

激光与光电子学进展

基于七芯光纤的高灵敏度液位传感器

邵敏^{1*}, 李韩萍¹, 兆雪¹, 禹大宽¹, 乔学光²¹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 提出并研制了一种基于单模-花生-七芯-花生-单模光纤结构的液位传感器。该传感器采用光纤“花生结构”作为耦合器以提高单模光纤和七芯光纤的耦合效率,第一个光纤“花生结构”用以激发光纤包层模,第二个光纤“花生结构”将包层模与纤芯基模进行耦合而产生干涉。由于包层模与纤芯基模在七芯光纤中传输时存在相位差,所以当环境溶液的液位发生改变时,相位差也随之改变,从而导致透射光谱发生改变。本文对七芯光纤长度分别为 24、28、32 mm 的传感器进行了液位和温度响应特性的实验研究。实验结果表明,随着液位升高,传感器的透射光谱发生蓝移,三个传感器的水溶液液位灵敏度分别为 -0.4069 、 -0.2739 、 -0.1653 nm/mm,其液位测量范围分别为 24、28、32 mm。在 $35\sim 90$ °C 的水温变化范围内,传感器的透射光谱随着温度的上升发生红移,三个传感器的温度灵敏度分别为 0.0885 、 0.0740 、 0.0879 nm/°C。实验表明该传感器具有灵敏度高、成本低、制作简单等特点,在石油化工等领域具有较好的应用前景。

关键词 光纤光学; 液位传感器; 马赫-曾德尔干涉仪; 花生结构; 七芯光纤

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223168

High-Sensitivity Liquid Level Sensor Based on Seven Core Fiber

Shao Min^{1*}, Li Hanping¹, Zhao Xue¹, Yu Dakuan¹, Qiao Xueguang²¹School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;²School of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China

Abstract A liquid level sensor based on a single mode-peanut-seven core-peanut-single mode fiber structure is developed. The sensor uses the “peanut structure” as a fiber coupler to improve the coupling efficiency of the single-mode fiber and seven-core fiber. The first fiber “peanut structure” is used to excite the cladding mode, and the second fiber “peanut structure” couples the cladding mode with the core mode to produce interference. Because a phase difference between the cladding and core-based modes appears as they transmit through the seven-core fiber, when the liquid level of the environmental solution changes, the phase difference changes, eventually changing the transmission spectrum. In this study, the liquid level and temperature response characteristics of the sensors with seven-core fiber lengths of 24, 28, and 32 mm were experimentally studied. The experimental results show that with the increase of the liquid level, the transmission spectrum of the sensor shows a blue shift. The liquid level sensitivities of the three sensors are -0.4069 , -0.2739 , and -0.1653 nm/mm, and their liquid level measurement ranges are 24, 28, and 32 mm, respectively. In the water temperature range of $35\sim 90$ °C, the transmission spectrum of the sensor shows a red shift with an increase in temperature. The temperature sensitivities of the three sensors are 0.0885 , 0.0740 , and 0.0879 nm/°C. The experiment shows that the sensor has the characteristics of high sensitivity, low cost, and simple fabrication, indicating that it has a good application prospect in the petrochemical industry and other fields.

Key words fiber optics; liquid level sensor; Mach-Zehnder interferometer; peanut structure; seven core fiber

收稿日期: 2023-01-10; 修回日期: 2023-02-20; 录用日期: 2023-03-05; 网络首发日期: 2023-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61735014)、西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(YCS21112080)

通信作者: *Shaomin@xsyu.edu.cn

1 引言

液位是指密封容器或者开口容器中的液面高低信息,液位测量是化工生产、石油储运、生物医学、食品饮料、水库水位监测和水箱油箱检测等领域的重要参数^[1-2]。高精确度的液位测量技术不仅给人们生活带来更多的便利,而且对液体货物的安全储运、液位自动控制系统的安全运行等均有重要意义。例如在石油领域中,液位是储油罐需要监控的重要参数,为保证储油罐的安全问题,储油罐内的储油量必须被限制在一定的范围内,因此储油罐内油量液位的精确测量至关重要。目前常见的液位测量方式有超声波液位测量、雷达液位测量、磁致伸缩液位测量、电容式液位测量、光纤液位测量等。其中电容式液位传感器应用较为广泛,但无法满足导电、易燃易爆、腐蚀等恶劣环境下的液位测量要求^[3]。因此,光纤液位传感器以其体积小、抗电磁干扰、抗腐蚀、对电绝缘、本质安全等突出优势在石油化工等领域备受研究人员的关注^[4]。

光纤液位传感器依据测量原理分为浮子遮光式、液面反射式、压力式、光纤光栅和光纤干涉仪等。其中,全光纤干涉仪具有结构简单、灵敏度高等优点^[5],尤其是可在不使用光纤耦合器的情况下实现光的干涉,是近年来光纤传感技术研究的重点。例如,Liu等^[6]提出了一种基于硅膜片和硼硅玻璃卡箍的光纤法布里-珀罗干涉仪(FPI)型液位传感器,测量范围为0.5~1.3 MPa。Liang等^[7]提出了一种双模椭圆多层芯光纤液位传感器,在液位范围为50 mm时液位灵敏度为33.48 pm/mm。Zhang等^[8]提出了一种基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的光纤液位传感器,该传感器液位范围为8 mm,液位和温度灵敏度分别为-231.67 pm/mm和77.86 pm/°C。多数已报道的光纤干涉型液位传感器制作较为复杂,而且液位灵敏度有待进一步提高。

