

基于分光棱镜干涉法测量透明液体折射率

罗文全 冯国英 杜永兆

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要 折射率是研究液体激光热效应必不可少的参数。干涉法是测量折射率的常用方法,但传统干涉仪稳定性较差,针对这点提出了一种基于分光棱镜干涉的单元件干涉光路并将其用于测量透明液体折射率。这种方法使用光学元件少、稳定性强且操作简单,运用 CCD 作为观测分析工具,测量精度能够达到 10^{-4} 量级,为探索新型液体的折射率提供了一种有效手段。讨论了测量的基本原理并给出样品的测量结果,同时对实验方法的误差进行了分析。比较了迈克耳孙干涉光路和单元件干涉光路的稳定性,实验结果表明单元件干涉光路的稳定性较好。

关键词 测量;折射率;图像处理;分光棱镜

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0508005

Refraction Index Measurement of Transparent Liquid by Single-Element Interferometer

Luo Wenquan Feng Guoying Du Yongzhao

(Department of Opt-Electronic, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Refraction index is one of the most important parameters in investigating the thermal effect of liquid laser. Interferometer technique is one of the most common types of the refraction index measurement, but it is sensitive to disturbances. An experimental method for the refraction index measurement of transparent liquid is presented, based on the single-element interferometer. The interference pattern is captured by a CCD camera. The method is simple as well as stable, which can be easily interpreted geometrically. The accuracy of the refractive index measurement is of the order of 10^{-4} . Compared to the Michelson interferometer, it replies that the stability of the single-element interferometer is better than the typical interferometer's.

Key words measurement; refraction index; image processing; beam-splitter cube

OCIS codes 290.3030; 100.2000; 230.1360

1 引 言

折射率是材料的基本物理参数之一,折射率的精确测量在物理学、化学及工业应用上有重要的意义。特别是在液体激光器中,液体折射率是计算激光器热焦距必不可少的参数。在各种测量折射率的方法中,有的是利用最小偏转角法或临界角法^[1]来实现,有的是利用光斑移动法^[2]来测量,有的是通过转角法^[3]或菲涅耳衍射^[4]等来完成的。还有利用干涉法^[5]如马赫-曾德尔干涉仪法^[6,7]、法布里-珀罗干涉仪法^[8]、迈克耳孙干涉仪法^[9]等来实现。近年来,

还有一些新的测量方法如毛细管焦点法^[10~12]、液芯变焦柱透镜法^[13]及基于多模干涉和长周期光纤光栅的光纤传感器法^[14]等。但是这些方法存在局限性,最小偏转角法折射率的测量范围受限制;临界角法需要足够大尺寸的试件,且试件必须加工成一定精度的三棱镜,使实验重复性差;光斑移动法在测量液体时,需要分别测量空样品池时和装有待测液体时的光斑移动,否则就必须知道样品池壁的参数;菲涅耳衍射法实验简单但计算过程复杂;传统干涉法的稳定性较差,对扰动较敏感;毛细管焦点法光源宽

收稿日期: 2012-12-10; **收到修改稿日期:** 2013-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(10976017)资助课题。

作者简介: 罗文全(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光与光通信方面的研究。E-mail: shu321456@yahoo.com.cn

导师简介: 冯国英(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事新型激光技术方面的研究。

E-mail: guoying_feng@scu.edu.cn(通信联系人)

度过窄(限制在毛细管内径范围内)造成光线会聚角度不足测距景深过大并且需要标定毛细管管壁的折射率;液芯变焦柱透镜法需要标准液标定系统参数;光纤传感器法^[14]测量精度受限。本文介绍了一种基于单元件干涉光路^[15]的液体折射率测量方法。此方法抗干扰性强、测量精度高,可达 10^{-4} 量级,且实验方案简单,适于测量透明液体样品。

2 实验装置与测量原理

2.1 单元件干涉仪

单元件干涉仪装置示意图如图 1 所示,一束光沿着 z 轴传播,分光棱镜(BS)的半反半透膜沿着 z 轴方向放置。一部分光(path1)作为参考光,另一部分光(path2)作为物光。由折射定律可以很容易得知分光棱镜在 x 轴上的有效范围为 d (约为分光棱镜边长的 30%),超过此范围的光将会在分光棱镜壁上发生全反射。

