

文章编号: 0253-2239(2009)07-1956-05

基于熔融拉锥光纤的液体折射率传感器

熊贻坤 黄旭光

(华南师范大学光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要 从理论和实验上研究了一种价格低廉、操作简单、可用于多点并行测量的液体折射率光纤传感器。该传感器采用分路器进行预分光, 利用高稳定放大自发辐射光源作为光源、普通光功率计作为光电探测器, 以熔融拉锥光纤作为传感单元。建立了一个简单模型, 分析了芯层所携带的光功率占总的光功率的比值随外部介质折射率变化的关系。实验上对不同折射率样品的传输损耗进行了测量, 采用对比方法作出了传输损耗随折射率变化的定标曲线。实验结果表明: 外部介质折射率越高, 传输损耗越大。并验证了反射器(光纤布拉格光栅)的引入能够有效的提高系统的灵敏度。

关键词 光纤传感; 熔锥光纤; 折射率; 分路器; 反射器

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092907.1956

Optical Fiber Sensor for Liquid Refractive Index Based on Fiber Optic Taper

Xiong Yikun Huang Xuguang

(Guangdong Provincial University Key Laboratory of Photonic Information Technology,
South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract A new refractive index fiber optic sensor with low cost, easy operation and the capability of multipoint parallel measurement is explored. A splitter is used in the refractive index fiber optic sensor to achieve multipoint parallel measurement. A high stable amplified spontaneous emission light source and three optical power meters are used as broadband source and detectors, respectively. A simple model is established, and the relation between the ratio of the light power carried by the core versus the total light power of a fiber and the external refractive index (RI) is analyzed in detail. In the experiment, the transmission losses of sample solution with different refractive indices are measured, the calibration curve between transmission loss (TL) and RI by comparison is obtained. It is found that the higher the RI is, the bigger the TL is. The experiment verifies that it can improve the system sensitivity greatly by introducing a fiber Bragg grating.

Key words fiber sensing; fiber taper; refractive index; splitter; reflector

1 引 言

物质折射率(RI)是反映物质内部信息的一个重要物理量。物质折射率的测量在基础研究、化学分析、环境污染评估、医疗诊断和食品工业等领域有着广泛的应用。国内外许多学者和研究机构在这方面做了大量的研究, 提出了许多方法, 如表面等离子体波共振法^[1,2]、光纤光栅检测法^[3,4]、光纤迈克耳

孙干涉仪法^[5]、马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪测量法^[6]、闪耀光纤光栅法^[7]、光纤法布里-珀罗(F-P)干涉仪检测法^[8,9]等方法与技术。但是这些方法中, 有的测量范围受到限制, 有的要求对被测样品进行加工, 有的仪器调整复杂, 仪器价格昂贵, 且无法进行多点同时测量。因此, 寻求和研究一种价格低廉、操作简单和可同时进行多点并行测量的光纤传感器

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-11-21

基金项目: 广州市科技计划项目(2006J1-C0461)资助课题。

作者简介: 熊贻坤(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感器的设计和研究。E-mail: xyk117@163.com

导师简介: 黄旭光(1962—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事光纤通信与光纤传感技术方面的研究。

E-mail: huangxg@scnu.edu.cn(通信作者)

是我们的目标所在。

将熔融拉锥光纤作为传感器使用,国内外的一些学者和研究机构也进行过相应的研究,如 Tian Zhaobing 等在熔锥光纤输出端面镀上一层金属膜组成一个迈克耳孙干涉仪^[10],或者采用两个熔锥光纤级联组成一个马赫-曾德尔干涉仪结构^[11];国内的 Ding Jinfei 等在两个长周期光纤光栅中插入一个熔锥光纤组成一个马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪结构^[12]。这些干涉仪结构的传感器都是基于频谱测量,需要用到光谱仪作为解调单元,无疑增加了系统的成本。另一方面 Pavel Polynkin 等提出了通过测量熔锥光纤输出端光功率的强度检测技术来测量样品的折射率^[13],但该方法不适合远程监测。总之,以上所有报道均没有对远程多点实时测量提出方案,不利于该类传感器的推广使用。

