

文章编号: 0258-7025(2007)01-0109-04

基于光纤端面回波的流体折射率传感器

苏辉, 黄旭光*, 赵华伟

(华南师范大学信息光电子科技学院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操作简单、价格低廉、灵敏度高的折射率光纤传感器。该传感器采用光纤回波强度调制原理,用半导体激光器作为光源,普通光功率计作为光电探测器,传感头为普通光纤端面。根据回波损耗随界面物质折射率不同而发生变化的机制,导出相对回波强度与折射率之间的对应关系。计算证明相对回波强度参量的引入能够有效地消除仪器的不稳定性、内部损耗和环境影响带来的测量误差,提高测量精度。灵敏度分析表明,对于具有0.01 dBm的仪器测量精度,相应的折射率分辨率可达 2×10^{-4} 折射率单位。实验结果表明在液体折射率1.30~1.45的范围内,测量值均能很好地与理论值相符合,且相对偏差低于5%。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 折射率; 相对回波强度; 灵敏度

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Fluid Refractive-Index Sensor Base on Return Strength from Fiber End

SU Hui, HUANG Xu-guang, ZHAO Hua-wei

(Laboratory of Photonic Information Technology, School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract A new refractive index fiber sensor with simple operation, low cost and high sensitivity has been explored. The new refractive index fiber sensor is based on the principle of return strength modulation. A laser diode module and two optical power meters are used as the light source and photo-detectors, respectively. The relationship between relative return strength and refractive index is derived from the mechanism that the return loss from the end reflection interface of an optical fiber varies with the refractive index of the material contacted with the fiber. The relative return strength technology can improve measuring accuracy effectively and eliminate the measuring error resulted from the instability and internal loss of the instrument, as well as environmental effect. The sensitivity analysis of the sensor shows that the resolution of refractive index is 2×10^{-4} index-unit, with measurement precision of 0.01 dBm. It is found that the experimental data agree well with the theory values, and the relative error is smaller than 5% within the refractive index ranging from 1.30 to 1.45.

Key words fiber optics; fiber sensor; refractive index; relative return intensity; sensitivity

1 引言

物质的折射率是反映物质内部信息的一个基本物理参量。同时,折射率与其他的一些参量如温度、浓度密切相关,因而可通过测量折射率来间接测量这些相关参量。目前,测量折射率的方法有多种,其中比较有代表性的是布儒斯特角法^[1,2]、临界角

法或阿贝折光仪^[3]、椭偏仪^[4,5]、干涉法^[6,7]、最小偏向角法^[8,9]及 m-线波导测量法^[10]、光波导马赫-曾德尔(M-Z)干涉测量法^[11,12]、表面等离子体共振的反射传感技术^[13,14]、光纤光栅检测法^[15,16]等方法与技术。但是这些方法中,有的测量范围受限制,有的要求对被测样品进行复杂加工,有的仪器调整复杂,有

收稿日期:2006-04-20; 收到修改稿日期:2006-08-10

基金项目:广州市科技计划(2006J1-C0461)资助项目。

作者简介:苏辉(1983—),男,湖南益阳人,硕士研究生,主要从事光纤传感器的设计和研究。E-mail:suhuihn@163.com

导师简介:黄旭光(1962—),男,广西人,教授,硕士生导师,目前研究方向为微纳集成光通信器件和光纤传感技术。

E-mail:huangxg@scnu.edu.cn (通信作者)

的对使用环境苛刻,制造技术复杂,而且只有后三种适用于光纤传感。因此,研究可用于光纤的折射率测量的技术,成为研制实用可靠的光纤折射率传感器的关键所在。

本文基于界面反射光强对材料的折射率大小变化非常敏感的原理,采用双通道光纤端面反射式结构,推导出相对回波强度与折射率的理论关系,设计并实现了一种由半导体激光器、光功率计、光纤耦合器构成的、普通光纤 FC/PC 接头作为传感头的光传感系统。应用于液体折射率的检测表明,该装置测量范围大、灵敏度较高和操作方便。此外,还具有实时在线远程监测的能力,可用于测量强吸收不透明波段的介质折射率和探测折射率的空间分布。

2 实验装置和工作原理

如图 1 所示,该传感装置是在单通道传感器基础上发展而来的,由 2 个光纤传感头(一个监测待测液体,另一个监测空气),3 个光纤耦合器,半导体激光器和 2 个光功率计等组成。其中传感头为简单的端面垂直的裸光纤或者 FC/PC 接口。激光被分光比为 1:9 的耦合器 3 分成两路。其中占据 90% 的一路经过分光比为 1:1 的耦合器 1 进入探头 1,部分被反射和再分光后由光功率计 1 接收。类似地,另一路经过耦合器 2 进入探头 2,被反射、分光后由光功率计 2 接收。最后将光功率计 1 和 2 的数据采集进入计算机进行实时监控和分析(应特别注意消除耦合器 1 和 2 另一输出端口的回波信号)。

