

文章编号 1004-924X(2008)07-1196-07

精确测量微量液体折射率的新方法

邢曼男,白 然,普小云

(云南大学 物理科学技术学院 物理系,云南 昆明 650091)

摘要:介绍了一种用玻璃毛细管精确测量微量液体折射率的新方法。该方法基于共轴球面光学系统的成像原理,通过读数显微镜对吸入待测液体后毛细管的焦点位置进行单一参数的测量,进而计算出待测液体的折射率。用此方法测量了纯水、乙醇、乙二醇、丙三醇的折射率,各种待测样品的需要量 <0.002 ml;测量结果表明,纯水和乙醇样品的折射率测量精度优于 0.0003 ;乙二醇和丙三醇样品的折射率测量精度优于 0.0007 。选用适当的毛细管参数,可以进一步提高这种测量方法的测量精度,扩展折射率的测量范围。分析和讨论了实验测量误差以及进一步提高测量精度的方法。该方法具有待测液体用量极少、使用设备简单、操作方便和折射率测量精度高的特点。

关键词:微量液体;折射率测量;玻璃毛细管;读数显微镜

中图分类号: TB96; TH741.4 **文献标识码:** A

Novel measuring method for refractive index of micro-quantity liquid

XING Man-nan, BAI Ran, PU Xiao-yun

(*Department of Physics, School of Physical Science and Technology,
Yunnan University, Kunming 650091, China*)

Abstract: On the basis of imaging principle of a coaxial spherical surface optical system, a new measuring method using glass capillary for the the refractive index of micro-quantity liquid was introduced. The refractive index was obtained through measuring the focal position of a capillary filled with the liquid by a reading microscope, and doing a calculation with an analytic formula. The refractive indexes of four liquid mediums, water, ethanol, ethylene glycol and glycerin were measured, the required sample was less than 0.002 ml, the precisions of obtained refractive indexes were better than 0.0003 for water and ethanol, and 0.0007 for ethylene glycol and glycerin. The results show that the new measuring method can be characterized by a micro-quantity sample, and has advantages in simple equipment, easy operation and high measurement accuracy. It is adapted to measure the refractive index of transparent or translucent micro-quantity liquid sample.

Key words: micro-quantity liquid; refractive index measurement; glass capillary; reading microscope

收稿日期:2007-10-31;修订日期:2008-01-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10564005)

1 引言

液体折射率的精确测量在化工、医药、食品、石油等工业部门和高校实验中都有重要意义。测定液体折射率有多种不同的方法^[1],较为典型的测量方法有掠面入射法^[2],衍射光栅法^[3],激光照射法^[4],光纤杨氏干涉法^[5]和 CCD 测量法^[6]。这些方法都有各自的技术特点,但是,不同的测量方法分别存在待测参数多^[3-4];待测样品需要量较大^[3-6];待测样品在开放或半开放状态下测量^[3-6];对测量装置的要求高^[6]等局限性。用全反射原理以掠面入射法制成的市售阿贝折射仪是一种测量液体折射率的成熟仪器,它具有单一测量参数和待测样品需要量较少(~ 0.2 ml)的特点,但是待测样品仍然在半开放状态下测量,对有毒、有刺激性气味、易挥发、易吸水的液体,存在操作不方便、污染较大和观察到的现象不稳定的问题。为解决现行方法中存在的如上问题,本文介绍一种用玻璃毛细管精确测量微量液体折射率的新方法^[7]。该方法基于共轴球面光学系统的成像原理,通过读数显微镜对吸入待测液体后毛细管的焦点位置进行单一参数的测量,进而计算出待测液体的折射率。用此方法测量了纯水、乙醇、乙二醇、丙三醇的折射率,各种待测样品的需要量 < 0.002 ml;对纯水和乙醇样品,折射率测量精度优于 0.0003 ;对乙二醇和丙三醇样品,折射率测量精度优于 0.0007 。选用适当的毛细管参数,可以进一步提高这种测量方法的测量精度,扩展折射率的测量范围。该方法具有待测液体用量极少、使用的设备简单、操作方便和折射率测量精度高的特点,适用于透明或半透明微量液体折射率的精确测量。本文对实验测量误差以及进一步提高测量精度和扩展折射率的测量范围做了详细的分析和讨论。

