

文章编号: 0253-2239(2010)05-1245-04

蘸粘式光纤液体分析仪的折射率传感特性研究

周 爱 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 提出了一种测量液体折射率的光纤液体分析仪。利用液体表面张力的作用,在光纤探头端形成一个液滴。该液滴的作用相当于一个平凸透镜,发射光纤出射的光经液滴表面折射、未扰液面的反射和液滴表面的再次折射后进入接收光纤。根据菲涅耳公式,光线在各个界面的透射系数和反射系数与液体的折射率有关,且对于不同的液体,光线的传输路径不同。基于球面折射成像和反射式强度调制原理,分析了光线的传输路径,并建立了接收光纤接收到的光强与液体折射率的关系模型。对不同浓度的 NaCl 溶液进行了测量,实验结果符合理论预期,表明该方法可以用于液体折射率的测量。

关键词 光纤光学;光纤传感;折射率;强度调制

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1245

Study on Refractive Index Sensing Characteristics of Fiber-Optic Dipping Liquid Analyzer

Zhou Ai Yuan Libo

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A novel method for measuring refractive index of liquids based on a liquid drop formed at the end of fiber sensing probe is reported. The effect of the drop is like a plane-convex lens whose refractive index equals to that of the tested liquid. The light from transmitting fiber successively experiences refraction of the liquid drop to air interface, the air to liquid drop plane interface and the air to liquid drop, and is finally collected by the receiving fiber. According to Fresnel's formula, the transmission coefficient and reflection coefficient at these interfaces depends on the refractive index of the tested liquid. Based on spherical refraction imaging and reflective intensity modulation, the light transmission path is analyzed, and the mathematical mode between the intensity of the collected light and refractive index is set up. NaCl solutions with different concentrations are tested. The experimental results indicate that the method can be used for measuring the refractive index of the liquid.

Key words fiber optics; fiber optic sensing; refractive index; intensity modulation

1 引 言

光纤传感器由于其灵敏度高、尺寸小和抗电磁干扰等优点,在液体的折射率测量中得到广泛研究和应用。目前主要的研究方法包括:基于波导弯曲损耗^[1,2]、表面等离子体波^[3,4]、光纤法布里-珀罗(F-P)干涉^[5,6]、光纤布拉格光栅(FBG)^[7~9]、光子晶体光纤(PCF)^[10]和塑料光纤^[11]的折射率传感器。这些方法大都需要对传感光纤进行特殊处理,并需要

光谱分析仪等昂贵的检测仪器,成本较高,且不利于在线监测。

本文提出了一种简单的测量液体折射率的方法。该方法通过在光纤探头端形成一液滴,该液滴可看作折射率等于被测液体折射率的平凸透镜。根据透镜球面折射成像原理,互相平行的发射光纤与接收光纤经液滴成像后,两光纤的像之间存在一定的角度,且该角度与液滴的折射率有关。同时考虑

收稿日期: 2009-05-11; 收到修改稿日期: 2009-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(60577005, 60707013, 60877046, 60807032)资助课题。

作者简介: 周 爱(1981—),女,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zhouaipost@hotmail.com

导师简介: 苑立波(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤技术方面的研究。E-mail: lbyuan@vip.sina.com

到从液滴出射的光经未扰液面反射后一部分光再次经液滴后被接收光纤接收,依据互成角度的双光纤反射式强度调制原理来分析,从而得到接收光强与被测液体的折射率之间的关系。该方法具有传感单元结构简单、测量范围不受光纤本身折射率的限制,且能够实时在线监测等优点。

2 传感器的基本原理

蘸粘式光纤液体分析仪(Fiber optic dipping liquid analyzer,FDLA)是本文提出的一种新型的用于液体分析的光纤传感器,其传感信号包含了液体的浓度、折射率、表面张力、接触角和粘滞系数等信息。光纤探头的结构如图1所示。两根标准的单模光纤平行地封装在一金属管内。通过控制光纤传感探头的上下往复运动,使光纤探头与被测液体重复地接触和分离。在探头离开被测液体的瞬间,由于表面张力的作用,一部分液体粘附在光纤探头端面并形成液滴。该液滴相当于在光纤探头的端面粘附一个平凸透镜,那么发射光纤(TF)和接收光纤(RF)经液滴折射后会在液滴内部形成放大的虚像,