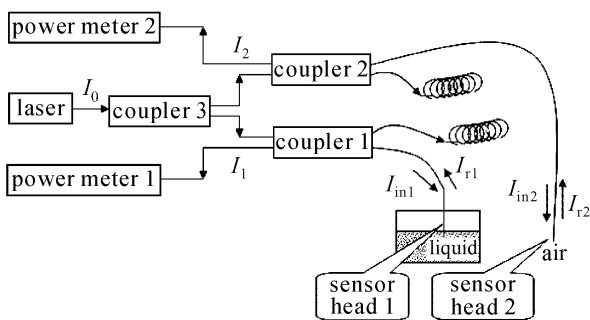


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

由菲涅耳 (Fresnel) 定律可知,光线垂直入射时,端面反射光强 I_r 与探头(端面)1 或 2 的入射光强 I_{in} 的关系为

$$I_r = I_{in} \left(\frac{n_c - n_x}{n_c + n_x} \right)^2, \quad (1)$$

式中 n_c, n_x 分别为光纤纤芯、待测液体的折射率, I_{in}

与激光器的输出光强 I_0 的关系为: $I_{in1} = k'_1 k_3 I_0, I_{in2} = k'_1 k'_3 I_0$ 。计及耦合器的光功率分配和损耗后,由 (1) 式可得功率计 1 的接收光强为

$$I_1 = k_1 \cdot I_{r1} = k_1 k'_1 k_3 I_0 \left(\frac{n_c - n_x}{n_c + n_x} \right)^2, \quad (2)$$

功率计 2 的接收光强为

$$I_2 = k_2 \cdot I_{r2} = k_2 k'_2 k'_3 I_0 \left(\frac{n_c - n_0}{n_c + n_0} \right)^2, \quad (3)$$

式中 n_0 为空气折射率, k_1, k'_1 和 k_2, k'_2 分别为耦合器 1, 2 直通和交叉出射的分光比, k_3, k'_3 为耦合器 3 的光强分光比(包含了耦合器的附加损耗)。如附加损耗可忽略,则 $k_1 + k'_1 = 1, k_2 + k'_2 = 1, k_3 + k'_3 = 1$ 。

根据光强 (dBm) 定义,待测液体与空气的相对回波强度

$$\Delta I = I_1 (\text{dBm}) - I_2 (\text{dBm}) = 10 \lg \frac{I_1 (\text{mW})}{I_2 (\text{mW})}, \quad (4)$$

式中 ΔI 单位为 dB。将 (2), (3) 式代入 (4) 式,可得

$$\Delta I = C + 10 \lg \left[\left(\frac{n_c - n_x}{n_c + n_x} \cdot \frac{n_c + n_0}{n_c - n_0} \right)^2 \right], \quad (5)$$

式中 $C = 10 \lg \left(\frac{k_3 k'_1 k_1}{k'_3 k'_2 k_2} \right)$ 为一常数,仅由系统中各耦合器的耦合系数决定。相对回波强度 $\Delta I = I_1 (\text{dBm}) - I_2 (\text{dBm})$ 与入射光强和外界条件无关,光源本身和外界引起的不稳定等影响均被该方法消除。因为温度、振动、压力等外界因素对光纤传输和测量的可能影响,将同时引起两条光路的变化。通过相对回波强度相除(或以 dBm 为单位的功率相减)计算处理,可以大部分抵消这些影响,从而降低测量误差和提高仪器测量稳定性。另一个可能的影响是探头传输光纤的弯曲问题。其中参考探头 2 用于监测空气,在实验中可以固定不动。对于测量探头 1,只要保持其传输光纤的曲率半径大于一定数值(如 10 cm),弯曲造成的辐射损耗影响就可降至最小从而可以忽略。此外,由于垂直入射时反射光强与偏振方向无关,振动、压力等外界环境对光纤偏振的影响不会对回波反射光强有任何影响。

对 (5) 式分析可知,若将探头 1 置于空气中,则有 $n_x = n_0$, 于是可得

$$C = I_1^{\text{air}} - I_2^{\text{air}}, \quad (6)$$

可见,不必测量各耦合器的耦合系数,只需实验前测得一组 I_1^{air} 和 I_2^{air} , 就可得到 C 值的大小。对于后面的每次折射率 n_x 测量,都将减去这个 C 值。这一步骤十分重要,它相当于仪器测量前的内部校准或调零,有利于降低测量误差、提高精确性。