2 测量原理与公式推导

2.1 测量原理

如图 1(a)所示,准直光源发出的一束平行光通过竖直放置的遮光狭缝(缝宽 SW 约等于毛细管的内径 $2r$)后,从一侧正入射到竖直放置的装有待测液体的玻璃毛细管(以下简称毛细管),毛细管和管内待测液体共同构成一个由 4 个柱面组成的共轴柱面光学系统。根据共轴球面光学系统

成像原理可知,在近轴条件下,单色平行光经光学系统后将在毛细管的另一侧汇聚成一条平行于毛细管轴线的“亮线”,“亮线”所在位置即为光学系统的焦点 F 。通过移动读数显微镜可分别观察到毛细管外轮廓(轴线位 AB)的清晰像(图 1(b))和“亮线”的像(图 1(c))。测量毛细管轴线位置(D_1)到“亮线”位置(D_2)的距离 d ,即可精确地计算出待测液体的折射率。图 1(a)中, θ 是平行光通过光学系统后汇聚到焦点位置的张角,虚线部分围成的 2α 是光轴上“亮线”位置与读数显微镜的物镜直径形成的张角,即物镜的孔径角。

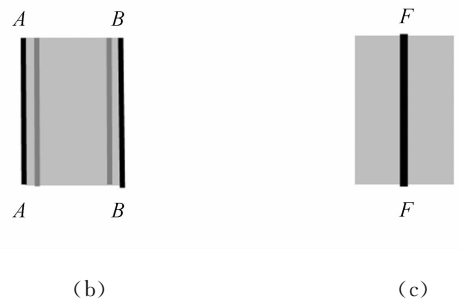
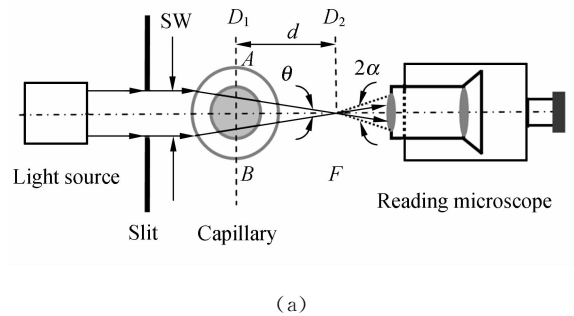


图 1 测量原理示意图

Fig. 1 Diagram of measurement principle

2.2 待测液体折射率的计算公式推导

如图 2 所示,注入透明毛细管内折射率为 n 的待测液体,和内径、外径、折射率分别为 r 、 R 、 n_0 的毛细管共同组成一个由 4 个共轴柱面构成的光学系统。平行光线经柱面 O_1 (实物成虚像)、 O_2 (虚物成虚像)、 O_3 (虚物成虚像)、 O_4 (虚物成实像)后会聚到光学系统的焦点 F 处。根据共轴球面系统的逐次成像原理^[8],将近轴条件下单一球面的成像公式(1)逐一应用到每个折射面,推导出待测液体折射率的计算公式:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad (1)$$

