

基于光纤气泡和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉液体折射率传感器*

李辉栋¹⁾ 傅海威^{1)2)†} 邵敏¹⁾²⁾ 赵娜¹⁾ 乔学光²⁾ 刘颖刚¹⁾ 李岩¹⁾ 闫旭¹⁾

1) (西安石油大学理学院光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065)

2) (西北大学物理系, 西安 710069)

(2013年5月15日收到; 2013年6月24日收到修改稿)

介绍了一种基于光纤气泡和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉液体折射率传感器. 将两根纤芯经过腐蚀的普通单模光纤熔接在一起, 在熔接点处形成一个气泡, 在距气泡 20 mm 处级联一段 20 mm 的细芯光纤, 再接入一段单模光纤, 形成单模光纤-气泡-单模光纤-细芯光纤-单模光纤结构的传感器. 气泡与光纤芯径失配处的两个节点起到光纤耦合器的作用, 从而形成光纤 Mach-Zehnder 干涉仪. 环境液体折射率的变化, 将使得传感器透射谱能量发生变化, 通过测量干涉谱波峰峰值能量从而实现对折射率的测量. 并对所制作传感器的折射率响应特性进行了实验研究, 实验结果表明干涉谱波峰峰值能量与环境液体折射率之间存在良好的线性关系, 当环境液体折射率变化范围在 1.351—1.402 时, 响应灵敏度为 143.537 dB/RIU, 线性度 0.996. 该传感器在生物化学领域有较好的应用前景.

关键词: 光纤气泡, 纤芯失配, Mach-Zehnder 干涉仪, 折射率传感

PACS: 42.81.Pa, 07.07.Df, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.62.214209

1 引言

液体的折射率是反映液体本质的重要物理参数之一, 在环境监测、食品检测、临床检验等领域中有着非常重要的地位. 目前已经有多种基于光纤折射率液体传感器, 如光纤迈克尔逊干涉仪法 (Michelson interferometer)^[1]、法布里珀罗干涉仪法 (Fabry-Perot Interferometer)^[2-4]、长周期光纤光栅 (LPFG) 检测法^[5,6]、光纤光栅 (FBG) 检测法^[7,8]、马赫曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 测量法^[9,10] 等方法与技术. 光纤干涉仪具有灵敏度高、成本低、制作便捷等优点. 近年来, 基于光纤纤芯失配型 MZI 吸引了很多学者的关注. Xia 等^[11] 提出了一种在细芯光纤的两端熔接单模光纤构成单模-细芯-单模结构的光纤 MZI 折射率传感器. 研究了波长漂移与折射率变化之

间的关系, 当折射率在 1.3346—1.3899 范围内变化时, 传感器的灵敏度为 135.5 nm/RIU. Li 等^[12] 提出了单模-多模-细芯-单模结构, 使用简单熔接的方法, 形成光纤 MZI 传感器, 同样研究了波长与折射率之间的变化, 当折射率在 1.3345—1.3775 范围内变化时, 传感器的折射率的灵敏度为 -25.2935 nm/RIU. Rong^[13] 提出了一种结构为单模-细芯-单模-细芯-单模的纤芯芯径失配的 MZI 折射率传感器, 也研究了波长与折射率之间的变化, 当折射率在 1.33—1.38 变化范围内, 折射率的灵敏度为 159 nm/RIU. 以上多为波长型折射率测量器件, 但是温度也会使干涉仪光谱改变, 导致波长的漂移. 所以上述器件存在着温度与折射率交叉灵敏度的问题. Qiu^[14] 提出了一种在光子晶体光纤上拉锥并且腐蚀锥区的折射率传感器, 研究了波长与折射率之间的变化, 当折射率在 1.3577—1.3739 变化范围, 内折射率的灵敏度为 750 nm/RIU, 且该传感器对温度不敏感,

* 国家自然科学基金 (批准号: F050304, F0502, 61240028)、国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2009AA06Z203)、陕西省教育厅重点实验室科研计划项目 (批准号: 12JS077) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hwfu@xysu.edu.cn

但该结构是在拉锥的基础上再进行腐蚀, 会使传感器机械强度大大降低, 且光子晶体光纤造价昂贵. Ma^[15] 提出了一种单模光纤-细芯光纤-单模光纤的 MZI 结构, 并且在该结构一端的单模光纤中写入光栅, 研究了干涉谱波谷峰值功率与环境液体折射率之间的变化关系, 折射率在 1.33—1.41 变化范围内, 传感器的灵敏度为 133.26 dB/RIU. 该传感器加入光纤光栅使结构更为复杂, 且成本提高.