本文提出了采用分路器进行预分光、熔锥光纤作为传感单元、反射元件(如金属镀膜等元件)使熔锥光纤输出光沿原路返回的液体折射率传感器。反射元件的引入,不仅增加传感区的作用长度、进一步提高传感灵敏度。更重要的是,使得入射光纤和接收光纤为同一条光纤、光源和光电探测器放置在传感单元的同一段,从而可实现远程实时在线与多点并行测量。液体折射率测量实验表明,该系统结构简单、操作方便和测量精度较高。

2 理论分析

熔锥光纤是把剥除涂覆层的裸单模光纤经过高温加热处理,然后将其纤芯和包层同时拉细。设熔锥光纤纤芯和包层的折射率分别为 n_1 和 n_2 ,半径分别为 a 和 b ,待测溶液的折射率为 n_0 。为了说明传输损耗随待测溶液折射率变化的关系,建立以下简单模型:原来熔锥光纤的芯层和包层等效成模型的新芯层,而把待测溶液作为模型的新包层。新芯层的折射率可以由原熔锥光纤的有效折射率 n_{eff} 来等效,而新包层的折射率即为待测溶液的折射率 n_0 。为了说明当包层折射率 n_0 变化时,芯层所携带的光功率与芯层和包层所携带的总光功率比值如何变化,我们以 LP_{01} 模为例。

LP_{01} 模的模场分布与高斯分布相似,可以用高斯函数近似代替精确的场表达式。于是,新芯层所携带的光功率占总功率的比值为^[14]

$$\frac{P_c}{P_t} \approx 1 - \exp\left[-2\left(\frac{b}{s_0}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中 P_c 表示芯层携带的光功率, P_t 表示总的光功

率, b 表示新芯层半径, s_0 表示新模场半径。对于阶跃折射率光纤,模场半径与芯层半径存在如下关系^[15]:

$$s_0^2 = \frac{2b^2}{\ln(2\Delta k_0^2 n_{\text{eff}}^2 b^2)}, \quad (2)$$

式中 $\Delta = \frac{n_{\text{eff}} - n_0}{n_{\text{eff}}}$ 为相对折射率差,将(2)式带入(1)式,并化简得

$$\frac{P_c}{P_t} \approx 1 - \frac{1}{C_1 - C_2 n_0}, \quad (3)$$

式中 $C_1 = 2k_0^2 n_{\text{eff}}^2 b^2$, $C_2 = 2k_0^2 n_{\text{eff}} b^2$, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。当选取 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $n_{\text{eff}} = 1.46$ ^[15]时,对不同的纤芯半径 b ,可以作出芯层携带的光功率占总功率的比值 $\frac{P_c}{P_t}$ 随外部介质折射率 n_0 变化关系曲线如图 1 所示。

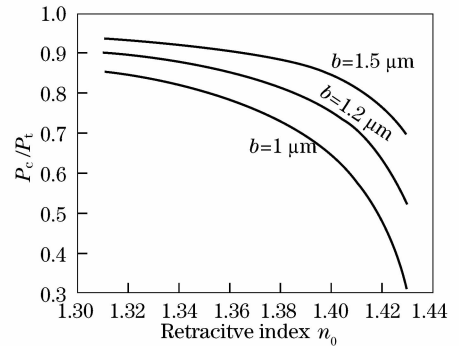


图 1 对于不同纤芯半径 b 的 $P_c/P_t - n_0$ 关系曲线

Fig. 1 Relation curves between P_c/P_t and n_0 with different core radius b

从图 1 可以清楚的看到,随着包层折射率 n_0 的增大,芯层所携带的光功率占总功率的比值 P_c/P_t 是减小的,也就是说将会有更多的光泄露到包层中损耗掉。于是,可以将熔锥光纤的传感机理归结为:随着包层(待测介质)折射率 n_0 的增大,芯层(熔锥光纤)携带的光功率占总光功率的比值减小,越来越多的光泄露到包层(待测介质)中,导致传输损耗增大。