目前,全光纤干涉仪的研究主要集中在探索新型特殊光纤和在光纤上设计和制作精巧的光纤结构,以期提高耦合效率并增强对外界物理量(如温度、压力、应变、液位)的敏感性。七芯光纤是由一根中心纤芯和围绕中心纤芯的六根呈正六边形的外围纤芯组成的一

种新型特种光纤^[9]。由于这种在包层中包含多个平行纤芯的结构,使得纤芯间的模式耦合更加紧密^[10]。这也加强了环境被测量与干涉光谱漂移之间的关联性,可提高传感器的响应灵敏度。因此在基于全光纤干涉仪的研究中,七芯光纤在模式激励和耦合方面具有明显优势。基于七芯光纤制成的全光纤干涉仪已经成功地应用于应变^[11]、形状^[12]、曲率^[13]、位移^[14]、温度等环境参量的测量。如:Wang等^[11]提出了一种七芯光纤结构的弯曲传感器,曲率灵敏度为31.54 nm/m⁻¹。Zhou等^[13]提出基于七芯光纤应变传感器,曲率灵敏度可达25.96 nm/m⁻¹。Zhao等^[14]提出了一种基于七芯光纤的光纤微位移传感器,微位移灵敏度为2457.92 pm/mm。上述光纤干涉仪一般采用单模-多模-七芯-多模-单模光纤结构的传感方案,制作简便,但需要严格控制多模光纤的长度。此外,已有文献也多采用光纤锥和纤芯错位熔接增强七芯光纤的模式耦合,但光纤细锥和错位熔接等耦合方式会导致传感器的机械强度降低,且耦合效率还需提高。

基于此,本文提出了一种基于单模-花生-七芯-花生-单模光纤结构的全光纤干涉仪型传感器。该传感器在单模和七芯光纤之间夹入光纤“花生结构”,光纤“花生结构”机械强度高,能有效地提高耦合效率,增强高阶包层模与周围介质的相互作用,可实现高灵敏度的液位测量。

2 传感器原理及制作

液位传感器的原理图如图1所示。该传感器由一段七芯光纤和两段单模光纤组成,七芯光纤和单模光纤之间通过两个光纤“花生结构”进行连接。当光从输入单模光纤进入七芯光纤时,先经过第一个光纤“花生结构”,其作为分束器使得单模光纤中的一部分能量进入到七芯光纤的包层成为包层模,另一部分继续在纤芯中传输。纤芯基模和包层模在七芯光纤中传输后继而达到第二个光纤“花生结构”,其作为合束器将光纤包层模和纤芯基模再耦合从而产生模间干涉,最后由单模光纤输出。传感器中的光纤“花生结构”充当了耦合器,既激发了光纤的高阶包层模,又对纤芯基模和高

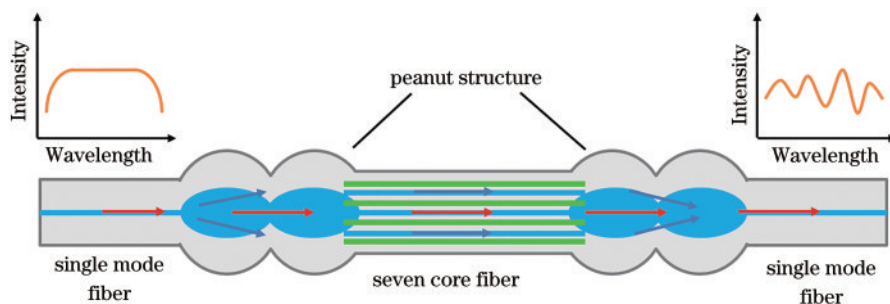


图1 传感器结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor

阶包层模进行了耦合。

当光经过第一个光纤“花生结构”后,在七芯光纤中激发了不同阶的包层模式。为了方便讨论,只考虑对干涉谱主要作用的一个包层模式,因此输出的干涉强度^[15]可以表示为

$$I = I_{co} + I_{cl} + 2\sqrt{I_{co}I_{cl}} \cos \Delta\varphi, \quad (1)$$

式中: I_{co} 和 I_{cl} 分别表示纤芯基模和主包层模的光强; $\Delta\varphi$ 为这两种模式之间的相位差,可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_{co} - n_{cl})L}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: n_{co} 和 n_{cl} 分别是纤芯基模和包层模的有效折射率; Δn_{eff} 是空气中纤芯基模和包层模的有效折射率差; λ 和 L 分别是输入光的波长和七芯光纤的长度。当 $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$, ($m = 0, 1, 2, \dots$)时,干涉条纹的干涉谷波长可以表示为

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{eff}L}{2m + 1}. \quad (3)$$

当液体部分浸没传感器时,随着溶液液位的上升或下降,被浸没的光纤区域包层模的有效折射率将发生改变,即 n_{cl} 发生改变,而纤芯基模的折射率保持不变,因此式(2)可改写为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(L - L_{lip})\Delta n_{eff}}{\lambda} + \frac{2\pi L_{lip}\Delta n_{eff}'}{\lambda}, \quad (4)$$

式中: L_{lip} 为传感器浸入液体的七芯光纤长度;溶液中的包层模和纤芯基模的有效折射率差为 $\Delta n_{eff}' = n_{co} - n_{cl}'$, n_{cl}' 是溶液中包层模的有效折射率。液位上升时,当其相位差满足 $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$, ($m = 0, 1, 2, \dots$)时,干涉谷波长^[16]可写为

$$\lambda_{lip} = \frac{2}{2m + 1} [L\Delta n_{eff} - L_{lip}(\Delta n_{eff} - \Delta n_{eff}')]. \quad (5)$$

