

基于单模异芯光纤结构的液位传感器

徐 贲 李 裔 孙 苗 赵晓伟

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 提出了一种新颖的光纤液位传感器。在普通单模光纤(SMF)中间熔接一段细芯单模光纤(TCSMF),构成共轴光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。液位的变化引起包层模与芯模的相位差发生改变,从而导致干涉仪的透射光谱发生改变。对传感器的工作原理和测量灵敏度及精度进行了理论分析,实验结果显示透射光谱中特征峰波长漂移量跟液位变化量呈较好的线性关系,且灵敏度随待测液体折射率的增大而增高,与理论分析结果相一致。测量得到纯水和饱和氯化钠溶液的测量灵敏度分别为 0.160 nm/mm 和 0.228 nm/mm。该传感器采用全光纤结构,制备简单、测量精度高,可适用于折射率低于光纤包层折射率液体的高精度液位测量。

关键词 传感器;马赫-曾德尔干涉仪;液位;光谱

中图分类号 O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s114008

Liquid Level Sensor Based on a Single-Mode Hetero-Core Fiber Structure

Xu Ben Li Yi Sun Miao Zhao Xiaowei

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

Abstract A novel liquid level sensor is proposed. A segment of thin-core single-mode fiber (TCSMF) is inserted in a single-mode fiber (SMF) by splicing to form an in-line Mach-Zehnder interferometer (MZI). The phase difference between cladding modes and core mode is changed with the change of liquid level, and then the transmission spectrum of MZI is changed. The principle and sensitivity of the sensor are analyzed theoretically, and experimental results show that the shift of the peak wavelength is almost linearly proportional to the change of liquid level and the sensitivity increases with the refractive index (RI) of tested liquid, which is content with the analyzed results. The sensitivities of 0.160 nm/mm and 0.228 nm/mm are obtained in pure water and saturated salt water, respectively. The sensor is characterized by full optical fiber structure, easy fabrication and high sensitivity, and it is promising in measuring accurately the level of liquid with refractive index less than that of cladding.

Key words sensors; Mach-Zehnder interferometer; liquid level; spectrum

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 280.4788; 260.3160

1 引 言

在石油、化工、电力、冶金、国防军事等部门,因生产或储存需用各种型式的储罐来存放各种易燃、易爆的油料或化工液体原料,对这些储罐的液位进行检测,不仅要求探测器具有较高的测量精度、更好的可靠性及稳定性和将液位信号远传的功能,而且要求测量仪器具有安全防爆的特性。近年来,各式液位传感器得到了广泛的应用和开发,如机械式、电子式以及光学方法测量液位等^[1~5]。其中,机械式液位传感器随着使用时间的延长,会有大量沉淀附

着于传动装置上,导致装置测量灵敏度大大降低,直至产生故障;电子式液位传感器应用较为普遍,但一般局限于非易燃液体液位,且无潜在爆炸可能性的环境中的测量。光纤液位传感器较之前两类有着很多优点,如低功耗、抗电磁干扰、小尺寸、不易腐蚀和高灵敏性,且在使用时无需电信号,因此适用于易爆环境中对易燃液体液位的监测。

光纤液位传感器种类繁多,通常应用到特殊结构的光纤作为传感头,如长周期光栅^[6]、光纤布拉格光栅^[7~9]、侧边抛光塑料光纤^[10]、D型光纤^[11]等,利用

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61007051)和浙江省自然科学基金(Y5090150, Y6100244)资助课题。

作者简介: 徐 贲(1979—),男,讲师,主要从事光纤传感及器件方面的研究。E-mail: xubenfiles@163.com

倏逝波与外界液体的相互作用来感知液位的变化。这类传感器测量灵敏度高,但加工制备复杂,成本高,故其应用受到一定限制。最近 Antonio-Lopez 等^[12,13]提出了一种基于多模干涉自成像原理的光纤液位传感器,具有结构简单、灵敏度高等特点。但是,制备时需要精确控制光纤传感头的长度,并在光纤端面镀一层反射膜。

本文提出一种基于异芯单模光纤(SMF)结构的液位传感器,在普通通信单模光纤中间熔接一段细芯单模光纤(TCSMF),构成光纤内共轴马赫-曾德尔干涉仪(MZI),根据传感部分包层模和芯模的相位差变化从而解调出液位的改变量。该传感器具有制备简单、灵敏度高的特点。