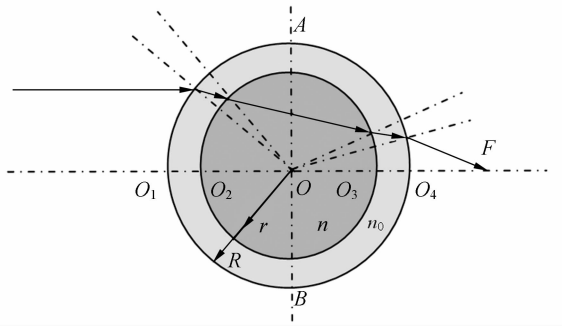


图 2 毛细管截面及光线行径图

Fig. 2 Cross section of a capillary and the ray path

式中, s, s' 分别是物距和像距, n, n' 为物方空间和像方空间的介质折射率, r 为折射面的曲率半径。

设 $s_1, s_1', s_2, s_2', s_3, s_3', s_4, s_4'$ 分别为 4 个柱面的物距和像距(这里 $s_1 \rightarrow \infty$); 各个柱面的曲率半径为 $R, r, -r, -R$; 各柱面顶点之间的间隔为 $R-r, 2r, R-r$; 各柱面物像空间的介质折射率分别为 $n_1, n_1', n_2, n_2', n_3, n_3', n_4, n_4'$ 。在已知这些参数的前提下, 要计算多个面组成的共轴球面光学系统的光线行径问题, 还必须实现从一个面到下一个面的量值转换, 显然, 一个柱面的像空间就是下一个柱面的物空间, 从图中可以很容易地得出以下转面关系:

$$\left. \begin{aligned} n_1 = n_4' = 1, n_1' = n_2 = n_3' = n_4 = n_0, n_2' = n_3 = n \\ s_2 = s_1' - (R-r), s_3 = s_2' - 2r, s_4 = s_3' - (R-r) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

利用式(1)、(2), 并将 $s_4' = d - R$ ($d = OF$) 代入方程组后, 可得待测液体的折射率计算公式:

$$n = \frac{2n_0 R d}{2d(R-r) + 2n_0 d r - n_0 R r}. \quad (3)$$

实验中, 通过读数显微镜测量“亮线”和毛细管外轮廓(即轴线位 AB) 的清晰像两个位置, 读数分别记为 D_2 和 D_1 , 两清晰像间的距离为 $d = D_1 - D_2$ 。毛细管位置固定后, 只需测量出“亮线”的位置 D_2 , 就可得出待测液体的折射率, 使毛细管折射率测量方法简化为单一位置参数的测量过程, 有效地提高了折射率的测量精度和速度。

3 测量过程与结果

3.1 测量装置

测量装置由如图 3 所示的 5 个部分组成, 即

波长为 594.1 nm 的氦氖激光器; 宽度可调的通光狭缝; 结构参数为 $n_0 = 1.5160$, $R = 0.768$ mm, $r = 0.345$ mm 的毛细管以及调整架(毛细管内外径用德国蔡司公司 10096 型读数显微镜测量, 最小分度值为 0.001 mm; 毛细管管壁折射率取 K8 冕牌玻璃的折射率^[9]); 放大倍率为 10×10 , 数值孔径 $A = 0.25$ 的直筒显微镜; 最小分度值为 0.01 mm 的一维位移台。

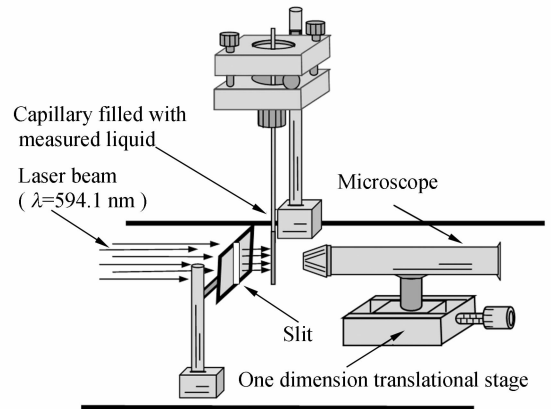


图 3 “毛细管焦点测量”装置示意图

Fig. 3 Diagram of measurement setup

3.2 测量步骤及结果

测量步骤如下:

(1) 如图 3 所示, 调整激光器、狭缝、毛细管和读数显微镜, 使整个测量系统满足共轴条件。即激光束中心轴线和显微镜镜筒中心轴线重合并构成该光学系统的光轴, 此光轴将通过竖直放置且相互平行的通光狭缝和毛细管的中心轴线。光路调整结束后, 毛细管轴线应该正对读数显微镜的物镜中央。