且两光纤的像成一定角度,该角度与液滴的折射率有关。同时,被测液体表面可以看作是一反射平面,从液滴出射的光经反射后部分光再次经过液滴到达接收光纤,且接收到的光信号与被测液体的折射率有关。因此,该过程可以利用互成角度的双光纤反射式强度调制模型来分析。图2给出了利用FDLA得到的10%酒精溶液的信号。其中第一个峰是在探头向下移近被测液体的过程中形成的,它反映了被测液体的折射率信息,称为折射峰。

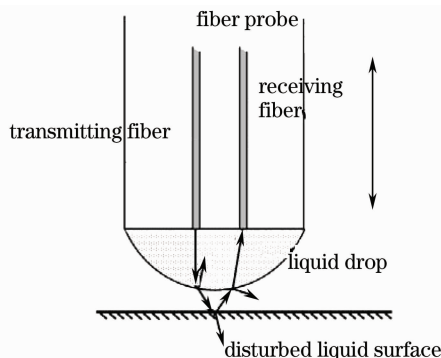


图1 液滴在FDLA的探头示意图

Fig. 1 Schematic diagram of liquid drop at FDLA probe

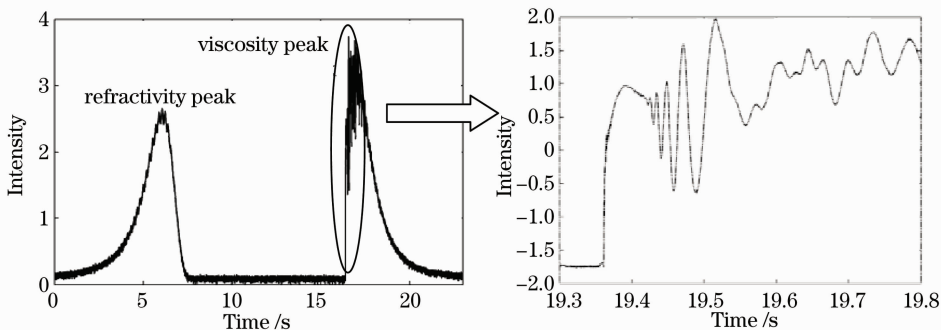


图2 10%酒精溶液的信号

Fig. 2 Signal of 10% alcohol-water solution

另外,在被测液体脱离光纤探头的瞬间,液体表面分子不断地快速重新排布,从而使液体表面形状发生快速的变化,进而接收到的光信号也随之快速变化。且当液体脱落后,被测液体表面会上下震颤,这些变化都会体现在第二个峰(粘滞峰)的高频细节信号中。对这些细节信息在频域中分析,并与折射峰进行比较,便可达到被测液体的粘滞系数和表面张力的信息。

除了可以通过折射峰的变化来分析液体的折射率信息,还可以利用FDLA对液体的表面张力、接触角和粘滞系数进行测量,将在后文中给出。

将光纤探头端的液滴看作一平凸透镜,那么相互平行的发射光纤和接收光纤经该透镜成像后,两

个像之间存在一个夹角 α 。由于透镜的折射率等于被测液体的折射率,所以角 α 的大小受液体的折射率影响。另外,未扰液面可以看作一反射面,那么该问题可以简化为互成角度的双光纤反射式强度调制模型。发射光纤与接收光纤经透镜的折射成像和未扰液面的反射成像的示意图如图3所示。

此外,发射光纤出射的光经液滴表面折射、未扰液面的反射和液滴表面的再次折射后进入接收光纤。根据菲涅耳方程,光线在这三处界面的透射系数和反射系数与被测液体的折射率有关。因此令出射光线经历的第一个界面的透射系数为 $T_1(n)$,第二个界面的反射系数为 $R_2(n)$,第三个界面的透射系数为 $T_3(n)$ 。考虑到接收光纤纤芯直径很小,可将

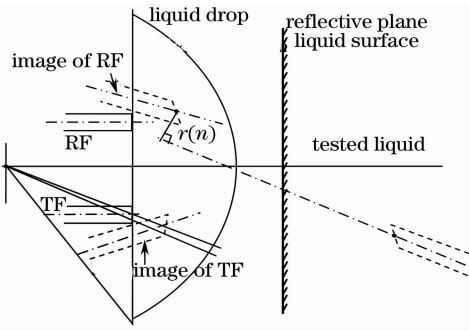


图 3 发射光纤与接收光纤的成像示意图

Fig. 3 Schematic diagram of imaging of the transmitting fiber and the receiving fiber

