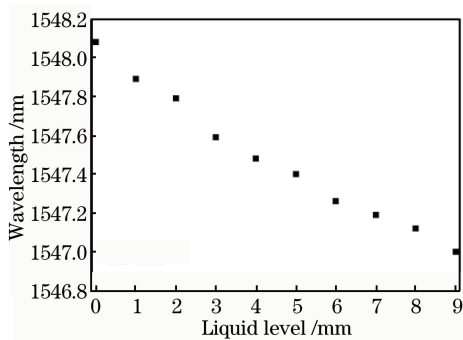


图 7 谐振波长随水液位的变化曲线($n = 1.335$)
Fig. 7 Curve of the resonant wavelength versus liquid levels of water($n = 1.335$)

本文还对传感器进行了 NaCl 溶液液位的测量实验研究, 实验中使用的 NaCl 溶液的质量分数为 4.7%, 折射率为 1.341, 实验结果如图 8 所示。可见随着溶液液位的增加, 干涉光谱向短波方向移动, 这与水的液位传感实验的规律相同。当溶液液位变化

9 mm 时, 位于 1548.08 nm 处的干涉谷漂移量为 1.124 nm。干涉谷处波长随溶液液位的变化关系见图 9, 其对质量分数为 4.7% 的 NaCl 溶液的液位灵敏度为 -0.129 nm/mm , 线性拟合度为 0.98。

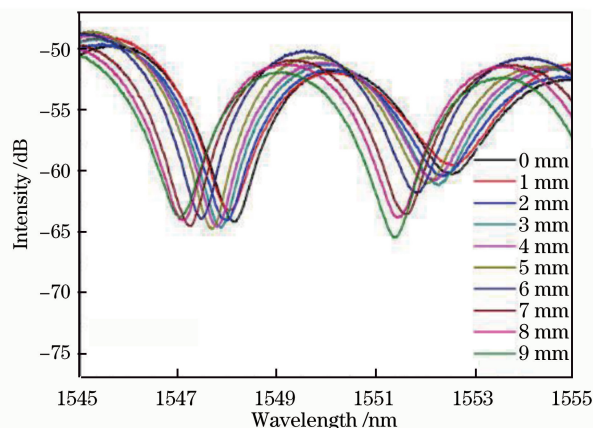


图 8 NaCl 溶液不同液位下干涉仪的反射光谱($n = 1.341$)
Fig. 8 Reflection spectra of the interferometer at different liquid levels of NaCl solution($n = 1.341$)

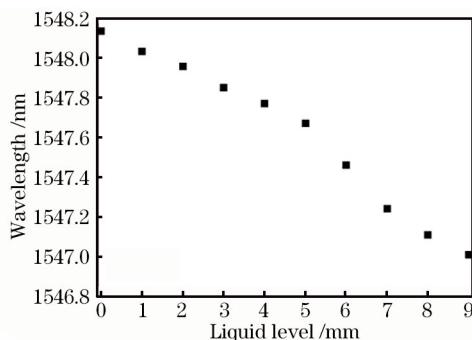


图 9 谐振波长随 NaCl 溶液液位的变化曲线($n = 1.341$)
Fig. 9 Curve of the resonant wavelength versus liquid levels of NaCl solution($n = 1.341$)

当环境溶液的温度变化时, 细径光纤的长度、各个模式的有效折射率等会发生变化, 亦会影响传感器的干涉光谱, 因此本文对传感器的温度响应特性进行了实验研究。温度传感实验中, 将传感器置入水中, 对水从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热至 $80 \text{ }^\circ\text{C}$, 每间隔 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 记录一次传感器的光谱, 实验结果如图 10 所示, 随着水温的增加, 传感器光谱向长波方向移动。干涉谷处波长随水温的变化规律如图 11 所示, 传感器的温度响应灵敏度为 $0.038 \text{ nm/}^\circ\text{C}$, 线性拟合度为 0.99。

4 结 论

设计制作了一种基于纤芯失配原理的在线型光纤迈克耳孙干涉仪, 采用单模-细径光纤结构, 传感器结构紧凑、制作简便。对传感器进行了液位和温度传感实验研究, 实验结果表明, 该传感器对液位和