(2) 旋动位移平台旋钮, 使物镜逐渐远离毛细管, 通过目镜能观察到毛细管像由模糊逐渐清晰, 如图 1(b) 中所示最亮的衍射条纹向毛细管边缘靠近, 当衍射条纹与毛细管外轮廓边缘重合时毛细管外轮廓像最清晰。对应位移平台的读数记为 $D_1 \pm \sigma_{D_1} = (13.777 \pm 0.003)$ mm, 该值为 10 次测量所得毛细管基准位置的平均值。

(3) 利用毛细现象将待测液体吸入毛细管中, 毛细管外壁无液体残留, 当毛细管基准位置确定后, 按同一方向继续旋动位移平台旋钮, 又将看到一条平行于毛细管的“亮线”如图 1(c) 所示, 对应的位移平台的读数记为 D_2 。为使“亮线”的成像

质量更好,此时将调节通光狭缝使其宽度约小于毛细管内径,从而减少了非近轴光线通过球面系统后带来的像差对“亮线”成像位置的影响。

(4)测量完一种液体后,用压缩气体冲洗毛细管内壁,使毛细管保持清洁。

整个测量过程始终保持毛细管固定不动,因此,只需重复步骤3和4,测量 D_2 值就能得到各种待测样品两清晰像间的距离 d 。按此操作,在室温条件(20℃)下,分别测量了纯水、乙醇、乙二醇和丙三醇4种液体样品的折射率。纯水是去离子蒸馏水,其余3种样品均为99%含量的分析纯样品。表1给出对如上样品10次测量数据的统计平均结果。表1中的第2列是 d 值的测量值,其中 $\sigma_d = \sqrt{\sigma_{D_1}^2 + \sigma_{D_2}^2}$ 是 d 值的标准偏差, σ_{D_1} 和 σ_{D_2}

分别是 D_1 和 D_2 平均值的标准偏差。表1中的第3列是标定前(毛细管参数取 $n_0 = 1.5160$, $R = 0.768$ mm, $r = 0.345$ mm),液体折射率的计算值。其中,折射率的标准偏差 σ_n 由式(3)导出:

$$\sigma_n = \frac{2n_0^2 R^2 r}{[2d(R-r) + 2n_0 dr - n_0 Rr]^2} |\sigma_d| \quad (4)$$

表1中的第4列是标定后(毛细管参数取 $n_0 = 1.5113$, $R = 0.768$ mm, $r = 0.340$ mm)液体折射率的计算值,标定方法见本文4.2所述。表1中的第5列是在白光照明条件下,用2WA-J型阿贝折射仪(上海光学仪器五厂生产)测量的测量值,标准偏差是阿贝折射仪的给出值。表1中的第6列是文献[9]给出的在钠黄光照明条件下的报导值,用作折射率的标定和数值对照。

表1 几种液体折射率的测量结果

Tab.1 Measurement results of refractive indexes for several liquid samples

测量结果 待测液体	$d \pm \sigma_d$ (mm)	$n \pm \sigma_n$ (毛细管方法) (定标前)	$n \pm \sigma_n$ (毛细管方法) (定标后)	$n \pm \sigma$ (折射仪方法)	n_D^{20} (文献值)
纯水	2.777 ± 0.006	1.332 6 ± 0.000 3	1.332 9 ± 0.000 2	1.333 4 ± 0.000 2	1.333 0
乙醇	2.167 ± 0.005	1.364 4 ± 0.000 3	1.364 3 ± 0.000 3	1.360 7 ± 0.000 2	1.362 9
乙二醇	1.483 ± 0.005	1.436 4 ± 0.000 8	1.435 1 ± 0.000 6	1.431 5 ± 0.000 2	1.4331
丙三醇	1.270 ± 0.004	1.478 ± 0.001	1.475 7 ± 0.000 7	1.472 0 ± 0.000 2	1.475 8