2 工作原理

光纤液位传感器的结构如图 1 所示。应用光纤熔接机将一段细芯单模光纤熔接于单模光纤中部,构成“三明治”结构。单模光纤为通信用单模光纤(SMF28),芯径 $9\ \mu\text{m}$;单模光纤(Nufern 405-HP)的芯径为 $(3.5 \pm 0.5)\ \mu\text{m}$,截止波长为 $(370 \pm 20)\ \text{nm}$ 。两者包层直径均为 $125\ \mu\text{m}$,故熔接时可采用边缘对齐方式。

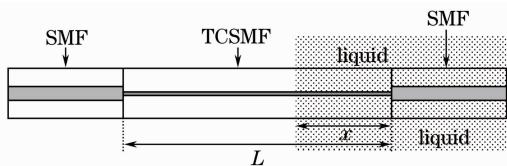


图 1 液位传感器结构图

Fig. 1 Schematic of the liquid level sensor

测量时,将部分细芯光纤浸入液体,余下部分处于空气中。由于芯径的不匹配,在第一个熔接点处导入单模光纤中原本以芯模存在的光有部分泄露到细芯光纤的包层中,从而以包层模的形式传播;另一部分光耦合进细芯光纤的纤芯,以芯模形式传播。包层模和芯模在第二个熔接点处相遇产生干涉,之后以单模形式在导出单模光纤中传输。因此,细芯光纤部分可以看成是光纤内共轴的马赫-曾德尔干涉仪。包层模和芯模的相位差异导致干涉光强产生最大值和最小值,对应透射光谱上不同的峰值。值得注意的是激发出的包层模存在多个,透射光谱是多个包层模与芯模的干涉结果。但通常只有一个或少数几个包层模占主导。假设空气段细芯光纤的第 i 阶包层模能在液体段以第 j 阶包层模继续传播,则若只考虑单个包层模,透射光谱中对应的极小值应

满足

$$2\pi \left[n^{\text{co}}(\lambda) \frac{L}{\lambda_D} - n_{\text{air}}^{\text{cl},i}(\lambda) \frac{L-x}{\lambda_D} - n_{\text{liquid}}^{\text{cl},j}(\lambda) \frac{x}{\lambda_D} \right] = (2k+1)\pi, \quad (1)$$

式中 $n^{\text{co}}(\lambda)$ 为芯模的有效折射率,与入射光波长有关; L 和 x (大于 0) 分别为细芯光纤总长度和浸入液体中部分的长度; k 为整数; λ_D 为对应透射谱中光强极小值的峰值波长; $n_{\text{air}}^{\text{cl},i}(\lambda)$ 和 $n_{\text{liquid}}^{\text{cl},j}(\lambda)$ 分别表示空气段细芯光纤第 i 阶包层模和液体段第 j 阶包层模的有效折射率,两者均为波长的函数。包层模与芯模的相位差与浸入液体中的细芯光纤长度 x 有关,从而根据透射光谱中峰值特征波长的改变量可解调出液位的改变量。根据(1)式可得到传感器的测量灵敏度为

$$S = \frac{d\lambda_D}{dx} = n_{\text{air}}^{\text{cl},i}(\lambda) - n_{\text{liquid}}^{\text{cl},j}(\lambda) = \Delta n_{\text{eff}}, \quad (2)$$

式中 Δn_{eff} 为空气段第 i 阶包层模和液体段第 j 阶包层模的有效折射率差。液位的改变,不影响空气段和液体段原本存在的包层模个数,仅改变各包层模的相位。从(2)式可得到三个推论:1) $d\lambda_D/dx > 0$, 液位升高透射谱中峰值特征波长向长波长漂移,即表现出红移现象;2) 透射谱中峰值特征波长的改变量与液位变化呈线性关系;3) 传感器测量灵敏度与被测液体折射率有关,且随被测液体折射率增大而增大。

3 实验结果

将一段长度为 $64\ \text{mm}$ 的细芯光纤熔接于单模光纤中部,结构如图 1 所示。实验中,光纤光谱仪(Yokogawa AQ6370C)波长分辨率为 $0.05\ \text{nm}$ 。图 2 显示的是纯水水位变化时测量得到的透射光谱,在波长 $1490\ \text{nm}$ 处存在衰减最强的一个峰值,