3 实验

为了增加传感区的作用长度、进一步提高传感灵敏度,在熔锥光纤传感头的输出端接入反射元件。光纤传感头输出的光被反射后再次通过传感区域,返回原光纤最后被光电探测器所接收。值得强调的是,反射元件的引入不仅可以使传感区的传感长度加倍,更重要的是,它可以使光电探测器放置于传感系统的发射端、实现远程监控,并且还可利用分光实

现多点并行的实时传感与测量。

图 2 是基于熔锥光纤的液体折射率传感器系统示意图,它由光源(Source)、分光元件(Splitter)、耦合器系列(Coupler₁-Coupler_N)、熔融拉锥光纤传感头系列(Taper₁-Taper_N)、反射元件系列(Reflector₁-Reflector_N)、以及光电探测器系列(PD₁-PD_N)组成。其中,分光元件可以采用光纤耦合型分路器或平面 Y 分支波导集成型分路器,反射元件可以简单地在熔锥光纤传感头输出端镀上金属反射膜或选用其它反射器。

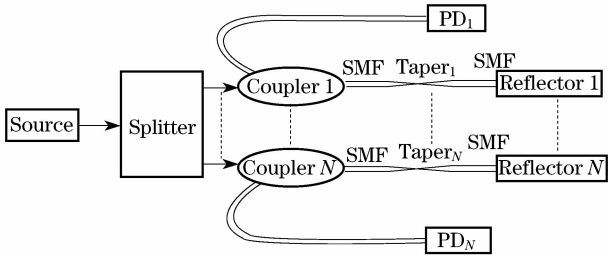


图 2 基于熔融拉锥光纤的液体折射率传感器系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optic fiber sensor for liquid refractive index based on fiber tapers

为了便于同时与常规的传感(即单次通过传感头)测量进行比较,本实验的具体实验装置如图 3 所示。由于条件所限无法镀金属反射膜,在实验中改用布拉格光纤光栅(FBG)作为反射元件,相应选取与 FBG 反射波长匹配的阵列波导光栅(AWG)代替分路器以提高分光效率,以验证上述的传感方法。光源为一个宽带光源(BBS),三个光电探测器 PD₁、PD₂ 和 PD₃ 分别用于监测入射、单次通过传感头和往返两次经过传感头后的光强。每个 FBG 的末端都涂上匹配液(IMG: Index matching glue)以消除光纤端面反射的影响。

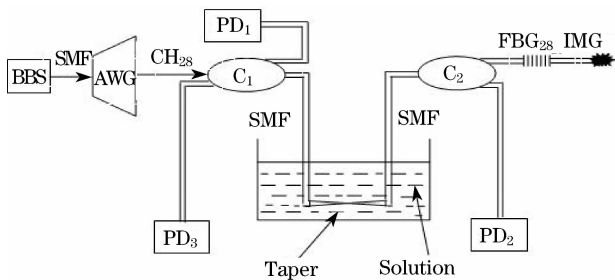


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

实验所选用的 BBS 波长范围为 1525~1565 nm; AWG 为 1×40 通道,所用的通道为第 28 通道,其透射谱中心波长和半峰全宽(FWHM)分别为 $\lambda_{\text{AWG}}^{28} = 1550.4501 \text{ nm}$, $\omega_{\text{AWG}}^{28} =$

0.6241 nm,相邻信道间隔 100 GHz($\Delta\lambda \approx 0.8 \text{ nm}$)。相应选取的匹配 FBG 的中心波长和半峰全宽分别为 $\lambda_{\text{FBG}}^{28} = 1550.3573 \text{ nm}$, $\omega_{\text{FBG}}^{28} = 0.3554 \text{ nm}$,这样选取的目的是使 FBG 的反射谱落在相应 AWG 的透射谱范围内。