本文提出了一种单模光纤-气泡-单模光纤-细芯光纤-单模光纤结构的光纤 MZI 折射率传感器. 通过改变环境液体折射率来测量传感器的光谱响应. 研究了干涉谱波峰峰值能量与环境液体折射率之间的关系, 并实验研究了温度对传感器光谱响应的影响. 实验结果表明该传感器灵敏度高、结构紧凑、制作简便、可应用于液体折射率的测量, 是一种优良的能量型检测器件.

2 传感器制作

首先用化学腐蚀的方法制作气泡. 利用 40% 氢氟酸溶液在两根普通光纤纤芯腐蚀出凹槽, 然后再将两根光纤凹槽面熔接封闭成腔从而形成气泡的方法, 其步骤如下: 将单模光纤一端的涂覆层去掉, 用切刀将端面处理平整, 竖直置于盛有 40% 的氢氟酸溶液的腐蚀槽之中, 放置 7 min. 由于光纤的纤芯 (普通光纤的纤芯掺有氧化锗 GeO_2) 与包层 (纯二氧化硅) 的材料不同, 导致光纤的纤芯与包层的腐蚀速率不同, 且纤芯的腐蚀速率大于包层. 这样, 经过腐蚀之后的光纤端面会出现一个凹槽. 根据文献 [16] 可知, 腐蚀 7 min 可得到 $6 \mu\text{m}$ 深的凹槽, 且对光纤的机械强度影响小. 腐蚀之后立即将光纤腐蚀端面置于超声清洗仪中清洗, 将凹槽中的氢氟酸清洗之后, 再将两根纤芯经过腐蚀的光纤进行熔接, 便会形成一个腔长为 $12 \mu\text{m}$ 的气泡. 熔接气泡时要修改熔接参数, 以免放电强度过大, 形成熔接塌陷, 从而影响气泡的形成. 实验所用熔接机型号为古河 s177, 在程序编辑模式下, 选择首次放电开始强度为 60、结束强度为 60、预熔时间为 200 ms、首次放电时间为 200 ms, 修改完成之后进行熔接.

用上述方法制作气泡, 把熔接气泡的单模光纤, 将其一端长度留 20 mm, 再熔接一段长度为 20 mm 的细芯光纤, 然后接入单模光纤, 形成单模-气泡-单模-细芯-单模的结构. 其中单模光纤的纤芯芯径为 $9 \mu\text{m}$, 包层直径为 $125 \mu\text{m}$; 细芯光纤的芯径为 $5.5 \mu\text{m}$, 包层直径为 $120 \mu\text{m}$.

3 理论分析

当光从光源输出经过气泡, 一部分光会耦合进入下一段单模光纤的纤芯, 一部分会耦合进入下一段单模光纤的包层, 从而激发出包层模, 此处气泡与细芯光纤之间的单模光纤作为传输光纤. 单模光纤纤芯中传输的光通过单模光纤与细芯光纤的第一个熔接节点时, 由于芯径不匹配等原因, 一部分光耦合进细芯光纤的纤芯传输, 另一部分光耦合进细芯光纤的包层传输, 激发出包层模. 在细芯光纤与单模光纤的第二个熔接节点处, 包层模与纤芯基模相遇并耦合. 由于细芯光纤的包层模直径小, 可以增加包层倏逝波的能量, 而且在细芯光纤中传输的包层模可以更有效的耦合进单模光纤的纤芯基模, 从而纤芯基模和包层模发生干涉, 这里气泡增大了光的发散角, 从而使更多的光进入下一段单模光纤的包层模, 增加包层模的能量, 有利于提高干涉条纹对比度, 纤芯失配的两个节点作为耦合器, 细芯光纤作为传感臂, 从而形成 MZI. 包层模的有效折射率的变化取决于周围环境液体折射率的变化, 倏逝波的基模与环境液体折射率之间的相互作用会导致透射光谱能量的变化, 根据此变化的反馈便可测量环境液体折射率的变化.