光纤端面的光强近似看作平均分布,等于纤芯处的

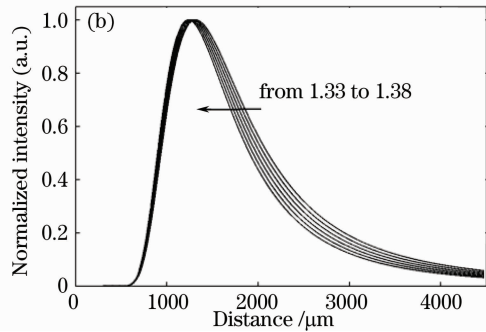
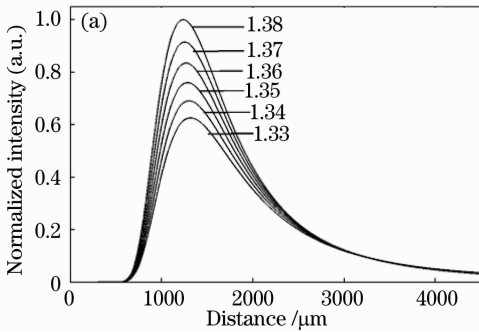


图 4 仿真的特性曲线。(a)按峰高表示;(b)按峰宽表示

Fig. 4 Simulated characteristic curves. (a) expressed by peak height; (b) expressed by peak width

3 实验结果及分析

为了检验 FDLA 对折射率测量可行性,采用不同浓度的 NaCl 溶液进行测量。以峰高表示的归一化特性曲线如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,实验曲线与图 4(a)的理论曲线的趋势相同。峰高随 NaCl 溶液浓度的增加而增大。溶液的折射率由阿贝折射仪测定。峰高与折

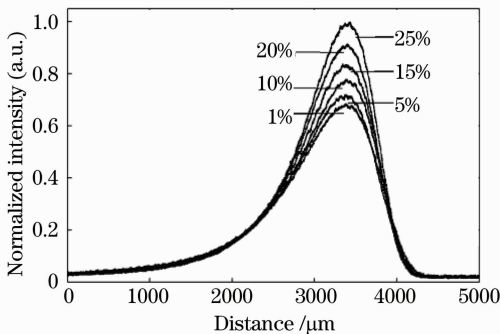


图 5 以峰值高度表示的 NaCl 溶液的特性曲线

Fig. 5 Characteristic curves of NaCl solutions expressed by peak height

光强,那么接收光纤接收到的光功率可以表示为

$$P = T_1(n) \cdot R_2(n) \cdot T_3(n) \cdot I[r(n), z] \cdot \pi a_{\text{eff}}^2,$$

式中 $I[r(n), z]$ 为发射光纤经液滴成像后的纤端光场分布, r 为接收光纤的纤芯中心的像到发射光纤的像的轴线的距离,该距离也与液体的折射率有关, z 为光纤探头与反射面之间的距离, a_{eff} 为接收光纤的像的有效半径。

从上式可以看出接收到的光功率与被测液体的折射率有关。由上式得到的接收光功率的特性曲线如图 4 所示。图 4(a)是按峰值高度表示的特性曲线,曲线的峰高随被测液体折射率的增加而增大;图 4(b)是峰高归一化后按峰的半峰全宽表示的特性曲线,曲线的宽度随折射率的增加而变小。

射率的关系如图 6 所示。星号表示测量数据,虚线是测量数据的二次多项式拟和曲线。从图中可以看出,特性曲线的峰高与折射率具有良好的对应关系。在实际应用中,对标准溶液标定后,可以通过特性曲线的峰高得到被测液体的折射率。

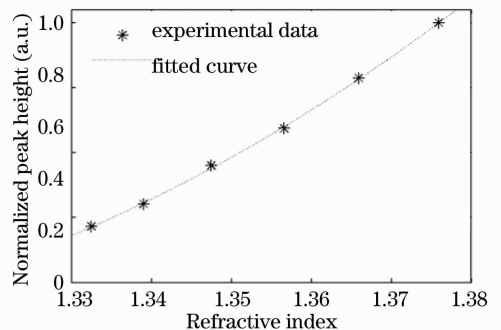


图 6 峰值高度与折射率的关系

Fig. 6 Peak height versus refractive index

直接利用特性曲线的峰高表征液体的折射率,具有分析简单、快速的优点。但是其实验结果直接与接收到的测量信号强度有关,测量结果容易受光源波动和传输光纤的弯曲损耗影响,从而影响测量

