

# 利用折射光场分析液滴中光传播规律

孙伟民 王小力 张志林 万众 刘强 郭明磊

(哈尔滨工程大学理学院光信息科学与技术系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 为了保证液滴分析技术的重复性和可靠性, 必须对光在液滴中的传播规律有更为深入的了解。设计并制作了三套不同方位的实验系统, 以纯净水作为实验样品, 分别拍摄了自液滴中向三个方向的折射光场分布。通过分析折射光线分布, 并利用光纤出射光场的实验规律, 进一步得出光在液滴中的传播轨迹, 解释了光纤液滴指纹图中峰值形成过程。实验结果表明, 光纤液滴指纹图中不同的特征峰值所对应的光在液滴中的传播模式是不同的。

**关键词** 应用光学; 光传播; 折射光场; 传感器设计; 光纤液滴指纹图

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082807.1257

## Study on Propagation of Light Inside Liquid Drop

Sun Weimin Wang Xiaoli Zhang Zhilin Wan Zhong Liu Qiang Guo Minglei

(Department of Optical Science and Technology, College of Science, Harbin Engineering University,  
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** To guarantee the consistency and reliability of the fiber drop analysis technique, it is important to understand the propagation of light inside the liquid drop in detail. Three experimental systems in different directions were designed and fabricated. Pure water was chosen as the experimental sample. The light fields of refracted light in three directions from the liquid drops were monitored. Through analyzing the distribution of the refracted light and the experimental law of output light-field from fibers, the transmission traces and the propagation law of the light inside the liquid drops were proposed. The forming process of peaks of fiber fingerprint drop traces (FFDT) was explained. The experimental results show that different peaks of FFDT correspond with different transmission modes of light inside the liquid drop.

**Key words** applied optics; propagation of light; refracted light field; design of sensors; fiber fingerprint drop trace

## 1 引 言

利用光学手段进行液体特性测试具有很多方法, 如基于表面等离子体波共振 (SPR) 光谱分析法<sup>[1]</sup>、基于法布里-珀罗干涉仪的液体浓度实时检测法<sup>[2]</sup>、基于位置敏感器件的光学盐度检测技术<sup>[3]</sup>、基于拉锥技术的油类测试技术<sup>[4]</sup>和利用多层结构等离子体液体测量方法<sup>[5]</sup>等。光纤液滴检测技术是自 20 世纪 90 年代开始发展起来的一种液体参量检测方法<sup>[4]</sup>, 利用光纤作为传光手段, 将光信号注入一个流经细管下落的液滴之中, 再利用另一根光纤接收经液滴反射、散射、吸收后的光信号, 经光电转换后送入计算机, 进而分析液滴的形成、变化、分离过程,

得到反映该液体参量性质的“光纤液滴指纹图”(FFDT)。液滴分析技术发展至今, 已经出现了许多不同的液滴头设计方案, 当然也采用了不同的分析手段, 推动了液滴分析技术的发展<sup>[6-11]</sup>。由于液滴在下落过程中的形状不断变化, 液滴中的光线所走的光程、反射的次数、反射率等参量均不断发生变化, 为了保证这种分析技术的重复性和可靠性, 必须更为深入地了解光在液滴中的传播规律。本研究小组在分析了多种液体的光纤液滴指纹图<sup>[12,13]</sup>的基础上, 开展了对光在液滴中传播规律的研究<sup>[14,15]</sup>。

在实验中发现, 光纤液滴指纹图的形状与光纤液滴形状之间的关系很微妙。在对某白酒样品的光

收稿日期: 2007-12-10; 收到修改稿日期: 2008-01-02

基金项目: 哈尔滨市青年基金(2003AFQXJ054)和哈尔滨工程大学基础研究基金(33)资助课题。

作者简介: 孙伟民(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学传感器及光学技术等方面的研究。

E-mail: weimin\_sun2003@yahoo.com.cn

纤液滴指纹图与拍摄的液滴形状对比发现,在液滴指纹图后段张力峰出现的部分,是液滴形状变化较为缓慢的部分,但此时光纤液滴指纹图的变化最为剧烈。而相对而言,在光纤液滴指纹图的前半段,虽然液滴从无到有,但指纹图等变化比较平缓。这个结果促使我们开展了对液滴形状与光纤液滴指纹图的对比研究,以增强对光纤液滴指纹图的理解。