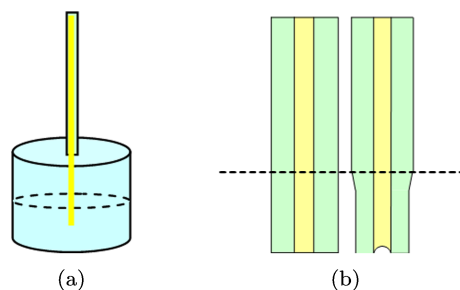


图 1 (a) 为腐蚀操作示意图; (b) 腐蚀前后对比图

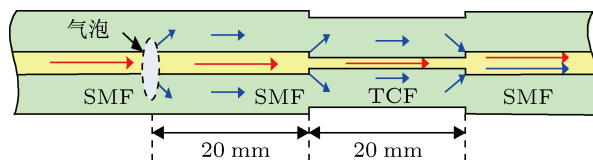


图 2 传感器结构示意图

MZI 传感器的传输光强^[12,13,17] 可以表示为

$$I = I_{\text{core}} + \sum_m I_{\text{cladding}}^m(RI) + \sum_m 2\sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m(RI)}$$

$$\times \cos\left(\frac{2\pi[n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}(RI)] \cdot L}{\lambda}\right), \quad (1)$$

式中 $I, I_{\text{core}}, I_{\text{cladding}}^m$ 为光强, 光在纤芯与第 m 阶包层传输, $L, n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 与 $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$ 分别为细芯光纤的长度, 芯模与第 m 阶包层模的有效折射率. λ 表示空气中自由空间光波长. 环境液体折射率的变化导致 I_{cladding}^m 的变化, 从而引起光强 I 的变化. 根据光强 I 的变化, 可以检测环境液体的折射率.

对 (1) 式的折射率求导, 即关于折射率灵敏度的计算式为

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dRI} = & \frac{d\sum_m I_{\text{cladding}}^m(RI)}{dRI} \\ & + \sum_m [I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m(RI)]^{-1/2} \\ & \times \frac{I_{\text{core}} dI_{\text{cladding}}^m(RI)}{dRI} \\ & \times \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda} [n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}(RI)] \cdot L\right\} \\ & + \sum_m \sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m(RI)} \\ & \times \sin\left\{\frac{2\pi}{\lambda} [n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}(RI)] \cdot L\right\} \\ & \times \frac{4\pi}{\lambda} \cdot L \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}(RI)}{dRI}. \quad (2) \end{aligned}$$

根据 (2) 式传感器环境液体折射率发生变化会引起细芯光纤包层模有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$ 的变化, 由于细芯光纤纤芯和包层的折射率不同, 两束光分别沿着纤芯和包层传输, 产生了一定的相位差即

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda}, \quad (3)$$

式中 Δn_{eff} 是纤芯模有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 与包层模有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$ 之差. 当基模与包层模之间相位差为 $2\pi m$ 时, 出现干涉极大, 第 m 阶峰值波长为^[18]

$$\lambda_m = \frac{\Delta n_{\text{eff}}L}{m}. \quad (4)$$

利用 ASE 光源发出的光传输输入射到 MZI 传感器中, 用 MS740A 光谱仪 (日本安立公司) 来测量传感系统的透射光谱. 实验测量了不同环境折射率液体下 MZI 透射光谱, 图 3 为传感器在空气中的透射光谱, 从图中可以发现干涉图样清晰, 最大条纹对比度大于 15 dB, 可满足实际测量的需求.