实验所选用的 NaCl 溶液的浓度与折射率关系如表 1 所示。

表 1 NaCl 溶液的浓度与折射率的关系^[16]

Table 1 Relation between the concentration and refractive index of NaCl solution

Concentration	Refractive index
0	1.3105
0.0537	1.3197
0.0618	1.3211
0.0699	1.3225
0.0787	1.3239
0.0905	1.3260
0.1010	1.3278
0.1127	1.3298
0.1273	1.3323
0.1499	1.3362
0.1874	1.3426

为了扩大折射率的测量范围,本文还测量了混合比为 1:1、折射率为 1.3981 的甘油-水溶液和折射率为 1.43 的三氯甲烷液体。

4 实验结果

我们以光经过 AWG 分光后,到达耦合器 C₁ 被光功率计 PD₁ 探测到的光强为作为参考光强。将 PD₁ 探测到的参考光强(采用对数值 dBm)与光探测器 PD₂ 和 PD₃ 探测到的光强相减所得值视为传输损耗。实验结果如图 4 所示,图 4(a)表示光经过传感头后被匹配的 FBG 反射、再次经过传感头被光功率计 PD₃ 探测之后作出的传输损耗随外部折射率变化关系图。图 4(b)为光单次通过熔锥光纤传感头、被光功率计 PD₂ 探测后所作出的传输损耗随外部折射率变化关系图。由以上两图可以看到,随着外部介质折射率的增大,光纤传输损耗也随之增加。这与上面的理论分析相吻合。为了便于比较,我们以相对损耗(相对损耗的定义:将图 4(a)、(b)中的所有数据点的纵坐标向下移动,使第一个数据点的纵坐标变为零后,对应的各数据点在图上的纵坐标数值定义为相对损耗)为纵坐标,以外部介质折射率为横坐标,将图 4(a)、(b)放在一起,便得到了

图 4(c)。从图上可以清楚的看到,经过 FBG 反射后再次经过熔锥光纤的那条曲线斜率明显较不经过 FBG 反射的大,这说明 FBG 的引入,能有效地提高系统的灵敏度。对实验数据进行二次拟合得到 $R^2 > 0.99$,这一结果表明:二次曲线是很好的经验曲线。

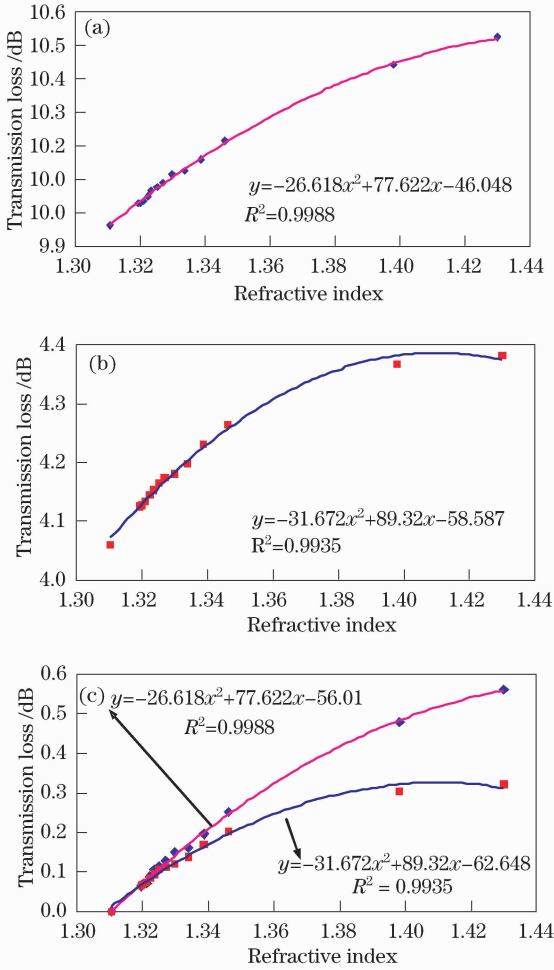


图 4 (a) 有 FBG 反射;(b)没有 FBG 反射时的传输损耗随折射率变化图;(c)有无 FBG 反射时的相对传输损耗随折射率变化比较图

Fig. 4 Transmission loss versus refractive index with FBG reflection (a); and without FBG reflection (b); comparison between relative transmission loss versus refractive index with and without FBG reflections (c)