## 2 光场测试系统

光纤液滴传感头具有多种不同设计方案,但基本原理都是利用光纤将光线输入液滴,再利用光纤将经过液滴反射、散射和吸收后的光场进行采集,得到与液体物理、化学性质有关的光纤液滴指纹图。

考虑到无法直接对液滴中的光场进行测试,故主要对折射光场进行测量。由于入射光纤进入液滴的光具有一定的发散角,当光传播到液体与空气的界面时会发生部分反射或全反射。当发生部分反射时,在空气中可接收到折射光场。通过对折射光场的分析可对光在液滴中的传播规律进行了解。为了全面了解由液滴出射的折射光场,实验中设计了三套探测方案,分别探测由液滴底部、靠近入射光纤的侧面和靠近出射光纤的侧面的折射光场。

液滴底部光场的探测系统结构如图 1 所示,其中液滴传感头采用了平头直插式。650 nm 半导体激光器发出的红光经 0.75 mm 直径的大孔径塑料

光纤入射液滴,在液滴中经过反射、散射、吸收后部分进入出射光纤,被出射光纤末端的光电探测器接收,经过光电转换、滤波放大后,由数据采集系统(DAQ)送入计算机处理。采集到的随液滴生长过程而变化的光强信号,即为光纤液滴指纹图。而从液滴底部折射出来的光场部分经以  $45^\circ$  角放置的中央带 15 mm 直径圆孔的 100 mm $\times$ 100 mm 平面镜反射,再经成像透镜汇聚后,被 CCD 接收送入计算机。

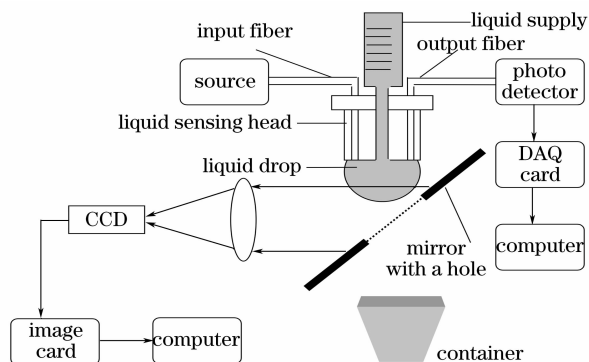


图 1 液滴底部折射光场探测系统

Fig. 1 Detection system of refracted light-field at bottom of the liquid drop

由于在实验中发现,从液滴中出射的折射光线更多地是位于液滴的靠近入射光纤和出射光纤的两侧,因此又设计了如图 2 所示的液滴侧面折射光场探测系统。在进行侧面光场拍摄过程中,使用了散射度较高的漫反射屏,并利用针尖等物品进行了辅助对焦。

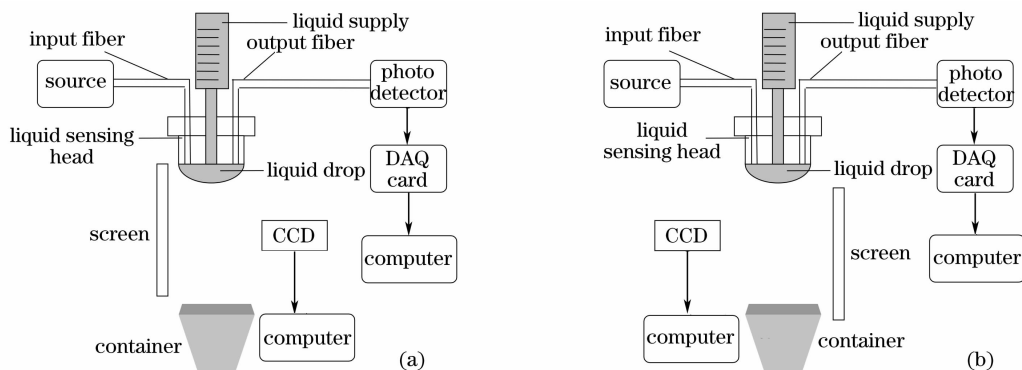


图 2 液滴侧面折射光场探测系统。(a)显示屏在入射光纤侧面,(b)显示屏在出射光纤侧面

Fig. 2 Detection system of refracted light-field at both sides of the liquid drop. (a) Screen near the input fiber side, (b) screen near the output fiber side

