

文章编号 1004-924X(2010)06-1264-07

透明毛细管管壁折射率的无损测量

李 强, 苏光辉, 张瑞凯, 孙丽存, 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:介绍了一种无损测量透明毛细管管壁折射率的方法。该方法利用平行光经过装有不同已知折射率标准液体的毛细管后会聚焦点位置不同的原理,通过 CCD 对会聚焦点位置成像后的图像进行判断,计算出毛细管外轮廓位置和焦距,进而计算出毛细管管壁的折射率,其测量精度可达 0.005。分析了毛细管内外径对管壁折射率测量的影响,结果表明,管壁越厚,测量精度越高;同时对毛细管管壁折射率灵敏度和成像系统的景深值进行了计算和比较,结果显示,标准液体折射率越低,标定精度越高。该方法使用设备简单,操作方便,便于对图像观察和识别,实现了对毛细管管壁折射率的无损精确测量。

关键词:折射率测量;无损测量;毛细管;焦距;测量精度

中图分类号:TB96;TH741.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101806.1264

Nondestructive measurement of refractive index of transparency capillary

LI Qiang, SU Guang-hui, ZHANG Rui-kai, SUN Li-cun, PU Xiao-yun

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

Abstract: A novel nondestructive measuring method for the refractive index of a transparency capillary is introduced in this paper. When a collimated light passes through a capillary filled in a standard liquid with known refractive index, the focal position is dependent mainly on the wall-material of the capillary. On the basis of the above, the position and focal length of a capillary are imaged by a lens onto a CCD chip accurately, when the capillary is filled in two different liquids with known refractive indexes, respectively. Then, the refractive index of the wall-material is obtained by measuring and calculating two positions and focal lengths separately. The measurement accuracy of refractive index is better than 0.005. The effects of measuring parameters, including inner and outer diameters of the capillary, the refractive index of standard liquid, as well as the image depth and sensitivity of refractive index on the measuring precision are analyzed. It is shown that the thicker capillary wall is, the higher the measuring precision is, and the lower the refractive index of standard liquid is, the higher the calibrating accuracy is. The introduced method is characterized by simple equipment, easy operation, convenient to observe and its measurement precision of refractive index can meet the requirements of general scientific research and experiments.

Key words: refractive index measurement; nondestructive measurement; capillary; focal length; measurement accuracy

收稿日期:2009-07-15;修订日期:2009-10-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60877037);国家和云南省大学生创新基金资助项目

1 引言

玻璃毛细管广泛应用于医疗检测,光学仪器,分析仪器,光纤通信配件,试验、化验检测等行业,是众多检验、检测仪器中的重要部件之一^[1-2]。在科研工作中经常需要精确地知道毛细管管壁的折射率,而厂商一般不提供或者只提供批量产品的相关数据,因此常常需要对实际使用的毛细管管壁折射率进行准确测量。由于目前的文献资料^[3-4]还没有报道对毛细管的管壁折射率进行精确无损测量的方法,本文提出了一种无损测量毛细管管壁折射率的方法。该方法利用平行光经过装有不同标准液体的毛细管后会聚焦点位置不同的原理^[5],采用数值孔径较大的显微物镜结合面阵 CCD 对会聚焦点位置成像并判断图像质量^[6],有效地减小了成像的景深;另外,采用标准液体样品标定毛细管的管轴位置来提高毛细管焦距测量的可靠性。实验采用纯水,乙醇,乙二醇 3 种标准液体对同种管壁材料、不同尺寸的毛细管管壁折射率进行测量,结果显示折射率测量精度在 0.005 以内。该方法具有使用设备简单,操作方便,便于对图像观察和识别以及测量精度高的特点,实现了对毛细管管壁折射率的无损、精确测量,满足了一般科研实验对毛细管管壁折射率的要求精度。最后,通过对毛细管内外径管壁折射率测量结果以及对管壁折射率灵敏度和成像景深的分析,提出了进一步改善毛细管管壁折射率测量精度的方法。