3 实 验

实验采用蒸馏水、乙醇、丙酮、甲醇等多种样品, 实验温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 激光源波长为 1549 nm 。实验装置如图 1, 首先将探头 1 放置于空气中, 测得 $C = I_1^{\text{air}} - I_2^{\text{air}} = 11.06\text{ dB}$ 。为提高精度和减小探头因反复使用的影响, 可以在每次测量之前进行 C 值校准。然后用探头 1 测量各种样品的回波强度 I_1 , 同时用探头 2 测量空气的回波强度 I_2^{air} , 由 $\Delta I = I_1 - I_2^{\text{air}}$, 经计算机处理得到的实验数据列于表 1。

表 1 实验数据
Table 1 Experiment data

Sample	Refractive index	ΔI (dB)
Air	1.0000	11.06
Methanol	1.3290	-0.59
Water	1.3330	-0.83
Ethanol	1.3618	-3.29
Methane trichloride	1.4467	-19.04
Carbon tetrachloride	1.4607	-29.84
Glycerol	1.4730	-23.82
Carbon bisulfide	1.6276	-1.71

图 2 为 $\Delta I - n_x$ 曲线, 其中实线为理论曲线, 方框为实验测量值。从图中可以看出, 实验值能很好地符合理论值。为了提高灵敏度, 应该选用能使测量落在相对回波强度变化幅度大的 n_c 上。由于大部分液体的折射率都在 $1.3 \sim 1.7$ 之间, 只要采用标准单模光纤, 就能很好地满足测量需要。

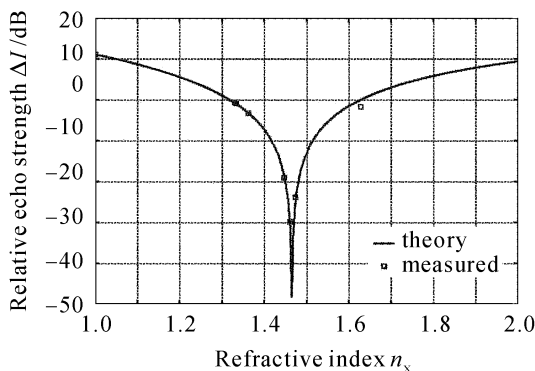


图 2 理论模型与实验数据比较

Fig. 2 Comparison of the theoretical profile with the measured data

在对不同量液体的测量中发现, 即使仅有极少量的液体, 只要注意避免液体与容器接触面反射的影响, 如使探头与该界面成较大的倾斜角, 就不会影响测量结果, 可见该传感器可用于微量液体的测量。

4 灵敏度、分辨率和双值问题的讨论

作为一种测量仪器, 灵敏度和分辨率是非常重要的参量。灵敏度 M 可定义为

$$M = \left| \frac{d(\Delta I)}{dn_x} \right| = \frac{1}{\lg 10} \cdot \frac{40n_c}{|n_x^2 - n_c^2|} \quad (7)$$

根据(7)式, 数值模拟计算可得, 在折射率 $n = 1.25 \sim 1.65$ 范围内, 其灵敏度 $> 50\text{ dB/折射率单位}$ (见图 3)。因此, 对于具有 0.01 dBm 的仪器测量精度, 相应的折射率分辨率可达 2×10^{-4} 折射率单位。从图 2 可以看出, 折射率非常接近的不同物质也可以通过该传感器分辨出来, 如实验中的甲醇和水的折射率只相差 0.004 , 而测得的相对回波强度相差有 0.24 dB , 灵敏度达到 60 dB/折射率单位 。

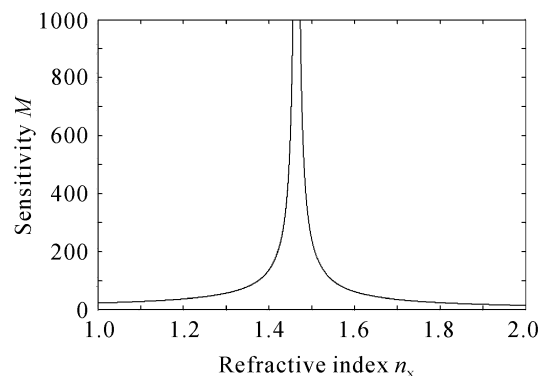


图 3 灵敏度与折射率的关系

Fig. 3 Relation between the degree of sensitivity and refractive index

最后, 根据(5)式, 对于一个测量值 ΔI , 存在着两个可能的 n 值(左支或右支曲线) 与之对应, 在一般情况下知道取哪一支的值。当出现 n 不确定问题时, 只需更换另一折射率 n_c 值不同的光纤探头, 再做一次测量就很容易判断出待测样品所对应的真实 n 值。