## 3 实验测试结果

实验利用图 1、图 2 所示系统分别对纯净水样品进行了测试。

利用图 1 的实验系统得到了纯净水液滴底部折射光场图片,如图 3 所示,该过程显示在液滴形成的

前期[图 3(a)~图 3(c)],从液滴下部折射出来的光强较弱,从液滴底部直接反射回出射光纤的光线较少,出射光纤收到的主要是经过液滴侧面多次反射的大角度入射光线。在液滴变饱满到下落的过程中,液滴尺度增大,下部折射光线迅速增强,对应的

底部反射光线也迅速增加,从而使出射光纤接收到较强的小角度入射光线,因此出现了强度迅速增加的张力峰。

对图 3 进行软件处理,将各图片中所有点的强度累加作为该时刻的等效折射光强度,得到底部折射光场强度随时间的变化曲线,并与对应的光纤液滴指纹图进行对照,如图 4 所示。可见,折射光强整个曲线呈现的趋势是先下降后上升,下降的过程比较长,幅度变化较慢,而上升到峰值却是很短的一瞬间。底部折射光场最强出现在一个液滴周期的末端,即液滴马上滴下的那一瞬间,也就是只有在这时才会有很强的光从液滴底部折射出。根据菲涅耳折射、反射公式,说明此时由入射光纤进入液滴的光中有比例较大的部分到达液滴底部,因入射角小于液体与空气的全反射角而被折射出。

利用图 2 所示系统采集到的图如图 5 所示,可

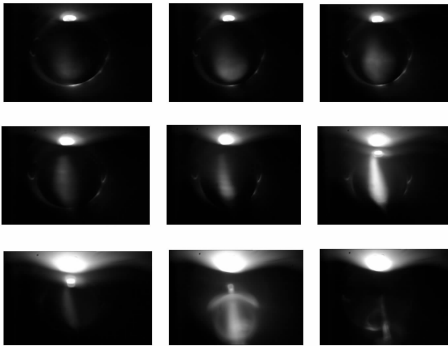


图 3 实验采集到的水底部折射光场变化图片

Fig. 3 Refracted light-field from bottom of the liquid drop observed in experiments

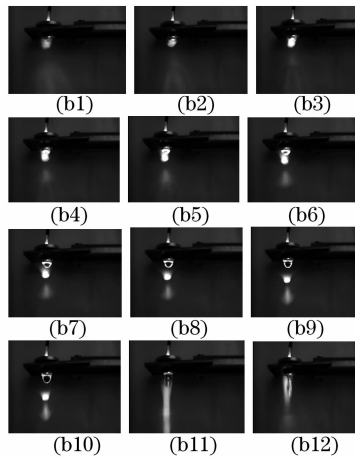
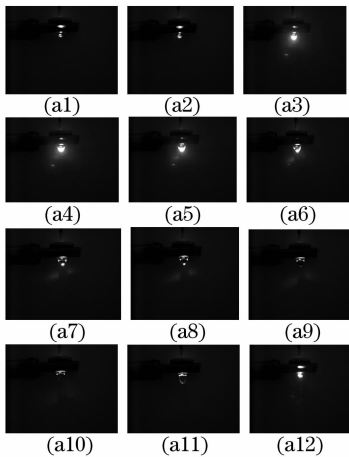


图 5 侧面光场变化图。(a)显示屏在入射光纤侧面,(b)显示屏在输出光纤侧面

Fig. 5 Pictures of the refracted light-field from sides of the liquid drop. (a) Screen near the input fiber side, (b) screen near the output fiber side

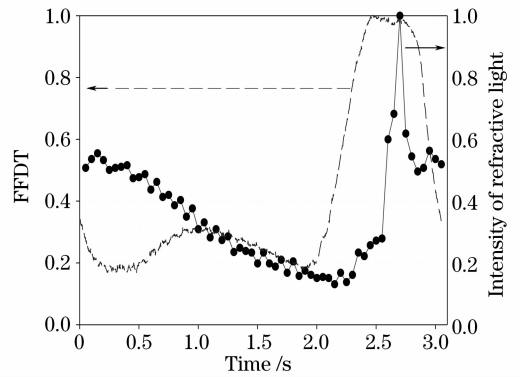


图 4 折射光场强度与对应的光纤液滴指纹图

Fig. 4 FFDT and the intensity of the refracted light-field seen in the liquid drop side near the input fiber and the output fiber side. The refracted light field has a significant difference.