4 结果分析与讨论

4.1 液体折射率的微量测量

玻璃毛细管焦点测量法最突出的特点是待测液体用量少。按毛细管内径 $r = 0.340$ mm,吸入样品的高度 $h = 5$ mm计算,样品需要量 $V = \pi r^2 h = 0.0018$ ml。待测样品用量约为阿贝折射仪需用量的1/100。因而,玻璃毛细管焦点测量法可以做微量液体介质的折射率测量,这是传统液体介质折射率的测量方法无法实现的。此外,在玻璃毛细管焦点测量法中,待测样品基本处于封闭条件下完成测量,有利于对有毒、有刺激性气味、易挥发性液体介质做折射率的测量。

4.2 折射率测量的准确性

毛细管测量值和文献报道值之间存在差异(见表1第3、6列),本文认为这主要是由于毛细管的光学参数选用值($n_0 = 1.5160$, K8冕牌玻璃

的折射率)及几何参数测量值(R, r)的误差所造成。其中,用10096型读数显微镜测量毛细管外径是方便的,测量值 $R = 0.768$ mm应该是可靠的;但是,受毛细管管壁影响,内径测量值 $r = 0.345$ mm可能存在较大的偏差。此外,所用毛细管的管壁折射率和K8冕牌玻璃的折射率也可能存在偏差。为消除玻璃毛细管参数(n_0, r)的偏差对折射率测量造成的误差,本文用纯水和丙三醇的折射率文献[10]报导值(见表1第6列)对参数 n_0 和 r 作了数值标定。标定中,将表1第2列中 d 的实验值和折射率文献报导值带入式(3)得到一个二元一次方程组,解此方程组求出 $n_0 = 1.5113$, $r = 0.340$ mm。用标定后的毛细管参数(n_0, r)重新带入式(3),计算出标定后4种样品的折射率(见表1第4列)。比较表1中的第4、6列,可见标定后样品折射率更接近相应样品折射率的文献报导值(σ_n 按 $\sigma_d = \sigma_{D_2}$ 计算)。如上所述的毛细管参数的标定方法也可以用作毛细管管壁

折射率的精确测量。

4.3 折射率测量的精度

在读数显微镜一维位移平台的最小分度值 (0.01 mm) 确定的条件下, 毛细管焦点测量方法的精度, 主要受 2 个客观因数的影响。第一, 显微镜在观察物体时存在一定的测距景深, 在测距景深范围内, 测量者无法准确判断毛细管外轮廓的清晰像位置 (D_1 值) 和“亮线”像位置 (D_2 值)。第二, 待测液体的折射率 n 随 d ($d = D_1 - D_2$) 值变化的灵敏程度。显然, 如果折射率的变化 Δn 引起的 d 值变化 Δd 在显微镜的测距景深范围内, 此 Δn 值就确定了折射率的测量精度。

显微镜测距景深由下式确定^[11]:

$$T = 250 \times \frac{n\varepsilon}{AM}, \quad (5)$$

式中, T 为显微镜的测距景深; 250 mm 是人眼的明视距离; M 是显微镜放大率; A 是显微镜物镜的数值孔径; $\varepsilon = 0.00058$ rad 是人眼的极限分辨角^[9]; $n = 1$ 是物镜的物方折射率。为获得较小的测距景深, 本文选用 $M = 10 \times 10$ 倍的显微镜, 物镜的数值孔径 $A = 0.25$ 。由式 (5) 计算出的显微镜景深 $T = 0.0058$ mm。从毛细管的测量原理图 1 可以看出, 平行光经过毛细管汇聚在焦点 F 后, 其散焦光线在显微镜物镜上的光斑直径可能小于物镜的口径。换言之, 显微镜物镜的有效数值孔径 A_{eff} 可能 $< A$ 。如图 1 所示, A_{eff} 和 A 间的关系近似满足:

$$A_{\text{eff}} = \begin{cases} \sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{SW}{2(R+d)}, & (\theta < 2\alpha) \\ A, & (\theta \geq 2\alpha) \end{cases}, \quad (6)$$