设 $E_1(x', y')$ 和 $E_2(x', y')$ 分别为入射面 Σ_{in}

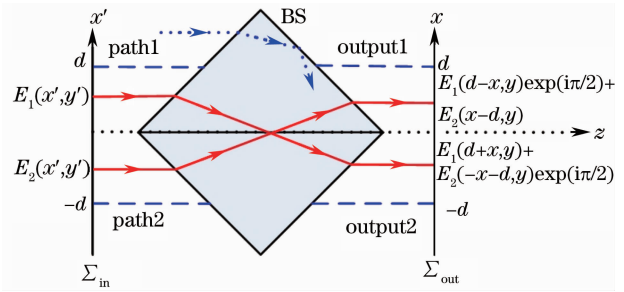


图 1 分光棱镜中的光线轨迹。 d 为 x 轴上的有效范围,其他光线将会在壁上发生全反射

Fig. 1 Ray trajectories in the beam-splitter cube. d is the size of the working region in the x direction, and more external rays suffer total reflection at the cube walls

上的两束光的电场。入射光经过分光棱镜后将会在输出面 Σ_{out} 上分别得到两幅 E_1 和两幅 E_2 的像。透射光的相位不变,而反射光将会有 π 的附加相位,即反射光的电场会有 $\pi/2$ 的相位漂移。

在输出面 Σ_{out} 上,将会得到反射光与透射光的干涉图。output1($0 \leq x \leq d$) 和 output2($-d \leq x \leq 0$) 的光强分别为

$$I_{output1} = |E_1(d-x, y)\exp(i\pi/2) + E_2(x-d, y)|^2 = |E_1(d-x, y)|^2 + |E_2(x-d, y)|^2 + 2|E_1(d-x, y)||E_2(x-d, y)|\cos[\xi_1(d-x, y) - \xi_2(x-d, y) + \pi/2], \quad (1)$$

$$I_{output2} = |E_1(d+x, y) + E_2(-x-d, y)\exp(i\pi/2)|^2 = |E_1(d+x, y)|^2 + |E_2(-x-d, y)|^2 + 2|E_1(d+x, y)||E_2(-x-d, y)|\cos[\xi_1(d+x, y) - \xi_2(-x-d, y) - \pi/2], \quad (2)$$

式中 ξ_1, ξ_2 分别为 E_1, E_2 的相位(推导过程中,已忽略了分光棱镜分光膜的分光比)。当入射光为平面波 E_0 时,若 path2 处的样品相位为 $\xi(x', y')$, 则有

$$E_1(x', y') = E_0, E_2(x', y') = E_0 \exp[i\xi(x', y')]. \quad (3)$$

假设分光比为 1:1, 则(1)式和(2)式可以改写为

$$I_{output1}(x, y) = I_0 \{1 + \cos[\xi(x-d, y) - \pi/2]\} = I_0 \{1 + \sin[\xi(x-d, y)]\}, \quad (4)$$

$$I_{output2}(x, y) = I_0 \{1 + \cos[\xi(-x-d, y) + \pi/2]\} = I_0 \{1 - \sin[\xi(-x-d, y)]\}, \quad (5)$$

式中 $I_0 = E_0^2$ 。可以看到,除了 x 轴上的反向外, output1 和 output2 之间相位相差 π 。

通过旋转分光棱镜半反半透膜与 z 轴的夹角可以改变条纹图的空间载频。图 2(a)~(d) 为不同载频的实测条纹图。旋转角度每次增加约 0.02° 。条纹图的效果不是很理想,这是由于分光棱镜的缺陷引起的。

2.2 折射率测量装置与原理

实验装置图如图 3 所示。He-Ne 光(波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)经扩束准直系统扩束为直径约 2 cm 的圆形光束。矩形比色皿放在准直光束之后,比色皿壁厚为 1 mm,两壁间的大小为 $10 \text{ mm} \times 21 \text{ mm}$, 并

且在比色皿内将其一分为二,使其能同时装待测液体和标准液体(或空气),本实验取空气作为参考。一部分光经过空比色皿作为参考光 path1,另一部分经过经过装有液体的比色皿作为物光 path2。两束光透过分光棱镜(分光比为 1:1)构成的单元件干涉仪后形成两幅相位相差 π 的平行等间距干涉直条纹,使条纹基本垂直入射到 CCD 上。