由于 $\Delta n_{eff} > \Delta n_{eff}'$,随着 L_{lip} 的增加,干涉谷波长会减小,这意味着液位的增加会导致干涉谷波长逐渐蓝移。可以得到液位测量中干涉谷波长的变化量 $\Delta\lambda_{lip}$ 为

$$\Delta\lambda_{lip} = \frac{\lambda_m^2}{\lambda_{lip}L\Delta n_{eff}} [L\Delta n_{eff} - L_{lip}(\Delta n_{eff} - \Delta n_{eff}')]. \quad (6)$$

根据式(6)可知,当液体完全浸没传感器时, $\Delta\lambda_{lip}$ 为常数,液位灵敏度可以表示为

$$S_{lip} = \frac{\Delta\lambda_{lip}}{L}. \quad (7)$$

从式(7)可知,在液位实验中,液位灵敏度和干涉臂即七芯光纤的长度成反比。提高液位灵敏度,测量范围变窄,而降低液位灵敏度,测量范围则变宽,因此在具体应用中需要灵活设计传感器参数,以满足不同测量需求。

3 实验结果与讨论

本文提出的液位传感器采用了光纤熔接方法制作而成。实验所用的单模光纤(SMF-9/125,波钢)和七芯光纤(SCF-7-42/150/250,长飞)的纤芯/包层直径

分别为9/125 μm 和9/150 μm 。实验中,首先准备两段单模光纤(SMF)和一段七芯光纤(SCF),将三根光纤的端面使用光纤切刀切除平整后用酒精擦拭干净以备。传感器的制作过程如图2所示,具体步骤如下:

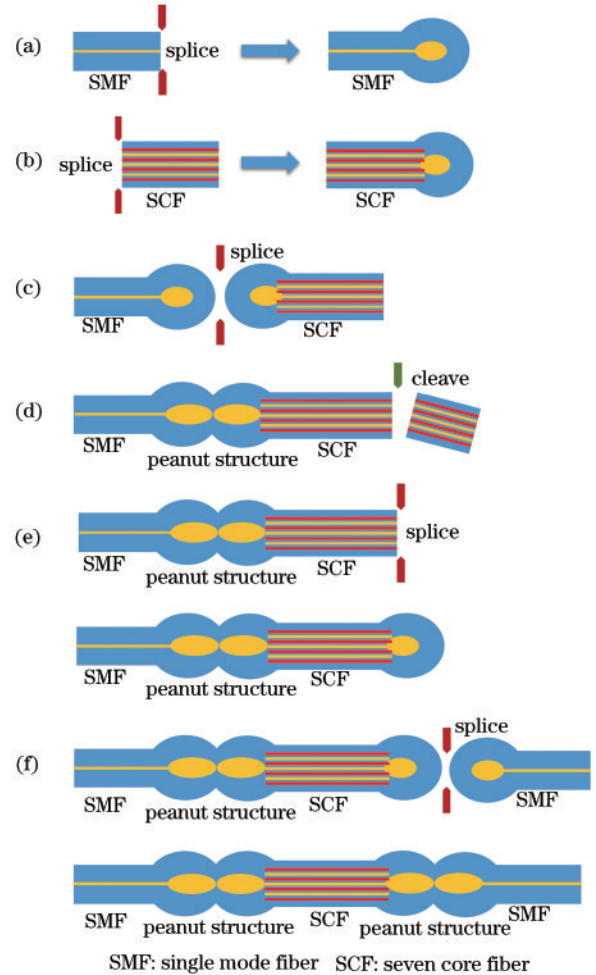


图2 传感器制作步骤图。(a) SMF末端放电熔球;(b) SCF末端放电熔球;(c)单模-七芯光纤对接熔球形成花生结构;(d)切断SCF末端;(e) SCF末端放电熔球;(f)七芯-单模光纤对接熔球形成第二个花生结构

Fig. 2 Manufacturing steps of sensor. (a) SMF end is discharged to form a ball; (b) SCF end is discharged to form a ball; (c) SMF is spliced with SCF to form a peanut structure; (d) cut SCF end; (e) SCF end is discharged to form a ball; (f) SCF is spliced with SMF to form second peanut structure

(a) 第一根单模光纤放置在商用熔接机(S177, Furukawa)中,熔接程序选择手动模式,设置熔接参数为:电弧放电强度为180 mA,推进距离为20 μm 。对SMF末端进行多次放电,由于电弧功率水平高于标准熔接所用的电弧功率,因此光纤末端会形成光纤椭球结构。实验结果表明,SMF末端放电7次后,可形成较为稳定的椭球结构,其直径约为210 μm ,显微图如图3(a)所示。