图 5(a)中,靠近入射光纤一侧出现了三幅液滴本身较明亮的图[(a<sub>3</sub>)~(a<sub>5</sub>)],但在接收屏幕上的折射光强就弱得多。经分析,这里的折射光场是由于入射光纤发出的光一次到达反射界面后,其中很少一部分入射角小于全反射角的光折射出来形成的。在液滴形成初期,只有经过多次反射,才会有部分光线到达出射光纤一侧,能量明显降低。相应的光纤液滴指纹图中在该阶段只会出现如彩虹峰一类的较弱的峰值信号。

图 5(b)中,靠近出射光纤一侧的光场变化却很明显,在接收屏上一直能观察到比较强的光斑,而且随着液滴的生长,光斑的位置也在向下运动。其中(b<sub>3</sub>)~(b<sub>5</sub>)明亮的光斑图样正好对应于图 5(a)中液滴本身较为明亮的(a<sub>3</sub>)~(a<sub>5</sub>)图,说明此时光正好沿该方向折射到空气中。

由图 5 可见,在液滴由小变大的过程中,由入射光纤发出的光线在同侧的反射点不断下移,从液滴折射出的光线的出射角度从侧面向底部移动,逐步过渡到以底部反射为主,而对应的光纤液滴指纹图也从较弱的彩虹峰向较强的张力峰过渡。

实验中将利用摄像机在垂直于图 1、图 2 的纸面方向对下落的液滴进行了拍摄,并对拍摄的液滴图像进行了边缘提取,利用几何光学的知识进行了光线追迹分析。对于一个完整液滴周期中的几种典型状态,分别绘制了如图 6 的光线追迹图。可见,在液滴形成的初期,到达出射光纤的均是液滴侧面的多次反射光,形成的是强度较低的彩虹峰。当液滴形成后期部分小角度光线(相对于入射光纤的轴心方向)经过一次反射以较小的入射角进入出射光纤,这时对应的光强是光纤液滴指纹图中最高的张力峰。

图 6 显示的光线在液滴中传播的过程与图 3、图 5 的实验结果是一致的。在出射光纤一侧的接收屏上可见,从液滴中折射出来的光斑正是先向下方移动(对应液滴形成过程),再迅速地拉长消失(对应液滴分离过程)。在入射光纤一侧,液滴在早期较亮(对应折射光线从液滴中射向摄像头),在最后时刻再次变亮(折射光线再次从液滴中射向摄像头)。

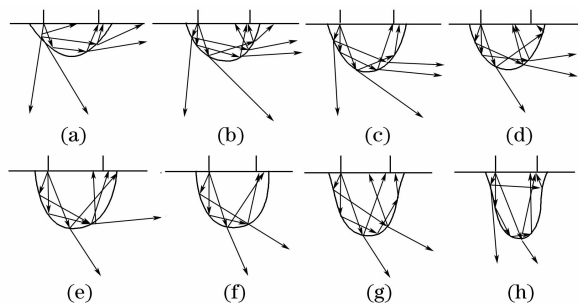


图 6 光在液滴中传播过程示意图片

Fig. 6 Sketch map of the propagation of light inside the liquid drop

根据文献[15],从塑料光纤出射的光场接近高斯光束,光强随偏离光纤轴心角度变大而逐渐变弱。在液体中由于液体折射率比空气大很多,在液滴中的光束张角会比文献[15]中的测试结果小。因此在液滴较小时,即使是从入射光纤进入液滴的光场的边缘光线,也无法经过一次反射进入出射光纤,只有部分经过两次以上反射的光线可进入出射光纤,得到彩虹峰等较弱的光强。而当液滴成长到一定阶段时,部分张角较小、强度较大的光线可以经过液滴端部的一次反射进入出射光纤,出射光纤接收光强达到极大值。然后,随着液滴的进一步长大,在液滴靠

近传感头的基部发生分离,光强迅速下降。

## 4 结 论

利用折射光场对光在液滴中的传播过程进行分析,结果表明,光纤液滴指纹图中不同的特征峰值对应光在液滴中的传播模式是不同的。对应彩虹峰主要是多次折射的光线以较大入射角度进入出射光纤,如果出射光纤过细,这部分光线将很难在其中传播。而对于大口径的塑料光纤,这部分光信号还比较强。对应张力峰,主要是在液滴生长到一定阶段后,部分小张角光线经过一次反射,以较小的入射角度进入出射光纤。