结果的精度。这个问题可以通过对测量曲线进行归一化处理加以解决。将不同浓度的信号分别进行归一化处理,使他们的峰高相同。归一化后的曲线图如图 7 所示。

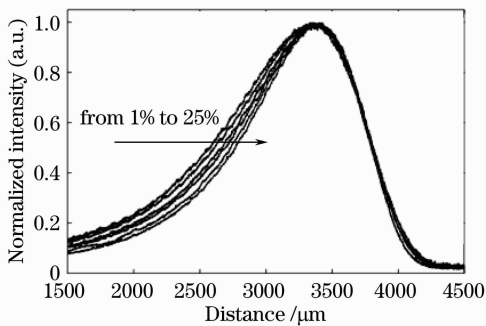


图 7 以曲线宽度表示的 NaCl 溶液的特性曲线

Fig. 7 Characteristic curves of NaCl solutions expressed by peak width

图 7 中,曲线的宽度随着射率的增加而减小,这与理论曲线图 4(b)一致。曲线宽度与折射率的关系曲线如图 8 所示。星号表示测量数据,虚线是测量数据的二次多项式拟合曲线。从拟合曲线中,通过分析信号的峰宽可得到被测液体的折射率。

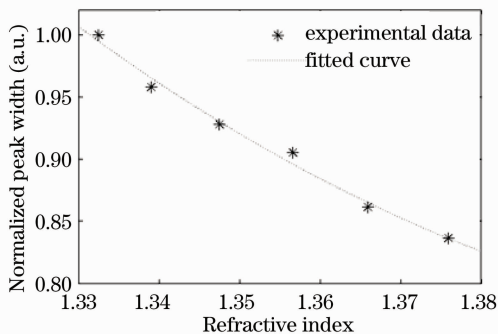


图 8 峰值宽度与折射率的关系

Fig. 8 Peak width versus refractive index

4 结 论

从理论和实验两方面讨论了基于 FDLA 的测量折射率的方法。实验结果与理论仿真结果一致,

特性曲线的峰值高度和半峰全宽与折射率的关系之间存在单调的对应关系,结果表明 FDLA 可以用于液体折射率的测量。

参 考 文 献

- 1 G. J. Veldhuis, P. V. Lambeck. Highly-sensitive passive integrated optical spiral-shaped waveguide refractometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(20): 2895~2897
- 2 G. J. Veldhuis, L. E. W. van der Veen, P. V. Lambeck. Integrated optical refractometer based on waveguide bend loss [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5): 857~864
- 3 Zeng Jie, Liang Dakai, Zeng Zhenwu *et al.*. Reflective 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
- 4 Lü Qiang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua *et al.*. Sensitivity of surface plasma resonance sensor for different wavelengths [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 972~976
吕强, 黄德修, 元秀华等. 不同波长下表面等离子体共振传感器的灵敏度[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 972~976
- 5 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Pérot fiber-optic refractive-index sensor based on laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1400~1404
刘为俊, 饶云江, 冉曾令等. 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1400~1404
- 6 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
- 7 Miao Yinping, Liu Bo, Zhao Qida. Refractive index sensing characteristic of tilted fiber Bragg gratings with different cladding-diameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2072~2076
苗银萍, 刘波, 赵启大. 不同包层直径的倾斜光纤光栅折射率传感特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2072~2076
- 8 O. Frazão, T. Martynkien, J. M. Baptista *et al.*. Optical refractometer based on a birefringent Bragg grating written in an H-shaped fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(1): 76~78
- 9 Yun Bin Feng, Chen Na, Cui Yiping. Refractive index sensing characteristics of fiber Bragg grating based on cladding mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1013~1015
恽斌峰, 陈娜, 崔一平. 基于包层模的光纤布拉格光栅折射率传感特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1013~1015
- 10 V. P. Minkovich, J. Villatoro, D. Monzón-Hernández *et al.*. Holey fiber tapers with resonance transmission for high-resolution refractive index sensing [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7609~7614
- 11 P. Nath, H. K. Singh, P. Datta *et al.*. All-fiber optic sensor for measurement of liquid refractive index [J]. *Sens. Actuator A*, 2008, **148**(1): 16~18