(b) 采用步骤(a)的方法和熔接程序制备SCF的

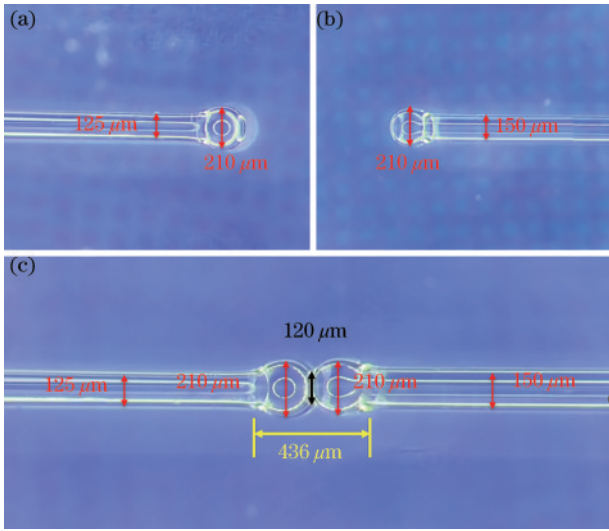


图 3 传感器结构显微图。(a) SMF 末端的光纤椭球结构显微图；(b) SCF 末端的光纤椭球结构显微图；(c) 光纤“花生结构”显微图

Fig. 3 Structural micrographs of sensor. (a) Micrograph of optical fiber ellipsoidal structure at end of SMF; (b) micrograph of optical fiber ellipsoidal structure at end of SCF; (c) micrograph of optical fiber “peanut structure”

光纤椭球结构,但由于 SCF 的直径大于 SMF,因此当放电 5 次后,SCF 和 SMF 椭球结构的直径大小相同,约为 210 μm,显微图如 3(b) 所示。

(c) 将上述两步中制作的 SMF 和 SCF 的光纤椭球结构放入熔接机中,对两端光纤椭球结构进行对齐调整,熔接程序选择手动模式,熔接参数设置为:放电强度为 100 mA,推进距离为 15 μm。放电熔接后形成干涉仪的第一个光纤“花生结构”。光纤“花生结构”的椭球结构直径约为 210 μm,两个椭球结构之间熔接处的直径约为 120 μm,光纤“花生结构”的长度为 436 μm,光纤“花生结构”的显微图如图 3(c) 所示。

(d) 使用切刀将 SCF 的另一端保留一定长度后切除平整。通过设计 SCF 的长度,就可以得到不同长度的干涉仪。

(e) 将切除好的 SCF 放置在熔接机中,使用步骤(a)中的熔接程序在 SCF 的末端进行多次放电。待放电结束后,SCF 的另一端亦形成光纤椭球结构。

(f) 对第二根 SMF 重复步骤(a)制作一个光纤椭球结构。将 SCF 和 SMF 分别放置在熔接机中,使用步骤(c)的熔接程序进行放电熔接制作第二个光纤“花生结构”,熔接结束后,基于单模-花生-七芯-花生-单模光纤结构的液位传感器就成功制成。

图 4 显示了不同 SCF 长度下干涉仪的透射光谱。可以看出干涉仪的干涉光谱具有较高的条纹对比度,最高可达 18 dB。这说明干涉仪中的光纤“花生结构”可以有效地将纤芯基模耦合至包层。随着 SCF 长度增加,干涉周期增加,即 SCF 为干涉臂,而且 SCF 包层

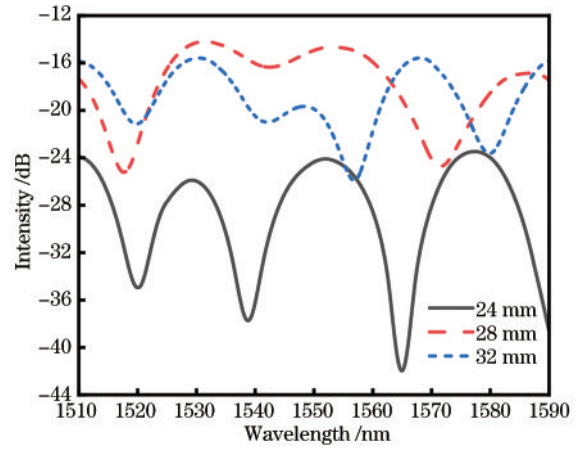


图 4 不同长度下干涉仪的透射光谱

Fig. 4 Transmission spectra of interferometers with different lengths

中的平行纤芯结构使得光纤“花生结构”的耦合效率更高。图 4 中干涉仪的干涉条纹并不是严格的余弦曲线,这说明干涉光谱是由多套干涉条纹的叠加。

为了研究传感器的模式耦合机理,本文对图 4 中的透射光谱进行了快速傅里叶变换,得到的空间频谱如图 5 所示。从图 5 中可以看出,空间频谱的峰值有多个,因此多个模式参与了干涉。以长度为 24 mm 的干涉仪为例,可以看到,在空间频率位于 0.0374 nm^{-1} 处有一个明显的主峰,而在其右侧有一些不明显的次峰(空间位置分别位于 $0.087, 0.126, 0.162 \text{ nm}^{-1}$ 等)。空间频谱中的这些波峰分别代表不同阶次的高阶包层模与纤芯基模发生了干涉,峰的高低代表了强弱,主峰和次峰可以说明多个阶次的高阶包层模被激发并参与了干涉,其中空间频率位于 0.0374 nm^{-1} 的高阶包层模在整个干涉过程中占据主导地位,较高空间频率处的次峰所代表的高阶包层模在整个干涉过程中只参与了干涉,但不是主要模式。因此可证实理论分析中一个高阶包层模主要参与了干涉。图 5 表明长度为 24 mm 和