对空气和环境液体中的透射光谱做了傅里叶变换, 得到其傅里叶频谱. 如图 4 所示. 从图 4 可以发现, 空气和液体中的频谱的空间频率都有一个非常明显的主峰值, 且两个峰值频率相等均为

0.166 nm^{-1} , 这说明产生该干涉条纹的主要模式并未随着外界折射率的变化而改变. 进一步的对比发现, 液体中的频谱中出现的次要峰值比空气中减少, 说明在折射率液体中参与干涉的模式更加稳定. 这意味着在不同环境折射率液体中传感器的透射光谱会比较稳定. 从图 4 中还可看出, 液体中干涉仪透射谱傅里叶变换谱的峰值 (图 4 中 b 峰、c 峰) 大小低于空气中的对应值 (图 4 中 a 峰), 这是由于当外界环境折射率增加后, 更多的包层模能量耦合至外界倏逝场, 总能量有所减少. 频谱中同时还存在着几个较低的峰值, 而且较低峰值所对应的空间频率大于主峰值所对应的空间频率. 由于高阶包层模对应着较高的有效折射率, 也就是说对应着较高的空间频率, 所以对模间干涉起着主要作用的包层模为低阶模式, 可以认为该传感器的干涉条纹是由基模和某个低阶包层模形成.

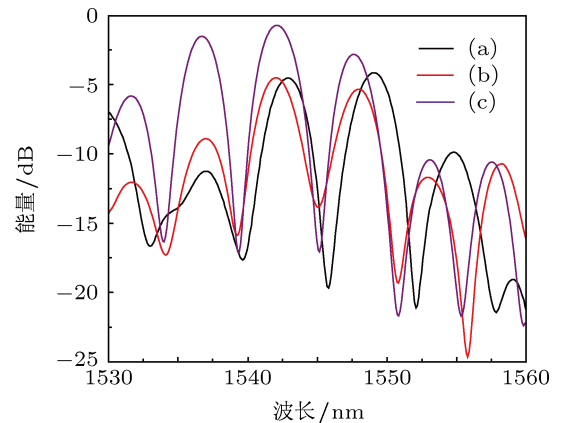


图 3 (a) 传感器在空气中的透射光谱; (b) 为环境液体折射率为 1.351 的透射光谱; (c) 为环境液体折射率为 1.402 的透射光谱

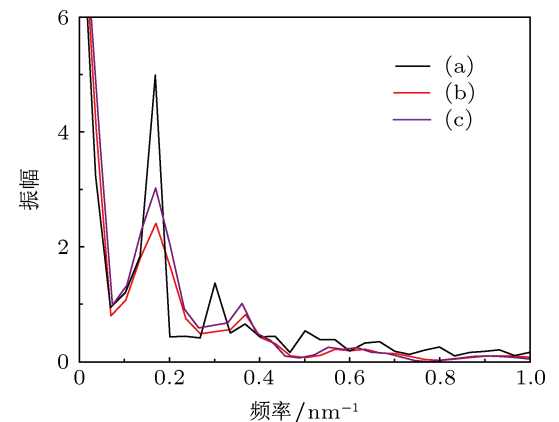


图 4 (a) 为传感器在空气中透射谱的空间谱; (b) 为传感器在环境液体折射率为 1.351 时透射谱的空间谱; (c) 为传感器在环境液体折射率为 1.402 时透射谱的空间谱

环境溶液折射率的变化使基模与某一包层模

有效折射率差 Δn_{eff} 产生一个变化量 $\delta\Delta n_{\text{eff}}$, 导致第 m 阶峰值中心波长也产生一个变化量 $\delta\lambda_m$. 干涉条纹中的峰值中心波长变化量可表示为^[18]

$$\delta\lambda_m = \delta\left(\frac{\Delta n_{\text{eff}}L}{m}\right) = \left(\frac{\delta\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta n_{\text{eff}}}\right)\lambda_m. \quad (5)$$

由 (5) 式可知峰值波长的变化量 $\delta\lambda_m$ 与有效折射率差的变化量 $\delta\Delta n_{\text{eff}}$ 成正比. 对实验所用光纤由 Optical Fiber 软件计算可知, 基模与包层模有效折射率差的变化量 $\delta\Delta n_{\text{eff}}$ 很小, 当环境溶液折射率在 1.351—1.402 范围内时, 2 阶到 5 阶包层模与基模有效折射率差的变化量在 10^{-7} — 10^{-6} 量级, 由 (5) 式可知波长漂移量 $\delta\lambda$ 也很小, 在 10^{-1} —1 nm 量级.