式 (6) 中, SW 为狭缝的宽度。取 $SW = 2r$, 所用显微镜的有效测距景深 T_{eff} 近似满足:

$$T_{\text{eff}} = \begin{cases} 1.45 \times \left(\frac{R+d}{r} \right), & (\theta < 2\alpha) \\ 5.8, & (\theta \geq 2\alpha) \end{cases}. \quad (7)$$

待测液体折射率变化 Δn 引起的 d 值变化 Δd 可由式 (3) 求出:

$$\frac{\Delta d}{\Delta n} = \frac{1}{n} \cdot \frac{d[-2d(R-r) - 2n_0 dr + n_0 Rr]}{n_0 Rr}. \quad (8)$$

设 $\Delta n/n = 0.001$, 定义折射率灵敏度 (即相对折射率改变 10^{-3} 引起的 d 值变化 Δd) 满足:

$$\Delta d = \left[1 - \frac{2d}{R} - \frac{2d(R-r)}{n_0 Rr} \right] d. \quad (9)$$

对经过实验标定后的毛细管参数 ($n_0 = 1.5113$, $R = 0.768$ mm, $r = 0.340$ mm), 由式 (9)、(7) 计算得到的折射率灵敏度 (图 4 粗实线) 和有效测距景深 (图 4 细实线) 随待测折射率的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可见, 折射率灵敏度和有效测距景深都随待测折射率的增加而减小。其中, 纯水和乙醇样品的折射率灵敏度远远大于有效测距景深, 折射率的单次测量精度 ($\Delta n/n$) 应该优于 0.001; 乙二醇样品的折射率灵敏度接近有效测距景深, 折射率的单次测量精度应该接近 0.001; 丙三醇样品的折射率灵敏度低于有效测距景深, 折射率的单次测量精度应该劣于 0.001。表 1 列出的实际测量结果 (10 次测量的统计平均值) 符合如上分析所遵循的规律。

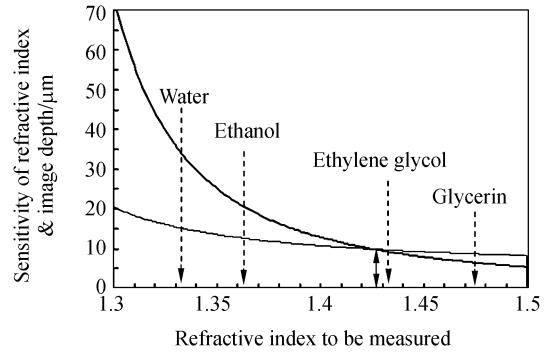


图 4 折射率灵敏度 (粗实线) 和有效测距景深 (细实线) 随待测折射率的变化曲线。

Fig. 4 Sensitivity of refractive index (thick line) and real image depth (thin line) varied with refractive index to be measured.

4.4 扩展折射率测量范围的方法

由式 (7)、(9) 可见, 有效测距景深和折射率灵敏度均和毛细管参数 (n_0 , R , r) 有关。选用适当的毛细管参数, 可以在保证测量精度的前提下有效地扩展折射率的测量范围。下文分别计算了毛细管的几何参数 (R , r) 和光学参数 (n_0) 对有效测距景深以及折射率灵敏度的影响。

保持毛细管的折射率和内径不变 ($n_0 = 1.5113$, $r = 0.340$ mm), 将外径 R 从图 4 的 0.768 mm 增大到 1 mm 后得到图 5 所示的折射率灵敏度 (粗实线 1) 和有效测距景深 (细实线 3); 保持毛细管的折射率和外径不变 ($n_0 = 1.5113$, $R = 0.768$ mm), 将内径 r 从 0.340 mm 减小到 0.3

mm后得到图5所示的折射率灵敏度(粗实线2)和有效测距景深(细实线4)。显然,增大毛细管的外径或减小毛细管的内径都能够提高折射率测量的灵敏度,但是,有效测距景深也随之增加。在 $\Delta n/n=0.001$ 的条件下,折射率灵敏度曲线和测距景深曲线的交叉点(图5中双箭头所示)从图4中的 $n=1.427$ 分别移动到 $n=1.488$ ($R=1\text{ mm}$, $r=0.340\text{ mm}$)和 $n=1.441$ ($R=0.768\text{ mm}$, $r=0.340\text{ mm}$)。选择适当的毛细管内、外径,可以在保证测量精度的前提下扩展折射率的测量范围。