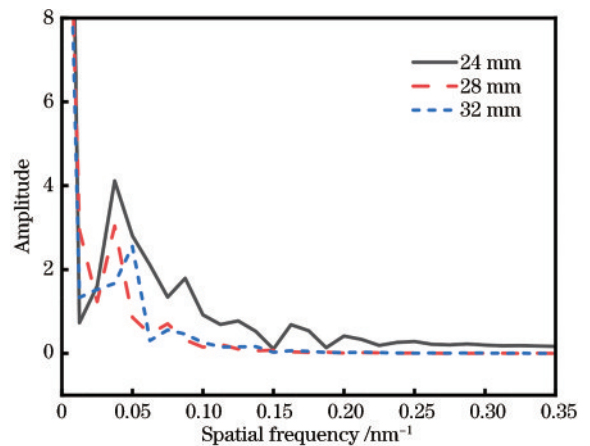


图 5 不同长度下干涉仪的空间频谱

Fig. 5 Spatial frequency spectra of interferometer with different lengths

28 mm 的干涉仪的主峰空间频率较为接近,这是因为这两个干涉仪中的参与干涉的主要模式不同,所以纤芯模和主包层模之间的有效折射率差不同。由于空间频率与 SCF 的物理长度和有效折射率差成正比,而高阶模式具有较高的有效折射率,即 24 mm 长的干涉仪中参与干涉的主包层模的阶次高于 28 mm 长的干涉仪。

液位传感实验装置图如图 6 所示。实验装置主要包含了液位测量装置、解调系统和计算机。装置图中的液位测量装置由直角固定块、移动平台、钢尺和烧杯构成。实验开始前将制作好的传感器点粘在一根钢尺上,钢尺最小刻度为 1 mm。然后将钢尺固定在移动平台的滑块上,并确保传感器垂直浸入装有液体的烧杯中。当烧杯中液位不变时,传感器感知到的液位变化

是钢尺在水中的位置变化,因此可以控制固定钢尺的上下移动,从而改变液位变化。液位传感实验装置中,当光从解调系统(Micro-optics, sm125)中的激光光源发出,经过传感器后进入解调仪,解调仪解耦出传感器的光谱后连接计算机输出。该解调系统由可调谐激光器和波长分辨率为 0.001 nm、强度分辨率为 0.001 dB 的解调仪组成。

液位传感实验中,缓慢移动钢尺,当传感器的光谱发生变化时,记录此时的液位,并标记为起始液位。滑块每向下滑动 2 mm,保持液位稳定 3 min 后,记录一次干涉仪的透射光谱。本文对制作的 3 个干涉仪在折射率为 1.3352 的水中的液位响应进行了实验研究,其中水温为 21 °C,实验结果如图 7 所示。图 7(a)为 0~24 mm 液位范围内长度为 24 mm 的传感器的透射光谱对水的响应,可见随着液位的增加,干涉谷处波长有明显的蓝移,这与理论分析的结果一致。长度为 28 mm 和 32 mm 的传感器在不同水溶液液位中的透射光谱分别如图 7(b)和 7(c)所示。可以观察到,透射光谱在两个不同长度干涉仪中均表现出类似的蓝移现象。当液位变化分别为 24、28、32 mm 时,长度分别为 24、28、32 mm 的 3 个干涉仪的波谷漂移量分别为