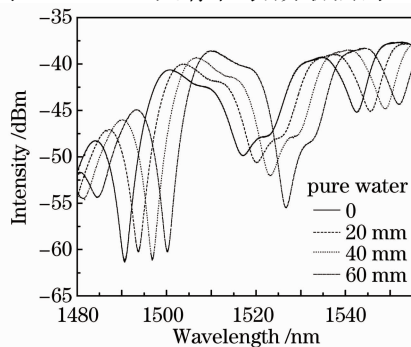


图 2 不同纯水液位的透射光谱

Fig. 2 Transmission spectra at different liquid levels of pure water

且对应消光比较大。显然,透射谱中峰值特征波长随着水位的上升而向长波长方向漂移,表现出了红移现象。选择透射谱中衰减最强的峰值作为研究对象,图3显示了不同水位时该峰值特征波长的值以及它与水位的关系。应用最小二乘法线性拟合,得到相关系数 $R=0.99928$,且 $p<0.0001$,表明峰值特征波长与液位间存在较好的线性关系。拟合直线的斜率表征传感器测量灵敏度,其值为 $S=0.160\text{ nm/mm}$ 。该实验结果与(2)式的推论1)和2)相吻合。

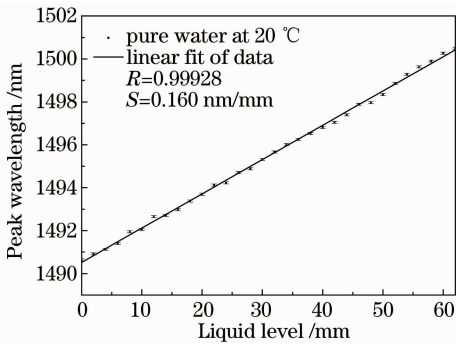


图3 不同液位的透射光谱峰值特征波长

Fig. 3 Peak wavelengths of transmission spectra at different liquid levels

采用同一个传感器对饱和氯化钠溶液的水位变化也进行了检测,图4是饱和氯化钠溶液的透射光谱。由于此时透射谱红移非常明显,峰值特征波长漂移量较大,导致光谱重叠厉害,从而显得杂乱无章,故只选取了两个特征液位时的透射谱线。选择透射谱中消光比较大的峰值作为研究对象,对应特征波长在1495 nm附近。图5显示的是不同液位对应的该峰值特征波长值,以及与液位的关系。同理,应用最小二乘法进行了线性拟合,结果显示峰值特征波长与液位间同样存在较好的线性关系,相关系数 $R=0.99937$,且 $p<0.0001$,斜率 $S=0.228\text{ nm/mm}$ 。测量灵敏度较纯水高,印证了(2)式的推论3),灵敏

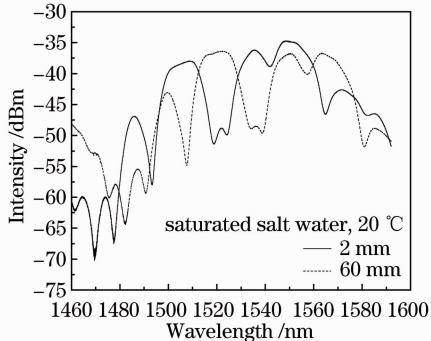


图4 不同饱和氯化钠溶液液位的透射光谱

Fig. 4 Transmission spectra at different liquid levels of saturated salt water

度与被测液体折射率有关,且随被测液体折射率增大而增大的结论。假设光谱仪的分辨率为 1 pm ,则该传感器液位测量的分辨率为 $4.39\text{ }\mu\text{m}$ 。该结果优于文献[10,11]中的分辨率,与文献[4,5,12,13]中的结果相当。

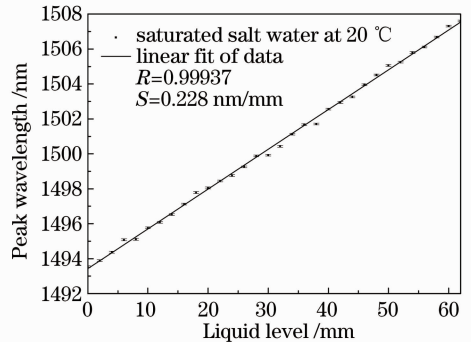


图5 不同饱和氯化钠溶液液位的透射光谱峰值特征波长

Fig. 5 Peak wavelengths of transmission spectra at different liquid levels of saturated salt water

传感器的两个光纤熔接点对应传感测量时的临界液位。当液位从高于上端熔接点降至低于最高熔接点或液位从低于下端熔接点上升为高于下端熔接点时,即细芯光纤由浸入一种介质(空气或液体)突变为浸入两种介质(空气与液体),透射光谱中特征峰波长均会出现一个突变,据此该传感器也可作为临界水位报警器。