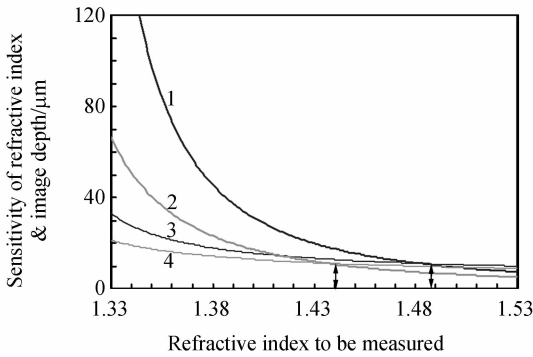


图5 毛细管折射率 $n_0=1.5113$ 时,增大 R 或减小 r 值对折射率灵敏度(粗实线)和有效测距景深(细实线)的影响。曲线1,3: $R=1\text{ mm}$, $r=0.340\text{ mm}$;曲线2,4: $R=0.768\text{ mm}$, $r=0.3\text{ mm}$

Fig. 5 Sensitivity of refractive index(thick line) and real image depth(thin line) for different values of R and r . Curves 1,3: $R=1\text{ mm}$, $r=0.340\text{ mm}$; curves 2,4: $R=0.768\text{ mm}$, $r=0.3\text{ mm}$.

保持毛细管的内外径不变($R=0.768\text{ mm}$, $r=0.340\text{ mm}$),将 n_0 从图4的 $n_0=1.5113$ 增加到1.75时,得到图6所示的折射率灵敏度(粗实线2)和有效测距景深(细实线4); n_0 增加到1.95时,得到图6所示的折射率灵敏度(粗实线1)和有效测距景深(细实线3)。显然,折射率测量的灵敏度随毛细管折射率的增加而增加,但是,有效

测距景深也随之增加。在 $\Delta n/n=0.001$ 的条件下,折射率灵敏度曲线和测距景深曲线的交叉点(图6中双箭头所示)从图4中的 $n=1.427$ 分别移到动 $n=1.527$ ($n_0=1.75$)和 $n=1.597$ ($n_0=1.95$)。根据待测液体的折射率测量范围,选择适当的毛细管折射率参数,可以在保证测量精度的前提下更有效地扩展折射率的测量范围。

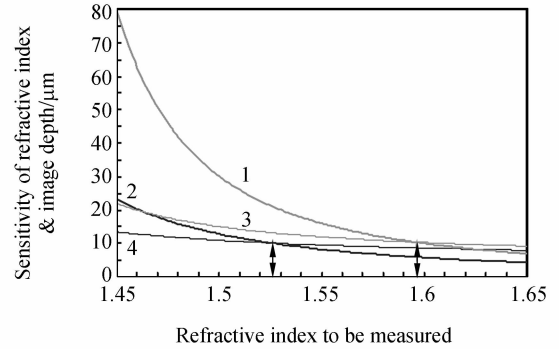


图6 毛细管内外径 $R=0.768\text{ mm}$ 和 $r=0.340\text{ mm}$ 时,增加 n_0 值对折射率灵敏度(粗实线)和有效测距景深(细实线)的影响。曲线1,3: $n_0=1.95$;曲线2,4: $n_0=1.75$ 。

Fig. 6 Sensitivity of refractive index(thick line) and real image depth(thin line) for two n_0 values. Curves 1,3: $n_0=1.95$; curves 2,4: $n_0=1.75$.

5 结 论

毛细管液体折射率测量方法具有待测液体用量极少(仅需 0.0018 ml)、使用的设备简单、操作方便和折射率测量精度高(本实验毛细管参数的折射率测量精度优于 0.0003)的特点。选用适当的毛细管参数,可以进一步提高这种测量方法的测量精度,扩展折射率的测量范围。该测量方法在微量液体折射率的精确测量方面具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] 辛督强,朱民,解延雷,等. 测量液体折射率的几种方法 [J]. 大学物理,2005,26(1):34-37.