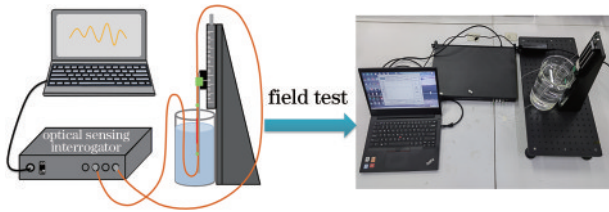


图 6 液位传感实验装置图

Fig. 6 Diagram of liquid level sensing experimental device

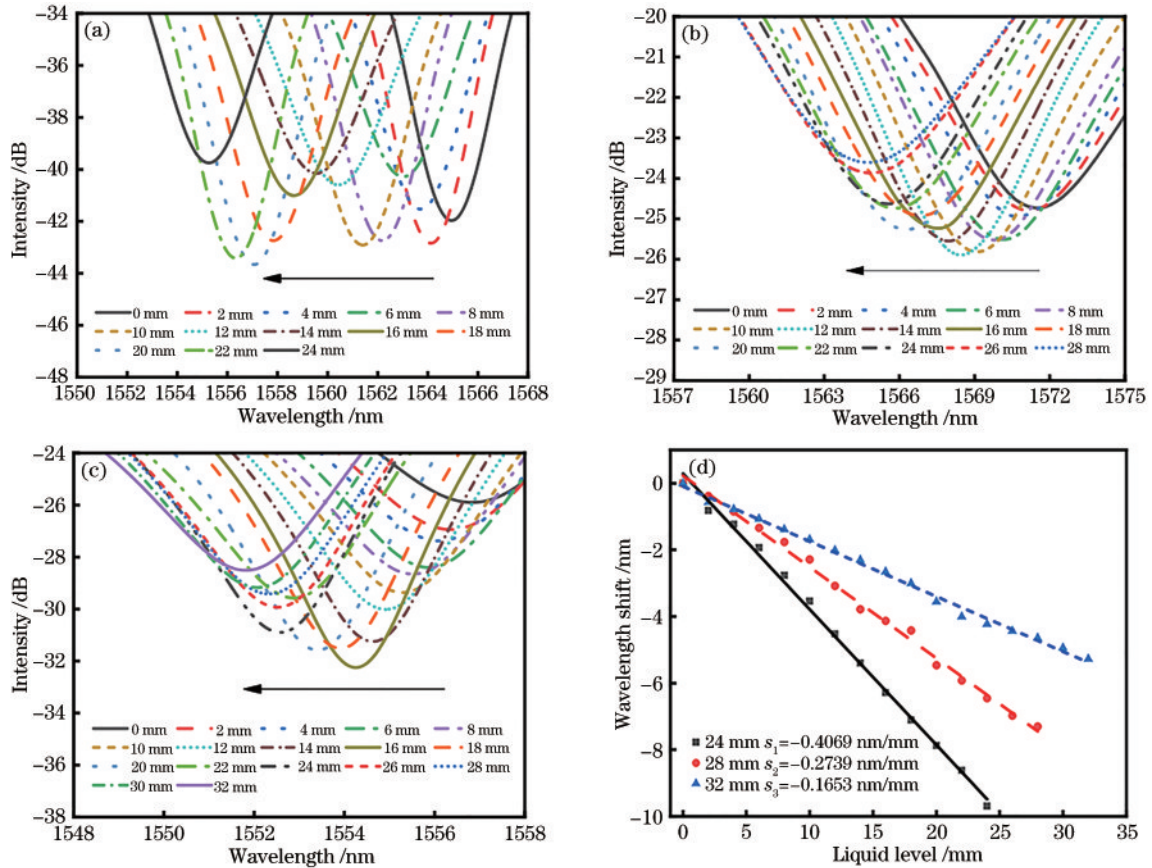


图 7 干涉仪的液位响应光谱以及灵敏度曲线。长度为(a)24 mm;(b)28 mm;(c)32 mm 的干涉仪在不同液位下的透射光谱;(d)干涉仪的液位灵敏度线性拟合曲线

Fig. 7 Liquid level response spectra and sensitivity curves of interferometer. Transmission spectra of interferometer with length of (a) 24 mm; (b) 28 mm; (c) 32 mm at different liquid levels ; (d) linear fitting curves of liquid level sensitivity of interferometer

9.69、7.31、5.27 nm。图 7(d) 显示了在干涉谷处波长和水液位变化的关系,通过线性拟合得到 3 个干涉仪的液位灵敏度(s_1 、 s_2 、 s_3)分别为 -0.4069 、 -0.2739 、 -0.1653 nm/mm,线性度分别为 0.9968、0.9957、0.9950。

液位灵敏度与干涉仪长度 L 的关系如图 8 所示,

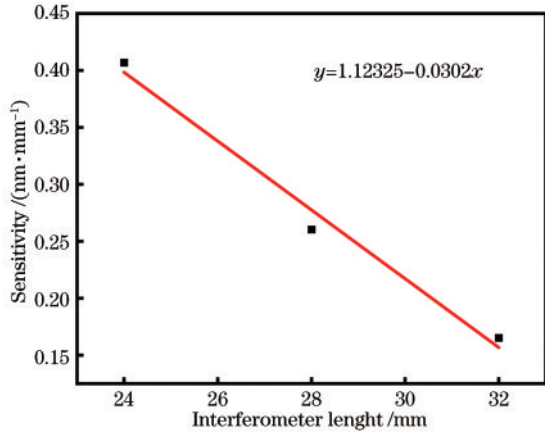


图 8 干涉仪的长度与液位灵敏度的关系

Fig. 8 Relationship between length of interferometer and liquid level sensitivity

表明干涉仪长度越长,液位灵敏度越低,这与前面的理论分析一致。由理论和实验可知,SCF 的长度决定了液位测量范围和测量灵敏度。当 SCF 较短时,液位测量范围小、灵敏度高,结构紧凑;SCF 较长时,液位测量范围大、灵敏度较低,同时容易受到外界环境的干扰,也不利于封装,因此需根据实际应用场景在传感器灵敏度和传感性能之间进行优化设计。

由于热光效应,液体温度对传感器的液位响应有一定的影响,因此本文对传感器的温度响应特性进行了实验研究。在温度传感实验中,将传感器固定在钢尺上,使其全部浸入盛有热水的烧杯中,温度从 35 °C 上升至 90 °C,水温每上升 5 °C 时记录一次光谱。

实验研究了 3 个传感器在折射率为 1.3352 的水中的温度响应,实验结果如图 9 所示,图 9(a) 为 35~90 °C 温度范围内长度为 24 mm 的传感器的透射光谱对水的响应。随着温度的增加,干涉谷处波长有红移现象。长度分别为 28 mm 和 32 mm 的传感器在不同温度的透射光谱分别如图 9 (b) 和 9(c) 所示。可以观察到,透射光谱在两个不同长度干涉仪中均表现出类似的红移现象。当温度变化范围为 35~90 °C 时,对于干涉仪长度为 24、28、32 mm 的 3 个干涉仪的波谷漂移量分别为