4 实验及结果分析

在整个折射率实验过程中, 将传感器固定在载玻片上面, 每次测量时将不同折射率的液体滴在传感器上, 然后监测传感器光谱响应, 但光谱不能很快稳定, 这是由于环境液体与光纤之间不能很好的接触. 为了使其光谱响应稳定, 将载玻片放置在超声波清洗仪上, 在超声波的震动作用之下, 可以使液体与光纤很好的接触, 从而使光谱响应很快达到稳定状态, 这时便可测量不同环境折射率液体的响应光谱. 每次测量后, 用无水乙醇清洗传感器, 晾干之后, 直到响应光谱与传感器置于空气中的原始光谱一致时, 再进行下一组折射率实验. 实验中配置不同浓度的蔗糖溶液作为折射率样品, 经阿贝折射率检测仪测试之后其折射率分别为 1.351, 1.369, 1.379, 1.387, 1.394, 1.402.

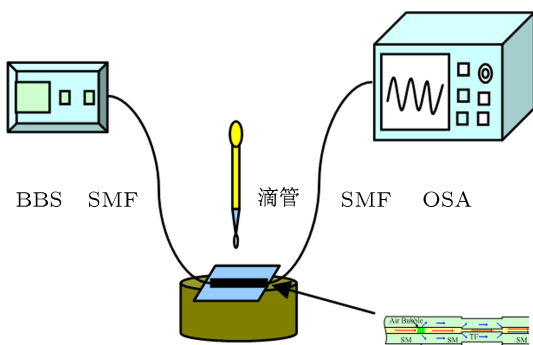


图5 实验装置

实验中选取中心波长为 1536.71 nm 处的波峰作为监测对象, 记录其在室温下 (22 °C) 不同环境折射率下的波长和能量的变化. 图 6 是在不同环境折射率液体下 MZI 透射光谱响应. 图 6 表明随

着折射率的增加, 透射光谱能量明显增加, 最大变化达到了 7.3 dB; 波长向长波方向漂移, 最大漂移量为 0.25 nm, 这与理论分析一致. 干涉谱峰值能量的变化远比峰值波长变化明显, 且灵敏度更高, 便于测量.

由于温度的变化也会导致传感器的透射光谱发生漂移, 所以本文对传感器的温度响应做了实验研究, 将传感器的传感部分悬空置于温箱之中, 然后加热. 温箱温度从室温 22 °C 加热至 75 °C, 实验中仍选取中心波长为 1536.71 nm 处的波峰作为监测对象, 记录其在不同温度下波长的变化. 图 7 表明随着温度的升高, 光谱波长向长波方向漂移, 而能量几乎不动.