2 实验装置和计算公式

2.1 实验装置

实验装置由 5 部分组成,如图 1 所示。一个准直后的黄光 LED(中心波长 $\lambda = 580 \text{ nm}$, FWHM=30 nm)用作实验光源,准直光束经宽度可调的狭缝保证进入毛细管的光线满足近轴条件。由吸入标准液体后的玻璃毛细管构成一个由 4 个共轴柱面组成的光学系统,起柱透镜作用。毛细管内外径用德国蔡司公司 10096 型读数显微镜测量,其最小分度值为 0.001 mm。用放大倍率为 10,数值孔径 A 为 0.25 的显微物镜和一块集成的二维 CCD 探测器(640 pixel \times 480 pixel,并

包括转换电路,内置驱动等)构成毛细管焦点像的采集系统,通过一个 USB 接口和计算机连接。图像采集系统固定在一个最小分度值为 0.01 mm 的二维位移台上,用计算机显示器观察所成的图像并对毛细管的“焦线”位置进行准确判断。

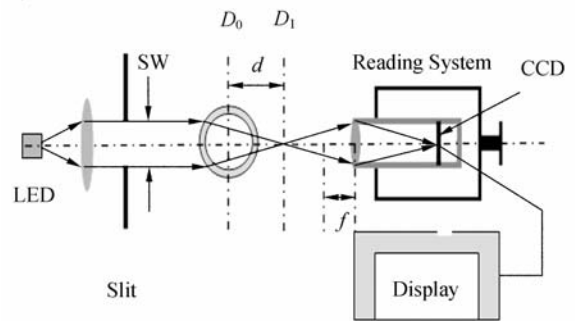


图 1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of measurement setup

本文采用了显微物镜结合面阵 CCD 对“焦线”位置成像的方法,与采用读数显微镜直接测量“焦线”位置的方法相比^[7],成像光斑在显微物镜上的尺寸超过其有效孔径,“焦线”通过显微物镜后在 CCD 成像位置的景深决定于显微物镜的数值孔径^[8],由此减小了系统的成像景深,系统对“焦线”位置的判断误差始终限制在 0.01 mm 范围内。

2.2 计算公式

2.2.1 毛细管管壁折射率计算公式

设 n 为标准液体的折射率, n_0 为毛细管管壁的折射率, r, R 为毛细管的内外径, D_1 为毛细管的焦线位置, D_0 为毛细管的管轴位置, $d = D_1 - D_0$ 为毛细管的焦距。由计算毛细管内待测液体折射率的计算公式^[9]: $n = 2n_0 R d / [2 / (R - r) + 2n_0 d r - n_0 R r]$,反解出毛细管管壁折射率满足如下计算公式:

$$n_0 = \frac{2dn(R-r)}{2Rd-2ndr+nRr} \quad (1)$$

2.2.2 毛细管管轴位置的精确标定

由式(1)可知,通过实验测量出参数 n, r, R 和 $d = D_1 - D_0$ 后,即可计算出毛细管管壁的折射率 n_0 。 n, r, R 和位置 D_1 可以准确测量得出,毛细管管轴位置 D_0 可通过测量毛细管外轮廓清晰像的位置来确定。由于平行光经过毛细管外壁边缘时的衍射效应,准确判断毛细管外轮廓清晰像

的位置 D_0 是困难的,由此造成了对 d 值测量的误差。为解决这个问题,本文采用标准液体折射率标定的方法,通过数学计算精确地标定出毛细管外轮廓的位置。具体方法如下:用两种已知折射率的标准液体标定管轴位置 D_0 ,设焦点到管轴的距离分别为 d_1 和 d_2 ,焦线位置分别 D_1 和 D_2 ,则有:

$$\begin{cases} d_1 = D_1 - D_0 \\ d_2 = D_2 - D_0 \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得到

$$\begin{cases} n_0 = \frac{2n_1(R-r)(D_1-D_0)}{2R(D_1-D_0)-2n_1r(D_1-D_0)+n_1Rr} \\ n_0 = \frac{2n_2(R-r)(D_2-D_0)}{2R(D_2-D_0)-2n_2r(D_2-D_0)+n_2Rr} \end{cases}, \quad (3)$$