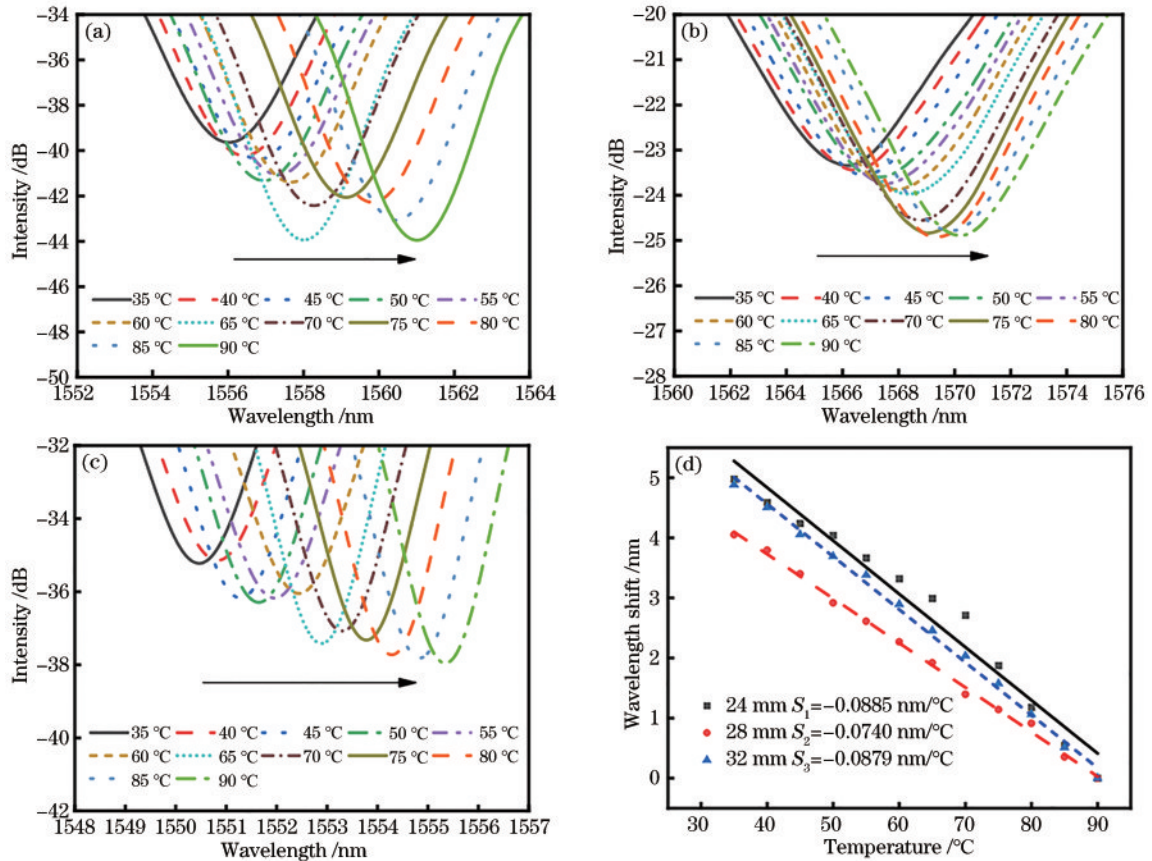


图 9 干涉仪的温度响应光谱及灵敏度曲线。长度为(a)24 mm;(b)28 mm;(c)32 mm 的干涉仪在不同水温下的透射光谱;(d)干涉仪的温度灵敏度线性拟合曲线

Fig. 9 Temperature response spectra and sensitivity curves of interferometer. Transmission spectra of interferometer with length of (a) 24 mm; (b) 28 mm; (c) 32 mm at different water temperatures; (d) linear fitting curves of temperature sensitivity of interferometer

5.02、4.06、4.90 nm。图 9(d)显示了在干涉谷处波长和温度变化的关系,通过线性拟合得到 3 个干涉仪的温度灵敏度 (S_1 、 S_2 、 S_3) 分别为 0.0885、0.0740、0.0879 nm/°C,线性度分别为 0.9695、0.9973、0.9959。本文所提出的传感器的液位响应是蓝移现象,而温度响应是红移现象,因此可以将液位与温度变化对传感器的影响加以区分。在实际应用中,可在传感器后面级联一个光纤布拉格光栅(FBG)来标定温度,以解决液位测量过程中温度的交叉敏感性问题。

光纤液位传感器对比如表 1 所示。表 1 中的比较表明,本文提出的液位传感器比基于 SMF“花生结构”的液位传感器具有更高的灵敏度,约为其 4 倍。文献[19]的液位测量范围最大,但是强度型解调容易受到外界环境扰动影响,而且在特殊光纤上刻写特殊光

栅的工艺较为复杂,不利于实际应用。本文提出的液位灵敏度高于文献[22]中基于 SCF 的 MZI 型液位传感器。该传感器采用的耦合方式为锥和多模光纤,这说明本文提出的光纤“花生结构”的耦合效率较高,且制作更为简便。

已报道的光纤干涉型液位传感器按照干涉原理,可以分为迈克尔孙干涉(MI)型、FPI 型和 MZI 型。光纤 FPI 型液位传感器的特点是测量范围大,但精度低。光纤 MI 型液位传感器的测量范围宽,灵敏度较高,但温度对传感器的影响较大。而光纤 MZI 型液位传感器结构紧凑、灵敏度高,并可以解决温度交叉敏感问题。与其他传感器相比,本文提出的传感器灵敏度高、测量范围较宽,这在实际应用中具有一定的优势。