为了使张力峰、彩虹峰等特征峰值更加明显,需要能够形成稳定而又饱满的液滴现状。液滴头的尺寸非常重要,液滴头过小则液滴不易饱满,设计、加工也很困难;液滴头过大则液滴性质不稳定,易受环境干扰。选用不同的液滴头设计方案可以得到不同特征的光纤液滴指纹图,说明了液滴头形状特征对光纤液滴指纹图的影响。选用不同的光纤型号及采用不同的工作波长等因素也会对得到的指纹图产生影响,但同时也会增加可以利用的敏感参量。

## 参 考 文 献

- 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波共振传感器特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 404~409
- Yang Xiufang, Wang Xiaoming, Gao Zonghai *et al.*. Research on liquid concentration real-time detecting system based on Fabry-Pérot interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1343~1346  
杨秀芳,王小明,高宗海等. 基于法布里-珀罗干涉仪的液体浓度实时检测系统的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1343~1346
- Zhao Yong, Zhang Bo, Liao Yanbiao. Salinity measurement based on position sensitive detector and optical technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1379~1383  
赵勇,张博,廖延彪等. 基于位置敏感器件的光学法盐度检测技术研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1379~1383
- Zhang Na, Feng Xia. Using of fiber optical sensor to measure liquid parameters[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 67~71  
张娜,冯霞. 光纤传感器在液体参量测量中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 67~71
- Zeng Jie, Liang Dakai, Du Yan *et al.*. Quasi-distributed optical fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **33**(2): 243~248  
曾捷,梁大开,杜艳等. 准分布式光纤表面等离子体波传感器[J]. *中国激光*, 2007, **33**(2): 243~248
- N. D. McMillan, O. Finlayson, F. Fortune *et al.*. The fiber drop analyser: a new multianalyser analytical instrument with applications in sugar processing and for the analysis of pure liquids[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1992, **3**(8): 746~764

- 7 K. Tiernan, D. Kennedy, N. McMillan. Tensiography instrumentation for measuring liquid material properties [J]. *Materials & Design*, 2005, **26**(3): 197~201
- 8 N. D. McMillan, V. Lawlor, J. Nolan *et al.*. The application of the tensiograph D-functions to quality control in whiskey manufacture[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1998, **143**: 421~427
- 9 N. D. McMillan, P. Davern, V. Lawlor *et al.*. The instrumental engineering of a polymer fibre drop analyser for both quantitative and qualitative analysis with special reference to fingerprinting liquids [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1996, **114**: 75~97
- 10 Song Qing, Zhang Guoxiong, Qiu Zurong *et al.*. Normalization and characterization of the liquid drop fingerprint[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2005, **26**(1): 45~47  
宋 晴, 张国雄, 裘祖荣 等. 液滴指纹图的归一化处理 and 特征提取[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **26**(1): 45~47
- 11 Song Qing, Zhang Guoxiong, Qiu Zurong. Liquid identification based on waveform analysis of liquid drop fingerprint [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(4): 19~23  
宋 晴, 张国雄, 裘祖荣. 基于液滴指纹图波形分析的液体识别方法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(4): 19~23
- 12 Liu Qiang, Sun Weimin, Li Yingjuan *et al.*. Liquid testing using fiber drop sensors[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 65~66  
刘 强, 孙伟民, 李颖娟 等. 应用光纤液滴传感器进行液体测试[J]. *光学技术*, 2006, **32**(1): 65~66, 70
- 13 Sun Weimin, Li Xiaomei, Zeng Youmin *et al.*. The application of cross-correlation analysis in the fiber fingerprint drop trace[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 2033~2036  
孙伟民, 李小梅, 曾佑民 等. 互相关法在光纤液滴指纹图分析中的应用[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 2033~2036
- 14 W. M. Sun, Q. Liu, L. Zhao *et al.*. Analyse of the reflection of a micro drop fiber sensor[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5633**: 201~210
- 15 Li Yingjuan, Sun Weimin, Wang Xiaoli *et al.*. Test results and analysis of the fiber end optical field in plastic optical fiber[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, **4**(2): 46~49  
李颖娟, 孙伟民, 王小力 等. 塑料光纤纤端光场测试结果及分析[J]. *光学与光电技术*, 2006, **4**(2): 46~49