其中, n_0 是待求玻璃管的折射率, r, R 是毛细管的内外半径, n_1 和 n_2 分别为已知两种标准液体的折射率。

整理上式便可得到关于管轴位置 D_0 的一元二次方程,即:

$$D_0^2 - (D_1 + D_2)D_0 + [D_1D_2 - \frac{n_1n_2(D_1 - D_2)}{2(n_2 - n_1)}] = 0, \quad (4)$$

分别测量两种标准液体的焦线位置 D_1 和 D_2 ,代入式(4)便可标定毛细管的管轴位置 D_0 以

及管壁折射率 n_0 (D_0 和 D_2, D_1 有相同的读数零点, D_0 取值的合理与否在带入式(3)计算后很容易判断)。

实验中,分别采用纯水、乙醇、乙二醇 3 种已知折射率的液体对管轴位置进行标定,即用水和乙醇,水和乙二醇,乙醇和乙二醇 3 组焦线测量值计算毛细管的管轴位置,最后对这组轮廓值取平均,便得到毛细管管轴位置。该方法避免了由于毛细管外壁边缘的衍射效应造成的测量误差,可靠且可行。

3 测量结果及注意事项

3.1 测量结果

实验中采用折射率已知的 3 种标准液体(纯水 n_1 为 1.333 5,乙醇 n_2 为 1.361 8,乙二醇 n_3 为 1.433 1)来标定毛细管的折射率。液体样品的折射率用 2WA-J 型阿贝折射计测量,折射率的测量误差为 0.000 2^[10]。

在不同材料的毛细管中,分别挑选两支壁厚均匀、同心度好的毛细管进行测量。用纯水、乙醇、乙二醇标定毛细玻璃管的管壁折射率 n_0 ,得到表 1 所示的测量结果:

表 1 不同材料玻璃毛细管的折射率

Tab. 1 Refractive indexes of glass capillaries with different materials

毛细管材料	管	毛细管参数/mm		测量结果		
		\bar{R}	\bar{r}	用纯水标定	用乙醇标定	用乙二醇标定
医用安培材料(掺 CaF_2)	管 1	0.617 8	0.487 7	1.411±0.003	1.414±0.004	1.413±0.007
	管 2	0.635 7	0.503 6	1.408±0.003	1.403±0.002	1.403±0.005
采血管(硼硅玻璃材料)	管 1	0.679 1	0.326 8	1.470±0.001	1.472±0.001	1.467±0.001
	管 2	0.668 0	0.305 8	1.470±0.001	1.470±0.001	1.471±0.001
有机玻璃(PMMA)	管 1	0.856 0	0.629 8	1.496±0.002	1.498±0.001	1.492±0.004
	管 2	0.943 1	0.678 3	1.494±0.001	1.494±0.001	1.507±0.001

由表 1 知,对同种材料的两只玻璃毛细管(管 1,管 2),虽然它们的内外径均有差别,而标定的 n_0 在误差允许的范围内可认为是相同的,这表明同种材料不同内外径的毛细管,对折射率 n_0 的测量无影响;对于不同材料毛细管管壁折射率的测量,用纯水作为标准液体进行标定的整体误差都控制在 0.003 以内,说明此实验装置可对不同材料的折射率进行精确测量。

3.2 注意事项

(1)试验在进行标准液体更换时,须清洗毛细管。先用清水冲洗后再用酒精冲洗,等酒精挥发干后,再加入另一种待测液体。测量顺序可按先测量易清洗液体后再测量难清洗液体的顺序,对于本实验来说,放入标准液体的测量顺序是纯水、乙醇、乙二醇;

(2)在清洗毛细管或在更换液体时,不触碰毛

细管,避免由于毛细管位置的改变,导致测量数据的失败;