5 结 论

根据反射光强调制机制, 导出了相对回波强度与折射率之间的对应关系。据此设计了一种强度型光纤折射率传感器, 实验结果证实了其实用性和有效性, 表明了相对回波强度是减小误差影响的理想参量。该传感器除可用于一般性液体检测外, 还可对微量、危险液体进行监测。通过良好的接触, 还可应用于固体的折射率测量, 对于物体成分检测有很好的应用前景。由于该传感器的设计与实现基于光纤, 易集成于全光纤传感网络系统之中, 因此, 该光

纤型传感器具有易操作、精度较高、实时及可远程在线监控的特点,有利于产品的推广和商业化。

参 考 文 献

- 1 N. Kejalakshmy, K. Srinivasan. Simple method of Brewster-angle measurement for the determination of refractive indices in transparent biaxial crystal [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(11):2594~2597
- 2 Yin Xin, Zhang Huaqin. A simple method for measuring refractive indices of crystals-Brewster's angle method [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptic*, 1998, **20**(5):344~346
尹 鑫,张怀金. 测量晶体折射率的一种简单方法——布儒斯特角法[J]. *压电与声光*, 1998, **20**(5):344~346
- 3 J. R. Castrejón-Pita, A. Morales, R. Castrejón-García. Critical angle laser refractometer [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**:035101-1~035101-4
- 4 Chen Lan, Mo Dang. An overview and prospect on modern spectroscopic ellipsometry [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 1999, **16**(1):19~23
陈 篮,莫 党. 现代椭圆光谱学的回顾与展望[J]. *光谱实验室*, 1999, **16**(1):19~23
- 5 Sun Shunming, Zhang Liangying, Yao Xi. Principles of ellipsometry and its applications in the characterization of functional thin films [J]. *Piezoelectric & Acoustooptics*, 1998, **20**(3):209~213
孙顺明,张良莹,姚 熹. 椭圆技术的原理及其在功能薄膜表征中的应用[J]. *压电与声光*, 1998, **20**(3):209~213
- 6 C. H. Cho, J. Urquidi, Gregory I. Gellene *et al.*. Mixture model description of the T -, P dependence of the refractive index of water [J]. *J. Chem. Phys.*, 2001, **114**(7):3157~3162
- 7 Hao Dianzhong, Wu Fuquan, Kong Weijin. Measurement of refractive index of crystals with interferometry [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(5):407~408
郝殿中,吴福全,孔伟金. 干涉法测量晶体的折射率[J]. *激光技术*, 2003, **27**(5):407~408
- 8 M. Munoz Uribe, C. E. M. de Oliveira, J. H. Clerice *et al.*. Measurement of refractive index of GaSb (1.8 to 2.56 μm) using a prism [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(3):262~264
- 9 Zhou Tang, Zhang Daofan, Yang Huaguang *et al.*. Measurement of refractive index of the crystal with angle of minimum deviation method [J]. *J. Synthetic Crystals*, 1997, **26**(3-4):377
周 棠,张道范,杨华光等. 用棱镜最小偏向角法测量晶体折射率[J]. *人工晶体学报*, 1997, **26**(3-4):377
- 10 Huang Zuohua, He Zhenjiang. The optical methods for measuring the thickness and refractive index of thin films [J]. *Modern Scientific Instrument*, 2003, **4**(1):42~44
黄佐华,何振江. 测量薄膜厚度及其折射率的光学方法[J]. *现代科学仪器*, 2003, **4**(1):42~44
- 11 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. 用光纤迈克尔逊干涉仪测量折射率[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9):1294~1296
- 12 Chu Fenghong, Han Xiyou, Pang Fufei *et al.*. Research development of integrated-optical waveguide sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(3):21~27
初凤红,韩秀友,庞拂飞等. 集成光波导传感器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(3):21~27
- 13 Kyung Hun Yoon, Michael L. Shuler, Sung June Kim. Design optimization of nano-grating surface plasmon resonance sensors [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(1):4842~4849
- 14 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, **A29**(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, **A29**(6):545~549
- 15 Rao Yunjiang, 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
- 16 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Song Shide. Experimental study on concentration sensor based on long-period fiber grating with single head [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, **18**(3):653~656
关寿华,于清旭,宋世德. 基于单端长周期光纤光栅的浓度传感器[J]. *传感技术学报*, 2005, **18**(3):653~656