值得注意的是,该传感器利用的是纤内马赫-曾德尔干涉仪的原理,其信号臂(即细芯光纤包层)内包层模传输时与周围液体接触,因此要求待测液体的折射率低于包层折射率,保证透射谱中特征峰有较大的消光比,方便探测测量。另一方面,传感器的量程受细芯光纤长度的限制(单根细芯光纤太长易导致光纤弯曲,从而引起透射光谱发生改变^[14]),可以采用多个传感头串接或并列错位分布的方式来扩展其测量范围^[15]。

传感器测量灵敏度受液体折射率影响明显,因此要求待测液体折射率单一、均匀,对分层液体使用该传感器会产生较大误差。其次,温度改变,传感器中细芯光纤部分热胀冷缩会引起芯模与包层模的相位差改变,从而带来液位的测量误差。可以采用矩阵法分析该传感器对液位和温度的交叉敏感性,从而校正液位测量的结果。

4 结 论

将一段细芯单模光纤熔接于单模光纤中部,构

成光纤液位传感头。测量液位时,让细芯光纤一部分浸入待测液体中,余下部分处于空气中。通过测量透射光谱中峰值特征波长的漂移量从而计算得到液位的变化量。对纯水和饱和氯化钠溶液分别进行了测量,发现峰值特征波长随液位的升高而出现红移现象,其漂移量跟液位变化量呈较好的线性关系,两种液体液位测量的灵敏度分别为 0.160 nm/mm 和 0.228 nm/mm。实验结果与理论分析很好地吻合。该传感器采用全光纤结构,安全可靠、制备方便、灵敏度高,适用于折射率低于细芯光纤包层折射率的液体,特别是易燃液体液位的精确测量。

参 考 文 献

- 1 K. Hambrice, H. Hopper. A dozen ways to measure fluid level and how they work[J]. *Sensor*, 2004, **21**(1-2): 14~20
- 2 E. Musayev, S. E. Karlik. A novel liquid level detection method and its implementation[J]. *Sens. Actuators A, Phys.*, 2003, **109**(1-2): 21~24
- 3 C. Yang, S. Chen, G. Yang. Fiber optical liquid level sensor under cryogenic environment [J]. *Sens. Actuators A, Phys.*, 2001, **94**(1): 69~75
- 4 P. Nath, P. Datta, K. C. Sarma. All fiber-optic sensor for liquid level measurement[J]. *Microware Opt. Technol. Lett.*, 2008, **50**(7): 1982~1984
- 5 J. Linesh, K. Sudeesh, P. Radhakrishnan *et al.*. Liquid level sensor using etched silica fiber[J]. *Microware Opt. Technol. Lett.*, 2010, **52**(4): 883~886
- 6 S. Khaliq, S. W. James, R. P. Tatam. Fibre-optic liquid-level sensor using a long period grating[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(16): 1224~1226
- 7 T. Guo, Q. D. Zhao, Q. Y. Dou *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating liquid-level sensor based on bending cantilever beam [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2400~2402
- 8 B. Y. Yun, N. Chen, Y. P. Cui. Highly sensitive liquid-level sensor based on etched fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(21): 1747~1749
- 9 X. W. Dong, R. F. Zhao. Detection of liquid level variation using a side-polished fiber Bragg grating[J]. *Opt. & Laser. Technol.*, 2010, **42**(1): 214~218
- 10 M. Lomer, A. Quintela, M. López-Amo *et al.*. A quasi-distributed level sensor based on a bent side-polished plastic optical fibre cable [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**(7): 2261~2267
- 11 S. M. Chandani, N. A. F. Jaeger. Optical fiber-based liquid level sensor[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(11): 114401
- 12 J. E. Antonio-Lopez, J. J. Sanchez-Mondragon, P. LiKamWa *et al.*. Fiber-optic sensor for liquid level measurement[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(17): 3425~3427
- 13 J. E. Antonio-Lopez, D. A. May-Arrijoja, P. LiKamWa. Fiber-optic liquid level sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(23): 1826~1828
- 14 K. Watanabe, K. Tajima, Y. Kubota. Macrobending characteristics of a hetero-core splice fiber optic sensor for displacement and liquid detection[J]. *IEICE Trans. Electron.*, 2000, **E83-C**(3): 309~314
- 15 Q. Jiang, D. B. Hu, M. Yang. Simultaneous measurement of liquid level and surrounding refractive index using tilted fiber Bragg grating[J]. *Sens. Actuators A*, 2011, **170**(1-2): 62~65

栏目编辑:殷建芳