5 传感灵敏度与稳定性分析

由实验可知,被测样品折射率变化为 $\Delta n = 0.1195$,在这个折射率范围内测量发现,在图 4(a)中,也就是光两次经过传感头并被 FBG 反射一次时光功率计 PD_3 探测到的光功率变化为 $\Delta I_a \approx 0.5583$ dB,而在图 4(b)中,即光只通过传感头一次就被光功率计 PD_2 直接探测, PD_2 探测到的光功率

变化为 $\Delta I_b \approx 0.3207$ dB,于是,我们可以求得图 4(a)、(b)的平均灵敏度分别为: $S_a = 4.6719$ dB/RIU (RIU: refractive index unit, 折射率单位); $S_b = 2.6837$ dB/RIU。不难看出,FBG 的引入,有效地提高了该系统的灵敏度。对于最小分辨率为 0.001 dB 的光功率计来说,图 4(a)、图 4(b)两种方法可以测得的最小折射率平均变化理论上分别为: 2.1404×10^{-4} RIU 和 3.7262×10^{-4} RIU。

对于一套传感测试系统,稳定性是衡量该系统好坏的一个重要标准。为此,选用水作为样品,在室温(18 °C)下进行了近 80 min 的稳定性测量,测试结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,测量值随时间的变化很小, $|\Delta I| < 0.002$ dB,对应的折射率起伏为 $|\Delta n| < 3.3 \times 10^{-4}$ RIU,标准误差为 $S = 1.4 \times 10^{-4}$ RIU。与以上的估算相一致。因此,该装置在普通条件下的折射率测量精确度和长时间稳定性可以达到 10^{-4} 数量级。因为温度对折射率有影响,如果要求更高的测量精度,则需要对待测样品进行更加严密的温度控制。

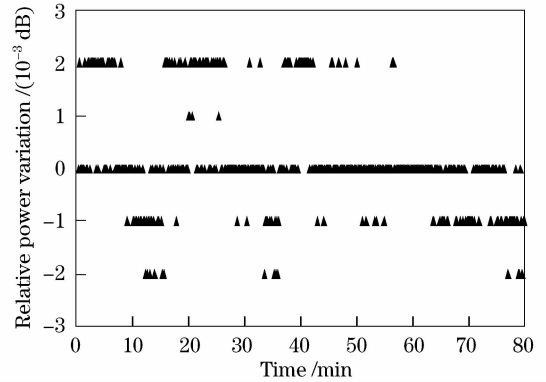


图 5 稳定性测试

Fig. 5 Stability test

6 结 论

利用外部介质折射率的变化,对光纤中芯层携带的光功率占总功率比值进行调制,建立了一个简单模型,从而解释了熔锥光纤的传输损耗随外部介质折射率增大而增加的传感机理。实验结果与理论分析相符合。在相同的实验条件下,两种方式的对比测量表明:反射器的引入,能有效地提高该系统的灵敏度,并且使得远程实时在线监控成为可能。由于该传感器的设计与实现基于光纤,所以易于集成在全光纤传感网络中,对于产品的推广和商业化有重要意义。该传感器具有操作简单、可同时进行多点并行测量等优点,可以推广到化学、生物传感器中应用。