(3)对光路进行调整时,必须保证所有光学器件的中心点在一条光路上,以保证光经过各个器件时不产生方向的偏折。本试验是用波长为 543.5 nm 激光器配合水平尺进行调节光路,调整好整个系统后,固定各个元器件,以免在测量过程中碰到某一器件,对测量结果造成影响。

4 测量结果的误差分析

由式(1)知,毛细管管壁折射率 n_0 与参数 n , r , R 和 d 值的测量误差直接相关。下面具体分析各个测量量对 n_0 值测量误差的影响。

4.1 标准液体折射率 n 对测量结果的影响

假设毛细管的其它参数不变,只考虑标准液体折射率 n 的变化,由 $\sigma_{n_0} = \sqrt{(\frac{\partial n_0}{\partial n})^2 \sigma_n^2}$, 及 $\frac{\partial n_0}{\partial n} =$

$$\frac{4Rd^2(R-r)}{(2Rd-2ndr+nRr)^2}$$
, 得到:

$$\sigma_{n_0} = \left| \frac{4Rd^2(R-r)}{(2Rd-2ndr+nRr)^2} \sigma_n \right|, \quad (5)$$

取 $R=0.6178$ mm, $r=0.4877$ mm, $d=1.195$ mm, $n=1.3618$ 。如果 σ_n 分别取 0.001, 0.002 和 0.003 mm, 则 σ_{n_0} 的值分别为 0.0051, 0.0102 和 0.0154。以上分析表明,液体折射率 n 对 n_0 的影响较大,要求所用标准液体的折射率必须十分准确。实验中所用的标准液体的测量精度为 0.0002, 即 $\sigma_n=0.0002$ 时, $\sigma_{n_0}=0.001$ 。故所使用的标准液体折射率的测量误差对管壁折射率计算结果的影响达到 0.001。

4.2 毛细管内外径 (r, R) 对测量结果的影响

由式(1)结合误差传递公式^[11], 假设其它量不变,只考虑毛细管内外径 R, r 得到:

$$\sigma_{n_0} = \sqrt{(\frac{\partial n_0}{\partial R})^2 \sigma_R^2 + (\frac{\partial n_0}{\partial r})^2 \sigma_r^2}, \quad (6)$$

(1)外径对折射率测量的影响

$$\text{由 } \sigma_{n_0} = \sqrt{(\frac{\partial n_0}{\partial R})^2 \sigma_R^2}$$

$$\frac{\partial n_0}{\partial R} = \frac{2dn(2dr+nr^2-2ndr)}{(2Rd-2ndr+nRr)^2}, \quad (7)$$

$$\text{得到 } \sigma_{n_0} = \left| \frac{2dn(2dr+nr^2-2ndr)}{(2Rd-2ndr+nRr)^2} \sigma_R \right|$$

取 $r=0.6178$ mm, $r=0.4877$ mm, $d=1.195$

mm, $n=1.3618$, 如果 σ_R 分别取 0.001, 0.002 和 0.003 mm, 则 σ_{n_0} 的值分别为 0.0046, 0.0091 和 0.0147。以上分析表明,外径测量精度对毛细管折射率 n_0 的计算有突出影响,要想精确测量毛细管管壁折射率,首先必须精确测量玻璃毛细管的外径 R 。对实验用读数显微镜,毛细管外径的测量精确为 0.001 mm, 那么外径测量误差对管壁折射率计算结果的影响在 0.005 以内。

取 $\sigma_R=0.001$ mm, n_0 为定值,那么 σ_{n_0} 与 R 的关系如图 2 所示:

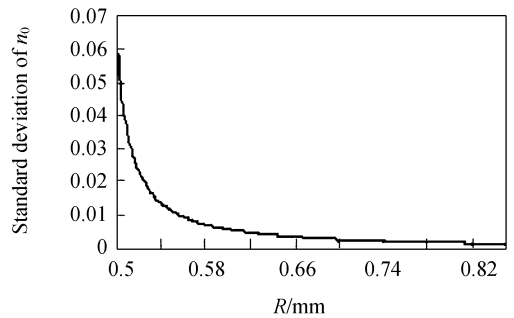


图 2 σ_{n_0} 与 R 的关系

Fig. 2 Relationship between σ_{n_0} and R

由图 2 知,在玻璃毛细管其它参数不变的情况下,增加毛细管的外径 R ,可以提高对毛细管管壁折射率的测量精度。

(2)内径对折射率测量的影响

$$\text{由 } \sigma_{n_0} = \sqrt{(\frac{\partial n_0}{\partial r})^2 \sigma_r^2}$$

$$\frac{\partial n_0}{\partial r} = \frac{2dn(2dRn-nR^2-2Rd)}{(2Rd-2ndr+nRr)^2}, \quad (8)$$

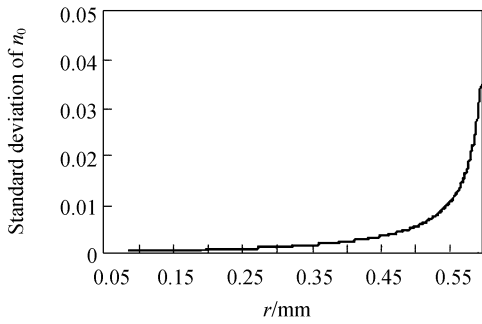
$$\text{得到 } \sigma_{n_0} = \left| \frac{2dn(2dRn-nR^2-2Rd)}{(2Rd-2ndr+nRr)^2} \sigma_r \right|$$

带入和 4.2.1 相同的数值,如果 σ_r 分别取 0.001, 0.002 和 0.003 mm, 则 σ_{n_0} 的值分别为 0.0045, 0.0091 和 0.0136。以上分析表明,内径 r 的测量精度对毛细管折射率 n_0 测量的影响和外径 R 的影响几乎一样。

同样取 $\sigma_r=0.001$, n_0 为定值,那么 σ_{n_0} 与 r 的关系如图 3 所示。

由图 3 知,在玻璃毛细管其它参数不变的情况下,减小毛细管的内径 r ,可以提高对毛细管折射率的测量精度。

通过分析毛细管内外径对毛细管折射率的影响可知:在其它实验条件不变的情况下,管壁较厚

图 3 σ_{n_0} 与 r 的关系Fig. 3 Relationship between σ_{n_0} and r

的毛细管的折射率测量精度相对较高(表 1 中管壁最厚的采血管管壁折射率的测量整体误差最小)。

4.3 成像景深与折射率灵敏度

4.3.1 景深计算

此方法所采用的实验装置已使经过毛细管后的光斑全部覆盖物镜的镜面(如图 1),则显微物镜的数值孔径即为有效孔径,把物镜的数值孔径 NA 为 0.25,LED 的中心波长 λ 为 580 nm 带入景深计算公式^[12] $L = \lambda / \text{NA}^2$ 中,有 $L = 9.28 \mu\text{m}$ 。可见,实验系统的成像景深在二维位移台的最小分度值(0.01 mm)以内。

4.3.2 灵敏度计算

毛细管管壁折射率变化 Δn_0 引起的 d 值变化 Δd 可由式(1)求出:

$$\frac{\Delta d}{\Delta n_0} = \frac{1}{n_0} \frac{d(2Rd - 2ndr + nRr)}{nRr}$$

设 $\Delta n_0 = 0.005$,定义折射率灵敏度为管壁折射率改变 0.005 所引起的 d 值变化量 Δd_s ,则有:

$$\Delta d_s = \frac{5}{n_0} \times \left[1 + \frac{2n}{nr} - \frac{2d}{R} \right] d. \quad (9)$$