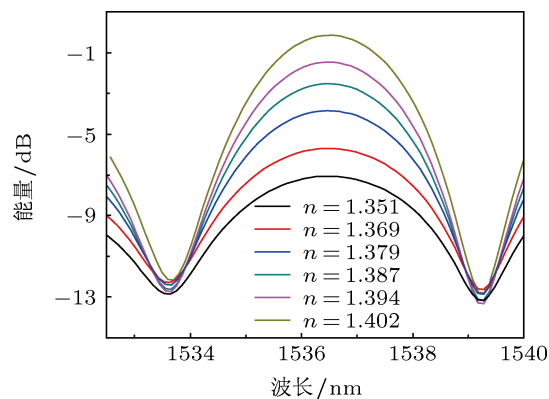


图6 传感器在不同折射率液体中的光谱响应

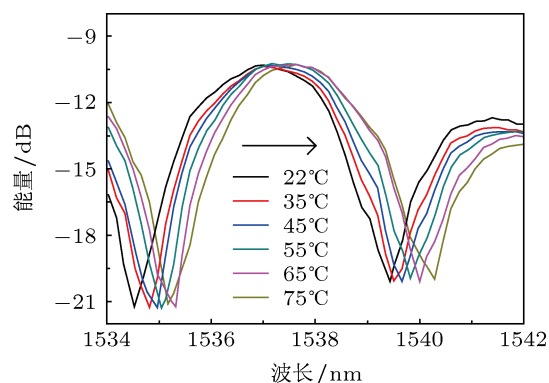


图7 传感器在不同温度下的光谱响应

图 8 是中心波长为 1536.71 nm 处波峰的能量随外界液体折射率变化的规律, 图中实点为实验数据, 实线为线性拟合直线. 环境液体折射率在 1.351—1.402 变化范围内, 1536.71 nm 处中心波长能量变化了 7.3 dB, 对应灵敏度为 142.537 dB/RIU. 中心波长漂移量与折射率的变化呈良好的线性关系, 线性度为 0.996. 图 8 中的插图是在不同温度下 MZI 的透射光谱响应, 由此插图可以表明在温度不

断变化的情况下透射光谱能量几乎保持不变.

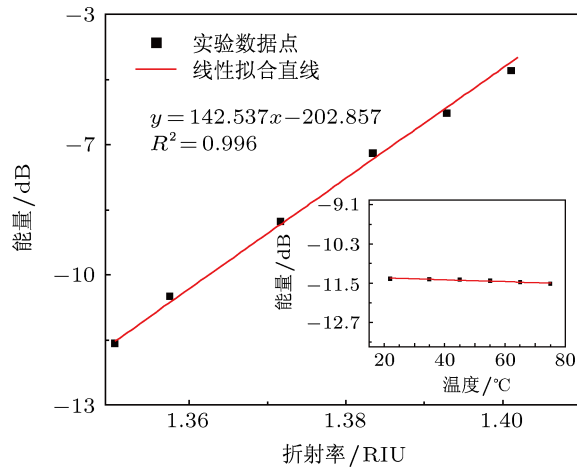


图8 能量与液体折射率变化的关系(插图为其温度响应)

5 结论

本文提出了一种基于光纤气泡与纤芯失配原理的 MZI 液体折射率传感器, 通过腐蚀单模光纤纤芯熔接形成气泡, 然后接入细芯光纤, 构成单模光纤-气泡-单模光纤-细芯光纤-单模光纤型光纤 MZI 折射率传感器. 实验结果表明透射光谱的能量随着液体折射率的增大而增加, 环境液体折射率在 1.351—1.402 的变化范围内, 实验所得灵敏度为 142.537 dB/RIU, 线性度为 0.996. 在温度不断增加的情况下对传感器透射谱的能量几乎没有影响. 该传感器结构简单、便于制作, 所用光纤也为普通商用光纤, 造价低廉, 可以用作液体折射率的测量, 尤其是在生物科技与化学工程中有很好的应用前景.