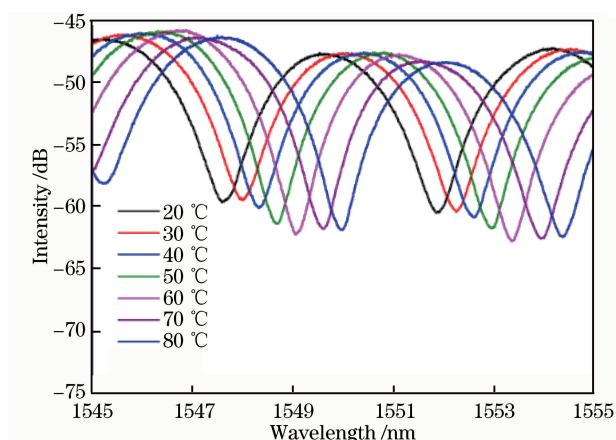


图 10 不同水温下干涉仪的反射光谱

Fig. 10 Reflection spectra of the interferometer at different water temperatures

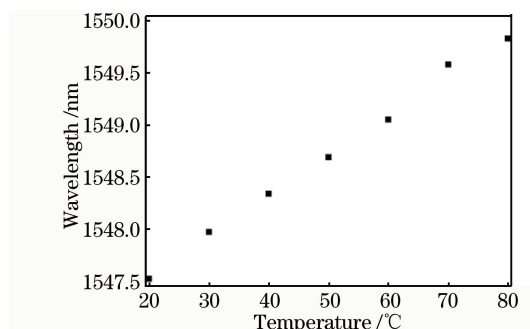


图 11 谐振波长随水温的变化曲线

Fig. 11 Curve of the resonant wavelength versus water temperatures

温度响应呈线性关系,在 0~9 mm 液位变化范围内,最高液位灵敏度可达 -0.129 nm/mm 。传感器具有结构简单、灵敏度高、反射式测量等优点,适用于石油化工等领域的液体液位测量。

参 考 文 献

- [1] Yun B, Chen N, Cui Y. Highly sensitive liquid-level sensor based on etched fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(21): 1747-1749.
- [2] Dong X W, Zhao R F. Detection of liquid-level variation using a side-polished fiber Bragg grating[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(1): 214-218.
- [3] Zhao H X, Cheng P H, Ding Z Q, *et al.* Simultaneous measurement of temperature, refractive index and liquid level based on biconical fiber gratings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 101005.
赵红霞, 程培红, 丁志群, 等. 双锥型光纤光栅实现温度、折射率、液位同时测量[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 101005.
- [4] Jiang Q, Hu D, Yang M. Simultaneous measurement of liquid level and surrounding refractive index using tilted fiber Bragg grating[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 170(1): 62-65.
- [5] Marques C A F, Peng G D, Webb D J. Highly sensitive liquid level monitoring system utilizing polymer fiber Bragg gratings [J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6058-6072.
- [6] Guo T, Zhao Q, Dou Q, *et al.* Temperature-insensitive fiber Bragg grating liquid-level sensor based on bending cantilever beam [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(11): 2400-2402.
- [7] Tong Z R, Yang J, Cao Y, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and liquid level based on corrosion multimode fiber interference sensor [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(1): 118-123.
童峥嵘, 杨娇, 曹晔, 等. 基于腐蚀型多模光纤的干涉型传感器实现温度和液位同时测量[J]. 光电子 • 激光, 2014, 25(1): 118-123.
- [8] Ran Y, Xia L, Niu D, *et al.* Design and demonstration of a liquid level fiber sensor based on self-imaging effect [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 237: 41-46.
- [9] Lai C W, Lo Y L, Yur J P, *et al.* Application of fiber Bragg grating level sensor and Fabry-Perot pressure sensor to simultaneous measurement of liquid level and specific gravity [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(4): 827-831.
- [10] Lü T, Yang S. Extrinsic Fabry-Perot cavity optical fiber liquid-level sensor [J]. Applied Optics, 2007, 46(18): 3682-3687.
- [11] Xue H, Xu Z, Chen H, *et al.* Continuous liquid level sensor based on a reflective long period fiber grating interferometer [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(3): 037001.
- [12] Antonio-Lopez J E, Sanchez-Mondragon J J, LiKamWa P, *et al.* Fiber-optic sensor for liquid level measurement [J]. Optics Letters, 2011, 36(17): 3425-3427.
- [13] Rong Q, Qiao X, Du Y, *et al.* In-fiber quasi-Michelson interferometer with a core-cladding-mode fiber end-face mirror [J]. Applied Optics, 2013, 52(7): 1441-1447.
- [14] Liang X, Ren G, Li Y, *et al.* In-fiber liquid-level probe based on Michelson interferometer via dual-mode elliptical multilayer-core fiber [J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(13): 1254-1259.
- [15] Li L, Xia L, Xie Z, *et al.* All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications [J]. Optics

- Express, 2012, 20(10): 11109-11120.
- [16] Fu H W, Yan X, Li H D, *et al.* Study of fiber sensor for refractive and temperature based on core-mismatch Mach-Zehnder interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106001.
傅海威, 闫旭, 李辉栋, 等. 基于纤芯失配型马赫-曾德尔光纤折射率和温度同时测量传感器的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106001.
- [17] Choi H Y, Kim M J, Lee B H. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber [J]. Optics Express, 2007, 15(9): 5711-5720.