如图 4 所示,当旋转样品时,物光束与参考光束之间的光程差发生变化,干涉条纹将会发生移动。可以看到比色皿壁对参考光 path1 和物光 path2 的影响是一样的,所以光程差变化可以看做是由一折射率为 n 、厚度为 d 的液体“平板”样品引起的,这样

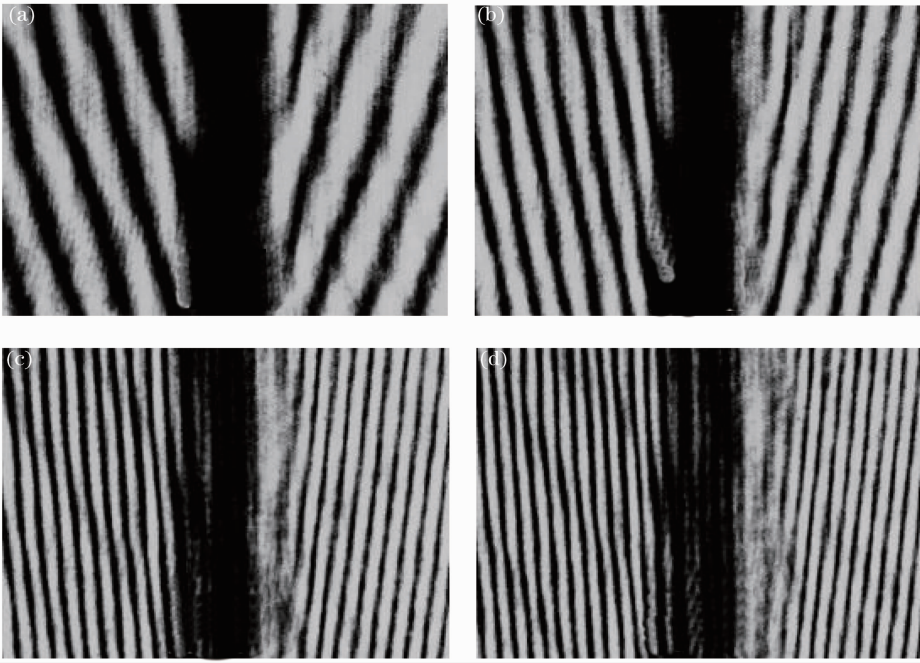


图 2 不同载频下的干涉条纹图,分光棱镜的旋转角度每次增加约 0.02°

Fig. 2 Interferograms at different linear-carrier frequencies. Between consecutive figures, the rotation angle of the beam-splitter cube is incremented about 0.02°

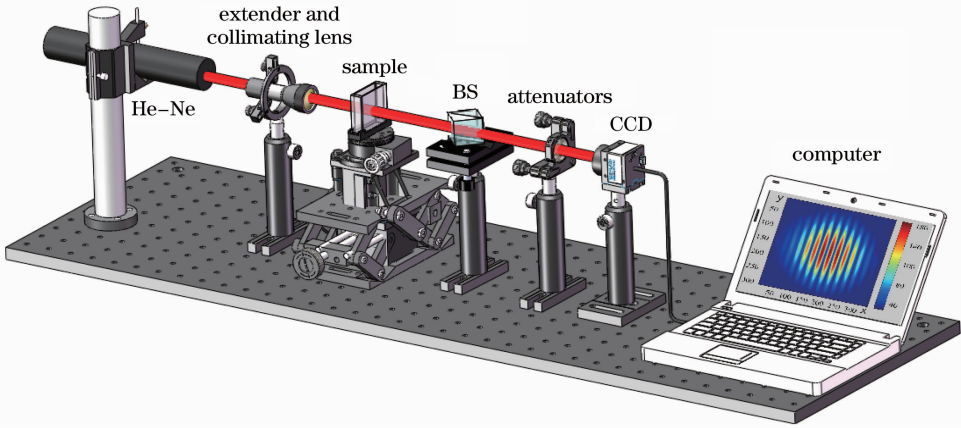


图 3 实验装置图

Fig. 3 Schematic of the experimental arrangement

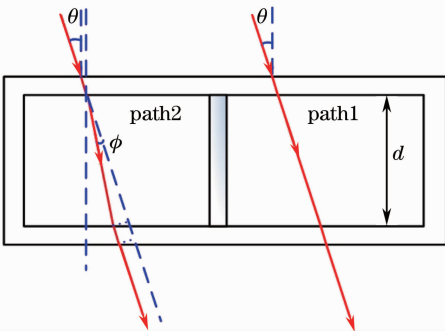


图 4 旋转比色皿使光程差改变的原理示意图
Fig. 4 Principle of changing optical path by rotating the cell