XIN D Q, ZHU M, XIE Y L, *et al.*. Several measuring methods of the refractive index of liquid [J]. *College Physics*, 2005, 26(1): 34-37. (in Chinese)

- [2] 2WA-J 型 阿贝折射仪使用说明书,上海光学仪器五厂生产.
2 WA-J Abbe refractometer instruction manual, Shanghai Optical Instrument 5 production. (in Chinese)
- [3] SHYAM S. Diffraction method measures refractive indices of liquids[J]. *Physics Education*, 2004(3):235.
- [4] SHYAM S. Measuring the refractive index of a liquid using a laser[J]. *Physics Education*, 2002(3):152-153.
- [5] 孙晶华,王明.用光纤杨氏干涉测量液体的折射率 [J]. 大学物理实验,2005,18(1): 8-10.
SUN J H, WANG M. Measuring the refractive index of liquid by optical fiber Young's interference experiment [J]. *Physical Experiment of College*, 2005,18(1):8-10. (in Chinese)
- [6] 邓广安,蔡志刚,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.
DENG G A, CAI ZH G, ZHANG Y H, *et al.*. Refraction index measurement of transparent materials by using diffraction grating and CCD [J]. *Acta Optical Sinica*, 2004,24(1):99-103. (in Chinese)
- [7] 普小云,白然,邢曼男,等.用玻璃毛细管精确测量微量液体的折射率:中国,2007100660162[P].
PU X Y, BAI R, XING M N, *et al.*. Measuring the refractive index of micro-quantity liquid by using glass capillary: China,2007100660162[P]. (in Chinese)
- [8] RICHARD D. 现代几何光学 [M]. 长沙:湖南大学出版社,2004.
RICHARD D. *Modern Geometrical Optics* [M]. Changsha: Hunan University Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 李景镇. 光学手册 [M]. 西安:陕西科学技术出版社,1986.
LI J ZH. *Optics Handbook* [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press,1986. (in Chinese)
- [10] <http://www.chemhome.net/> 化学信息网/化学相关数据库/试剂性质查询[OL].
[http://www.chemhome.net/ Chemical information website/Databases related in chemistry/chemical databases \[OL\].](http://www.chemhome.net/Chemical%20information%20website/Databases%20related%20in%20chemistry/chemical%20databases%20[OL].)
- [11] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计 [M]. 杭州:浙江大学出版社,2003.
LI X T, CEN ZH F. *Geometrical Optics · Aberration · Optics Design* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:邢曼男(1975—),女,云南玉溪人,助教,主要从事光学系统的成像及液体折射率测量领域的研究。E-mail: xing_sara@163.com

通讯作者:普小云(1957—),男,云南昆明人,教授,博士生导师,主要从事光学和光电子学领域的科研和教学。E-mail: xypu@163.com

●下期预告

4J32 镜头组件电化学方法消除杂散光的实验

姜 伟^{1,2}, 张云琨¹, 张忠玉¹, 任明文³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049 ;3. 吉林大学, 吉林 长春 130025)

研究了采用电化学方法实现消除精密光学系统 4J32 合金镜头组件中杂散光。利用正交实验法在重铬酸盐体系中确定了主盐浓度,并研究了电压、电解液温度、时间等因素对镜头组件的消杂散光性能和消光膜层质量的影响,确定了最佳工艺:重铬酸钾:20 g/L、硫酸锰:20 g/L、硫酸铵:20 g/L、添加剂 15 g/L,温度:25~35 ℃,3 V/min 升压速率处理20~30 min。经最佳工艺处理后 4J32 合金呈黑色,反射率低于 1.5%、耐蚀性 240 s、膜层附着力 7.9 N、尺寸变化<0.8 μm。结果表明,所得到的消光膜能够满足精密光学系统对零件尺寸精度及表面消光膜层的质量要求。