4.3.3 景深与灵敏度对测量精度的影响

如果由折射率 n_0 变化 0.005 引起的 d 值变化量超过成像景深值,即 $\Delta d_s \geq L = 9.28 \mu\text{m}$,可以从理论上保证 $\Delta n_0 = 0.005$ 的测量精度,反之亦然。根据式(9)可以画出折射率灵敏度曲线,将景深值 $L = 9.28 \mu\text{m}$ 与灵敏度曲线比较见图 4。

由图 4 可知,用纯水作为标准液体对玻璃毛细管管壁折射率进行标定时,灵敏度大于景深值(曲线 1),测量精度优于 0.005;用乙醇进行标定时(曲线 2),在曲交点右边灵敏度大于景深值,即只有对管壁折射率 > 1.557 的毛细管进行标定

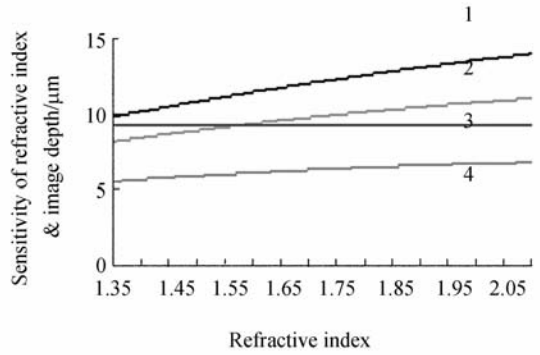


图 4 折射率灵敏度和景深值随待测管壁折射率的变化曲线(曲线 1, 2, 4 分别是用折射率为 1.333 5, 1.361 8, 1.433 1 的标准液体进行标定的计算曲线;曲线 3 为景深值曲线)

Fig. 4 Sensitivities of refractive indexes and image depths varied with refractive indexes of wall materials. (Curves 1, 2, 4 are obtained by calculating sensitivities of the refractive indexes of 1.335, 1.3618 and 1.4331 respectively, and curve 3 is the image depth line).

时,才能够保证 0.005 的测量精度;而用乙二醇进行标定时,灵敏度始终小于景深值(曲线 4),即选用乙二醇作为标准液体进行标定时,测量精度劣于 0.005。同时比较 3 组曲线也说明所用标准液体的折射率越低测量的灵敏度越高。

4.4 测量精度分析

通过以上内外径对毛细管管壁折射率测量精度的分析可知: $\sigma_r = 0.001 \text{ mm}$ 时, $\sigma_{n_0} = 0.0045$; $\sigma_R = 0.001 \text{ mm}$ 时, $\sigma_{n_0} = 0.0046$;也就是在毛细管内外径变化为 0.001 mm 时,对所测管壁折射率的影响都在 0.005 左右,而本实验所采用的光学读数显微镜对毛细管内外径的测量精度只能达到 0.001 mm,这也就限制了本实验对毛细管的测量精度在 0.005 左右。

5 结 论

介绍了一种无损测量毛细管管壁折射率的新方法,其折射率的测量精度达到 0.005。分析了毛细管内外径对管壁折射率测量的影响,结果表明,在对同一种材料毛细管管壁折射率进行标定时,管壁越厚测量精度越高。对测量毛细管管壁