就可以避免光斑位移法出现的问题。假设旋转 θ 角后,对应的条纹移动数为 N ,则 N 与 θ 的关系为

$$N = \frac{d}{\lambda} (\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta} - n_0 \cos \theta - n + n_0), \quad (6)$$

式中 n_0 为空气的折射率。由(6)式可得待测样品折射率 n 的计算式为

$$n = \frac{(N\lambda/d)^2 + 2(1 - \cos \theta)(n_0^2 - n_0 N\lambda/d)}{2[n_0(1 - \cos \theta) - N\lambda/d]}. \quad (7)$$

3 实验结果与分析

3.1 实验结果与误差分析

由(7)式可知,只要记录下旋转的角度 θ 和对应

的条纹移动数 N 即可得到待测液体的折射率。由单元件干涉仪的干涉原理可知,可以取任一条纹图进行分析。图 5 是测量数据与理论模拟曲线, a 为蒸馏水, b 为二甲基亚砷(DMSO), 测量时温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。蒸馏水和 DMSO 的折射率计算值分别为 1.3313、1.4777, 这与文献[16]相符。

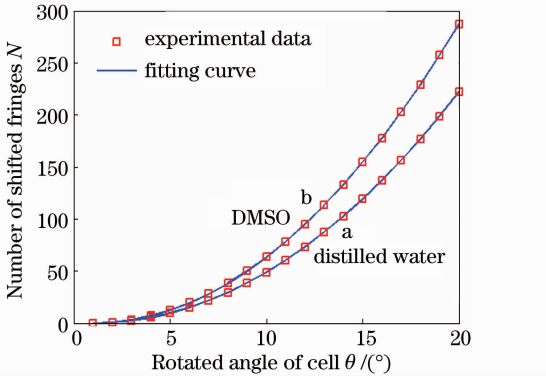


图 5 样品测量数据与理论模拟曲线

Fig. 5 Experimental data and theoretical curves of the sample

下面分析该测量方案的误差, (7)式分别对角度 θ 、厚度 d 和条纹移动数 N 求偏导得

$$\frac{\partial n}{\partial \theta} = \frac{N\lambda}{d} \frac{(N\lambda/d - 2) \sin \theta}{2(1 - \cos \theta - N\lambda/d)^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial n}{\partial d} = \frac{N\lambda}{2d^2} - \frac{N\lambda \sin^2 \theta}{2[d(1 - \cos \theta) - N\lambda]^2}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial n}{\partial N} = \frac{\lambda}{d} \frac{2(1 - \cos \theta)(N\lambda/d + \cos \theta) - (N\lambda/d)^2}{2(1 - \cos \theta - N\lambda/d)^2}. \quad (10)$$

以蒸馏水为例, 设 $\theta=20^{\circ}$, $d=10\text{ mm}$, $N=247$, 则代入 (8)~(10)式可得 $\frac{\partial n}{\partial \theta} = -2.62$, $\frac{\partial n}{\partial d} = -45.02$, $\frac{\partial n}{\partial N} = 0.0018$ 。所用的旋转平移台最小步长为 0.01° , 因此角度测量误差 $\Delta\theta=0.01^{\circ}=1.745 \times 10^{-4}$ 引起的折射率测量误差为

$$\Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial \theta}\right) \Delta\theta \approx 5 \times 10^{-4}. \quad (11)$$

设比色皿前后两壁间距 d 的测量误差为 $\Delta d = 1\text{ }\mu\text{m}$, 则液体“厚度”测量误差对折射率的影响为

$$\Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial d}\right) \Delta d \approx 5 \times 10^{-5}. \quad (12)$$

由于实测条纹图的条纹间距约占 CCD 40 pixel, 所以条纹移动数的最小分辨率为

$$\Delta N = 1/40 = 0.025, \quad (13)$$

此时, 条纹移动数测量误差对折射率的影响为

$$\Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial N}\right) \Delta N \approx 5 \times 10^{-5}. \quad (14)$$