参 考 文 献

- 1 Zeng Jie, Liang Dakai, Zeng Zhenwu *et al.*. Refractive optical fiber surface plasma wave resonance sensor[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共振传感器特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 404~409
- 2 Qiu Hao, Liang Dakai, Zhang Huanchun *et al.*. Research on the Surface Plasmon Resonance Fiber Optic Sensor for Cure Monitoring[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(6): 545~549
邱浩, 梁大开, 张焕春等. 光纤表面等离子体波传感器用于固化监测的研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(6): 545~549
- 3 Rao Yunjing, Mo Qiuju, Zhu Tao. A Novel High Sensitivity Refractive Index Sensor with Temperature Self-Compensating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 264~268
饶云江, 莫秋菊, 朱涛. 一种新型温度自补偿高灵敏度折射率计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 264~268
- 4 Li Zhiquan, Wang Li, Huang Lijuan *et al.*. Study on Refractive Index and Concentration Sensor Based on Long-Period Fiber Grating[J]. *J. Appl. Opt.*, 2004, **25**(4): 48~50
李志全, 王莉, 黄丽娟等. 基于长周期光纤光栅的折射率与浓度传感方案的研究[J]. *应用光学*, 2004, **25**(4): 48~50
- 5 Li Maohe, Zhang Meidun. Refractive Index Measurement by Optical Fiber Michelson Interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1294~1296
李毛和, 张美敦. 用光纤迈克耳孙干涉仪测量折射率[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1294~1296
- 6 Schubert T., Haase N., Kuck H. *et al.*. Refractive-index measurements using an integrated Mach-Zehnder interferometer[J]. *Sensors and Actuators A*, 1997, **60**(1~3): 108~112
- 7 Zhang Jian, Liu Bo, Jin Long *et al.*. Refractive Index Measurement Based on Blazed Fiber Bragg Grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 910~913
张键, 刘波, 金龙等. 基于闪耀光纤光栅的折射率传感技术实验研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 910~913
- 8 Wei Renxuan, Jiang Desheng. Refractive Index Measurement with Fabry - Perot Interference Wavelength[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6): 551~554
魏仁选, 姜德生. 基于 F-P 干涉波长的折射率测量[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 551~554
- 9 Fan Yanbin, Wang Zhenyan. Research on the Relationship between Interference Pattern and Refractive Index with Febyr-Porot Interferometer[J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 1999, **16**(5): 466~469
范延滨, 王正彦. 法布里-珀罗干涉图样与折射率对应关系的研究[J]. *量子电子学报*, 1999, **16**(5): 466~469
- 10 Zhaobing Tian, Scott S-H. Yam, Hans-Peter Loock *et al.*. Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(10): 1105~1107
- 11 Zhaobing Tian, Scott S-H. Yam, Jack Barnes *et al.*. Refractive Index Sensing With Mach - Zehnder Interferometer Based on Concatenating Two Single-Mode Fiber Tapers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(8): 626~628
- 12 J. F. Ding, A. P. Zhang, L. Y. Shao *et al.*. Fiber-Taper Seeded Long-Period Grating Pair as a Highly Sensitive Refractive-Index Sensor[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(6): 1247~1249
- 13 Pavel Polynkin, Alexander Polynkin, N. Peyghambarian *et al.*. Evanescent field-based optical fiber sensing device for measuring the refractive index of liquids in microfluidic channels[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1273~1275
- 14 Liao Yanbiao. *Fiber Optics*[M]. Beijing: Tsinghua Publishing House, 2000, 41~43
廖延彪. *光纤光学*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000, 41~43
- 15 Yan Fengping, Shan Ying, Jian Shuisheng *et al.*. Numerical analysis of the mode field radius for the square law and step index fiber[J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(1): 66~70
延凤平, 单英, 简水生. 基于平方律和阶跃型纤芯折射率分布下光纤模场半径的数值分析[J]. *光学技术*, 2000, **26**(1): 66~70
- 16 Su Hui, Huang Xuguang. Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions[J]. *Sensors & Actuators: B*, 2007, **126**(2): 579~582