表 1 光纤液位传感器对比
Table 1 Comparison of optical fiber liquid level sensors

Method	Measurement range /mm	Liquid level sensitivity	Temperature and liquid level cross-sensitivity / (mm·°C ⁻¹)	Reference
SMF-MMF-TCF-SMF	9	-0.1758 nm/mm	-0.349	[17]
SMF-MMF-SMF	21	-0.0887 nm/mm	0.689	[18]
Tilted FBG written in TCF	60	-0.51 dB/mm	—	[19]
Coreless-D-shape-coreless fiber structure	55	0.2138 nm/mm	-0.114	[20]
Peanut-shaped fiber structures based MZI	53.5	-0.1025 nm/mm	—	[21]
SMF-taper-SCF-MMF-SMF	50	-0.1353 nm/mm	—	[22]
SMF-taper-TCF-taper-SMF	15	1.2416 nm/mm	-0.017	[23]
MMF-HCF-FBG	9	1.1450 nm/mm	0.013	[24]
SMF-peanut-SCF-peanut-SMF	0-24	-0.4069 nm/mm	0.210	Proposed

4 结 论

本文提出了一种结构紧凑、灵敏度高的基于 SCF 的光纤 MZI 型液位传感器。为了提高 SMF 和 SCF 的耦合效率,采用了单模-花生-七芯-花生-单模光纤结构,其中光纤“花生结构”有效地提高了 SMF 和 SCF 之间的耦合效率,增强了传感器的机械强度。对传感器进行了水溶液液位和温度响应特性实验研究,研究表明,干涉光谱的干涉谷对液位敏感,在 0~24 mm 的液位测量范围内实现了 -0.4069 nm/mm 的高灵敏度液位测量。该传感器的结构简单、灵敏度高并且制作成本低,适用于石油化工等领域的液体液位测量。

参 考 文 献

- [1] Liao K Y, Li Y L, Lei M, et al. A liquid level sensor based on spiral macro-bending plastic optical fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 70: 102874.
- [2] Chen Q, Chen H, Gao Z, et al. A liquid level optical fiber sensor with refractive index compensation through cascading double multi-mode interferences[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 127: 104437.
- [3] Li C, Ning T, Zhang C, et al. Liquid level and temperature sensor based on an asymmetrical fiber Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating[J]. *Optics Communications*, 2016, 372: 196-200.
- [4] 常建华, 杨镇博, 王婷婷. 全光纤马赫-曾德干涉型高精度油罐液位传感器[J]. *电子器件*, 2013, 36(6): 928-930. Chang J H, Yang Z B, Wang T T. Oil level sensor based on all-fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2013, 36(6): 928-930.
- [5] 邵敏, 韩亮, 兆雪, 等. 基于在线型光纤迈克尔孙干涉仪的液位传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328021. Shao M, Han L, Zhao X, et al. Liquid level sensor based on in-fiber Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328021.
- [6] Liu T G, Zhang W C, Wang S, et al. Temperature insensitive and integrated differential pressure sensor for liquid level sensing based on an optical fiber Fabry-Perot interferometer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 6803208.
- [7] Liang X, Ren G B, 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.

- [8] Zhang W J, Wu X, Zhang G, et al. An inline Mach-Zehnder interferometer for simultaneously measuring liquid level and temperature[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 63: 102501.
- [9] 陆云清, 陆懿, 冯高峰, 等. SCF 的制备和传输特性的研究[J]. *光电子·激光*, 2017, 28(3): 269-274.
Lu Y Q, Lu Y, Feng G F, et al. Fabrication and transmission characteristics of seven-core fiber[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2017, 28(3): 269-274.
- [10] 宋小亚. 基于 SCF 的干涉型传感器研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
Song X Y. Study of fiber optic interferometer based on seven core fiber[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [11] Wang X L, Chen D R, Li H T, et al. In-line Mach-Zehnder interferometric sensor based on a seven-core optical fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(1): 100-104.
- [12] 程一夫. 基于多芯光纤分布式应变测量的形状传感研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
Cheng Y F. Research on shape sensing based on multi-core fiber and distributed strain measurement[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.
- [13] Zhou R, Qiao X G, Wang R H, et al. An optical fiber sensor based on lateral-offset spliced seven-core fiber for bending and stretching strain measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(11): 5915-5920.
- [14] Zhao L M, Li H, Song Y M, et al. Application of MZI symmetrical structure with fiber balls and seven-core fiber in microdisplacement measurement[J]. *Photonic Sensors*, 2019, 9(2): 97-107.
- [15] Wang T, Liu B, Zhao L, et al. High-sensitivity liquid level sensor based on the balloon-shaped fiber optic MZI [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(2): 1-7.
- [16] 张怀诚. 基于模式干涉的光纤激光液位传感器[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2021.
Zhang H C. Fiber laser liquid level sensor based on mode interference[D]. Harbin: Helongjiang University, 2021.
- [17] Li L C, Xia L, Xie Z H, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11109-11120.
- [18] Rong Q Z, Qiao X G, Du Y 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.
- [19] Gu B B, Qi W L, Zhou Y Y, et al. Reflective liquid level sensor based on modes conversion in thin-core fiber incorporating titled fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11834-11839.
- [20] Dong Y, Xiao S Y, Xiao H, et al. An optical liquid-level sensor based on D-shape fiber modal interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(13): 1067-1070.
- [21] Sun M M, Jin Y X, Dong X Y. All-fiber Mach - Zehnder interferometer for liquid level measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(7): 3984-3988.
- [22] 张轶涵. SCF 传感特性研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
Zhang Y H. Research on sensing properties of seven core fiber[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [23] Shao M, Han L, Liang J J, et al. A high-sensitivity liquid level sensor based on single-mode taper-thin core taper single-mode fiber structure[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(10): 105101.
- [24] Zhang Y S, Zhang W G, Chen L, et al. High sensitivity optical fiber liquid level sensor based on a compact MMF-HCF-FBG structure[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(5): 055104.