- [1] Tian Z B, Yam S S H, Loock H P 2008 *Optics letters* **33** 1105
- [2] Gong Y, Guo Y, Rao Y J, Zhao T, Wu Y, Ran Z L 2011 *ActaPhys. Sin.* **60** 064202 (in Chinese) [龚元, 郭宇, 饶云江, 赵天, 吴宇, 冉曾令 2011 物理学报 **60** 064202]
- [3] Nguyen L V, Vasiliev M, Alameh K 2011 *IEEE Photonics Technology Letters* **23** 450
- [4] Yin Z H, Zhang X B, Liu Y Q, Pang F F, Wang T Y 2012 *APC Technical Digest OSA: AF4A.72.pdf*
- [5] Rindorf L H, Jensen J B, Dufva H M 2006 *Optics Express* **14** 8224
- [6] Fan Y, Zhu T, Shi L 2011 *Applied Optics* **50** 4604
- [7] Cao Y, Yang Y F, Yang X F, Tong Z R 2012 *Chinese Optics Letters* **10** 030605
- [8] Liang R B, Sun Q Z, Wo J H, Liu D M 2011 *ActaPhys.Sin.* **60** 104221 (in Chinese) [梁瑞冰, 孙琪真, 沃江海, 刘德明 2011 物理学报 **60** 104221]
- [9] Reeves R, Webb D J, Bennion I, Neal R 2002 *Review of Scientific Instruments* **73** 1702
- [10] Tian Z B, Yam S S H, Barnes J, Bock W 2008 *IEEE Photonics Technology Letters* **20** 626
- [11] Xia T H, Zhang A P, Gu B B, Zhu J J 2010 *Optics Communications* **283** 2136
- [12] Li L C, Xia L, Xie Z H, Liu D M 2012 *Optics Express* **20** 11109
- [13] Rong Q Z, Qiao X G, Wang R H, Sun H, Hu M L, Feng Z Y 2012 *IEEE Sensors Journal* **12** 2501
- [14] Qiu S J, Chen Y, Kou J L, Xu F, Lu Y Q 2011 *Applied Optics* **50** 4328
- [15] Ma Y, Qiao X G, Guo T, Wang R H, Zhang J, Weng Y Y, Feng Z Y 2012 *Optics Letters* **37** 323
- [16] Guo Y 2010 *MS Dissertation* (chengdu: University of Electronic Science And Technology of China) (in Chinese) [郭宇 2010 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [17] Villatoro J, Monzón-Hernández D, 2006 *IEEE. Journal of Lightwave Technology* **24** 1409
- [18] Harris J, Lu P, Larocque H, Xu Y P, Chen L, Bao X Y 2013 *Optics Express* **21** 9996
- [19] Zhu J J, Zhang A P, Xia T H, He S L, Xue W 2010 *IEEE Sensors Journal* **10** 1415
- [20] Pang F F, Liu H H, Guo H R, Liu Y Q, Zeng X L, Chen N, Chen Z Y, Wang T Y 2011 *IEEE Sensors Journal* **11** 2395

In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on fiber core etched air-bubble and core diameter mismatch for liquid refractive index sensing*

Li Hui-Dong¹⁾ Fu Hai-Wei^{1)2)†} Shao Min¹⁾²⁾ Zhao Na¹⁾ Qiao Xue-Guang²⁾
Liu Ying-Gang¹⁾ Li Yan¹⁾ Yan Xu¹⁾

1) (Ministry of Education Key Laboratory on Photoelectric oil-gas Logging and detecting, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

2) (Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

(Received 15 May 2013; revised manuscript received 24 June 2013)

Abstract

A kind of optical fiber liquid refractive index sensor is proposed based on fiber core etched air-bubble and core diameter mismatched in-fiber Mach-Zehnder interferometer. A core etched standard single-mode fiber is spliced to another core etched standard single-mode fiber (SMF) to form an air bubble at the connecting point, and a 20 mm thinned fiber is cascaded (TCF) by fusion splicing method, which is 20 mm apart from the bubble, then a leading-mode fiber is spliced to the thinned fiber to form a structure of SMF-(air-bubble)-SMF-TCF-SMF in-fiber Mach-Zehnder interferometer liquid refractive index sensor. The air-bubble and the two fiber core diameter mismatched points serve as optical couplers for modes conversion. The transmission spectrum of sensor is studied by experiment. Results shows that the peak power changes with respect to surrounding refractive index with good linearity. The sensitivity of the sensor is 142.537 dB/RIU in the range of 1.351—1.402 with linearity of 0.996, making it a good candidate for bio-chemical measurements.

Keywords: in-fiber air bubble, core diameter mismatch, in-fiber Mach-Zehnder interferometer, refractive index sensing

PACS: 42.81.Pa, 07.07.Df, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.62.214209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. F050304, F0502, 61240028), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA06Z203), and the Research Foundation of Education Bureau of Shaanxi Province, China (Grant No. 12JS077).

† Corresponding author. E-mail: hwf@xsyu.edu.cn