设 $\theta=20^{\circ}$, $d=10\text{ mm}$, $N=320$, 同理可以得到, 角度 θ 、厚度 d 和条纹移动数 N 的测量误差对 DMSO 的折射率测量误差的影响分别为

$$\begin{cases} \Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial \theta}\right) \Delta\theta \approx 7 \times 10^{-4}, \\ \Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial d}\right) \Delta d \approx 7 \times 10^{-5}, \\ \Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial N}\right) \Delta N \approx 6 \times 10^{-5}. \end{cases} \quad (15)$$

可以看到在相同条件下, DMSO 折射率的测量误差增大。这是因为在旋转相同角度时, 由 (6) 式可知折射率越大的材料, 条纹移动数 N 越大, 而由 (8)~(10) 式可以很容易推出 $\left|\frac{\partial n}{\partial \theta}\right|$, $\left|\frac{\partial n}{\partial d}\right|$, $\left|\frac{\partial n}{\partial N}\right|$ 是 N 的增函数, 所以 DMSO 折射率的测量误差比蒸馏水折射率的测量误差大。由 (8)~(10) 式可以容易推出当旋转角度及样品池内壁间距一致时, 样品折射率值越大, 该方法测量的误差越大。可以算出当 $\theta=20^{\circ}$, $d=10\text{ mm}$, 样品折射率为 2.2 时, 角度 θ 、厚度 d 和条纹移动数 N 的测量误差对样品折射率测量误差的影响分别为

$$\begin{cases} \Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial \theta}\right) \Delta\theta \approx 0.0028, \\ \Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial d}\right) \Delta d \approx 3 \times 10^{-4}, \\ \Delta n = \left(\frac{\partial n}{\partial N}\right) \Delta N \approx 2 \times 10^{-4}, \end{cases} \quad (16)$$

即当样品折射率为 2.2 时, 该方法的测量精度变为 10^{-3} , 但也可以满足一般要求。同时, 也可以由 (6) 式推出 $\left|\frac{\partial n}{\partial \theta}\right|$, $\left|\frac{\partial n}{\partial d}\right|$, $\left|\frac{\partial n}{\partial N}\right|$ 在测量范围内是 θ 的减函数, 即使用大角度测量可以减少相应的测量误差。

3.2 单元件干涉光路与传统干涉光路的稳定性比较

为了比较单元件干涉光路和其他干涉光路的稳定性, 在单元件干涉光路旁边搭建了迈克耳孙干涉光路。分别测了两种干涉光路在没有振动和加上振动(随机振动)后 40 s 内的干涉条纹变化。设干涉图中光强极大值为 I_M , 光强极小值为 I_m , 取光强值为 $I=(I_M+I_m)/2$ 的点作为参考点, 首先测量参考点在没有加入振动时的光强值, 然后再测量加入振动后这些点的光强。图 6 为测得的条纹变化图, (a)、(b) 分别为迈克耳孙干涉光路和单元件干涉光路。由图可以看到单元件干涉光路的稳定性相对传统干涉光路较好, 加入振动后单元件干涉的光强基本不变化, 而迈克耳孙干涉光路震荡范围几乎为

100%。由单元件干涉光路的原理图可以知道,因为参考光和物光距离比较近,所以振动对它们的影响

基本是一样的,因而稳定性比较好。

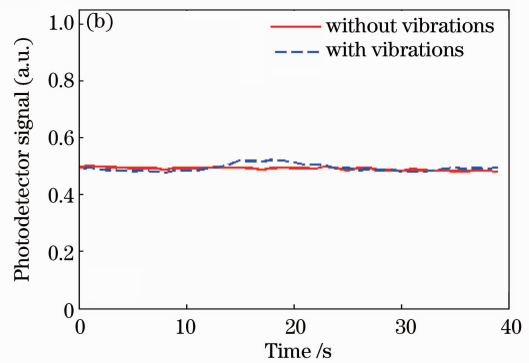
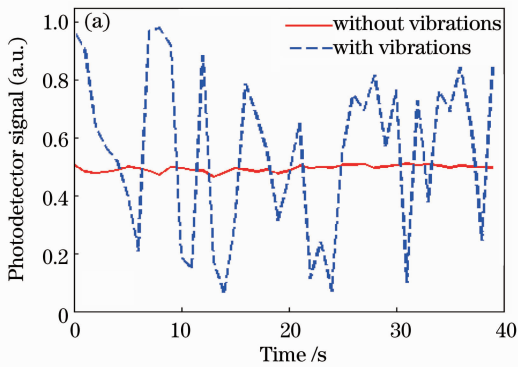