折射率灵敏度和测量装置景深的计算以及比较表明,标准液体折射率越低,标定结果精度越高。该

测量方法在无损测量毛细管管壁折射率方面具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] <http://www.glassinfo.com.cn/>, 玻璃信息网 [OL].
<http://www.glassinfo.com.cn/>, the web of Chinese glass information [OL].
- [2] BJEUMIKHOV B, WEDELL R, BJEUMIKHOV S. Mono-and polycapillary optics-state of the art and applications[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(12):1932-1943.
- [3] 孟庆华, 向阳. 高精度测量光学玻璃折射率的新方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11):2114-2118.
MENG Q H, XIANG Y. Novel high accurate measurement method for refractive index of optical glass[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2114-2118. (in Chinese)
- [4] 井森. “测定玻璃折射率”全攻略[J]. *物理教学探讨*, 2009(9):37-40.
JING M. Measurement method for refractive index of glass[J]. *Journal of Physics Teaching*, 2009(9):37-40. (in Chinese)
- [5] 邢曼男, 白然, 普小云. 精确测量微量液体折射率的新方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7):1196-1202.
XING M N, BAI R, PU X Y. Novel measuring method for refractive index of micro-quantity liquid [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1196-1202. (in Chinese)
- [6] 王庆有, 全贵, 刘海军. 玻璃管参数的同步测量系统设计[J]. *电子测量技术*, 2007, 30(1):157-159.
WANG Q Y, JIN G, LIU H J. Synchronous measurement system of parameters of glass pipe [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(1):157-159. (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 [P]. 中国发明专利, 200710066016.2.
PU X Y, BAI R, XING M N, *et al.*. Measuring the refractive index of micro-quantity liquid by using glass capillary [P]. China, 200710066016.2. (in Chinese)
- [8] 郝道银, 谈恒英. 光学工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007(2):67-73.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007(2):67-73. (in Chinese)
- [9] 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.
LI Q, HAN G H, XING M N, *et al.*. Measuring refractive index of micro-quantity liquid by focus method [J]. *Acta Optical Sinica*, 2009, 29(9):2468-2472. (in Chinese)
- [10] 2WA-J型阿贝折射仪使用说明书, 上海光学仪器五厂生产.
2WA-J Abbe refractometer instruction manual, Shanghai Optical Instrument 5 production. (in Chinese)
- [11] 孟尔熹, 曹尔第, 编. 试验误差与数据处理 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988, 1:66-70.
MENG E X, CAO E D. *The Error of Experimentation and Disposal of Data* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1988, 1:66-70. (in Chinese)
- [12] SEONGSIK CHANG. *Lasing Characteristics of Deformed Micro cavities* [D]. Yale University, 1998:74-77.

作者简介:

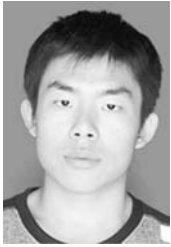


李强(1987—),男,云南昆明人,助教,2008年于云南大学获得学士学位,主要从事光学系统的成像及液体折射率测量方面的研究。E-mail: liqiang_ynu@126.com



苏光辉(1984—),男,河北邯郸人,2009年于云南大学获得学士学位,主要从事液体折射率测量方法的研究。E-mail: yundawuli@qq.com

导师简介:



张瑞凯(1987—),男,山东昌邑人,云南大学物理学专业学生。E-mail: 103151365@qq.com



孙丽存(1990—),女,山东济宁人,云南大学物理学专业学生。E-mail: 407102542@qq.com



普小云(1957—),男,云南昆明人,教授,博士生导师,1982年于云南大学获学士学位,1987年于中科院北京物理所获硕士学位,2000年于香港中文大学获博士学位,2001年至2002年在香港浸会大学从事博士后研究,现为云南大学物理科学技术学院副院长,主要从事光学和光电子学领域的科研和教学工作。E-mail: xyphu@163.com

● 下期预告

多模式组合修正大口径非球面环带误差

李俊峰^{1,2},宋淑梅¹,陈亚¹,宣斌^{1,2},王朋^{1,2},陈晓苹^{1,2},谢京江¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了满足大口径光学元件加工的需求,分析了多模式组合加工(MCM)技术对大口径非球面反射镜环带误差的处理。本文讨论的MCM技术以经典加工工艺为基础,采用抛光盘的多工位加工和抛光模式的组合完成光学元件的抛光,实现光学表面中低频段误差的有效控制。介绍了MCM技术的重要组成部分JP-01抛光机械手的工作原理,对MCM理论进行详细分析。采用MCM技术对 $\Phi 1230$ mm的非球面反射镜进行环带误差的修正,并给出镜面面形检测结果。实验结果表明:MCM技术可以精确控制光学表面的中低频误差,有效收敛光学表面误差,显著提高抛光效率。目前,采用MCM技术加工1~2 m级口径同轴非球面的精度可以稳定达到30 nm(RMS)水平。