图6 两种干涉仪稳定性的比较。(a)迈克耳孙干涉光路;(b)单元件干涉光路

Fig. 6 Stability comparison of two interferometers. (a) Michelson interferometer; (b) single-element interferometer

4 结 论

本文介绍了一种用于测量液体折射率的新颖方法,此方法基于分光棱镜构成的单元件干涉仪的干涉原理,所用光学元件少、操作容易。并对单元件干涉光路及折射率测量的基本原理进行了阐述,给出了蒸馏水和DMSO的折射率测量结果,精度达 10^{-4} 量数。同时通过实验,验证了单元件干涉仪比传统干涉仪更稳定。

参 考 文 献

- 1 A. Garcia-Valenzuela, M. Pena-Gomar, C. Garcia-Segundo *et al.*. Dynamic reflectometry near the critical angle for high-resolution sensing of the index of refraction [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1998, **52**(3): 236~242
- 2 S. Nemoto. Measurement of the refractive index of liquid using laser beam displacement [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(31): 6690~6694
- 3 Deng Guang'an, Cai Zhigang, Zhang Yuhua *et al.*. Refraction index measurement of transparent materials by using diffraction grating and CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 99~103
邓广安,蔡志岗,张运华等.用衍射光栅和CCD测量透明材料折射率[J].*光学学报*, 2004, **24**(1): 99~103
- 4 A. Sabatyan, M. Taghi Tavassoly. Determination of refractive indices of liquids by Fresnel diffraction [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **41**(7): 892~896
- 5 D. McKee, J. Nicholls, I. Ruddock. Interferometric measurement of refractive index [J]. *Eur. J. Phys.*, 1999, **16**(3): 127~134
- 6 P. Lu, L. Men, K. Sooley *et al.*. Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(13): 131110
- 7 N. Andrushchak, O. Syrotynsky, I. Karbovnyk *et al.*. Interferometry technique for refractive index measurements at subcentimeter wavelengths [J]. *Microwave & Opt. Technol. Lett.*, 2011, **53**(5): 1193~1196

- 8 T. Wei, Y. Han, Y. Li *et al.*. Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5764~5769
- 9 Li Maohe, Zhang Meidun. Refractive index measurement with 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
- 10 Li Qiang, Han Guanghui, Xing Mannan *et al.*. Measuring refractive index of micro-quantity liquid by focus method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2468~2472
李强,韩广辉,邢曼男等.用毛细管焦点法精确测量微量液体的折射率[J].*光学学报*, 2009, **29**(9): 2468~2472
- 11 Li Qiang, Su Guanghui, Zhang Ruikai *et al.*. Nondestructive measurement of refractive index of transparency capillary [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(6): 1264~1270
李强,苏光辉,张瑞凯等.透明毛细管管壁折射率的无损测量[J].*光学精密工程*, 2010, **18**(6): 1264~1270
- 12 Li Yu, Li Qiang, Sun Licun *et al.*. Measuring method for refractive index of micro-quantity liquid [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 021202
李宇,李强,孙丽存等.测量微量液体折射率的新方法[J].*激光与光电子学进展*, 2012, **49**(2): 021202
- 13 Li Qiang, Sun Licun, Meng Weidong *et al.*. Refractive index of liquid measured by liquid-core zoom cylindrical lens [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1008005
李强,孙丽存,孟伟东等.用液芯变焦柱透镜精确测量液体折射率[J].*中国激光*, 2012, **39**(10): 1008005
- 14 Wang Jieyu, Tong Zhengrong, Yang Xiufeng *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0905003
王洁玉,童峥嵘,杨秀峰等.基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量[J].*中国激光*, 2012, **39**(9): 0905003
- 15 J. A. Ferrari, E. M. Frins. Single-element interferometer [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **279**(2): 235~239
- 16 W. M. Haynes, D. Lide. Handbook of Chemistry and Physics [M]. Boca Raton: CRC-Press, 2010