

光谱范围从 365 至 12000nm 的高精度 光电自动折射仪

米宝永

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 介绍了由作者研制的光谱范围从 365 至 12000nm 的高精度光电自动折射仪的测量原理、主要误差源和仪器组成。用该仪器对包括红外材料锗在内的多种样品进行了测量,在小于 2600nm 和大于 2600nm 的波长范围内分别获得了优于 $\pm 3 \times 10^{-6}$ 和 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 的折射率测量精度。

关键词 折射仪 折射率 自动测量 垂直入射

1 引言

随着现代科学技术的发展,对在天文学、航天遥感及生物医学等诸多领域内应用的光学设备的质量要求愈来愈高,光谱范围愈来愈宽,因此,随着新品种高质量光学材料的研制,对光学材料进行折射率的精密测量是十分重要的。

许多人对折射率测量作了大量工作^[1~8],提出了许多有意义的测量方法,但精度偏低,仅限于 10^{-5} 量级。Heidenhain^[3] 研制的高精度测角仪可达到 1×10^{-6} 的折射率测量精度,但仅用于可见光范围。文献^[1~2] 也只能在 2600nm 范围以内进行 10^{-5} 量级的折射率测量。为了达到高精度并实现自动测量,我们采用了垂直照射封闭测量法,获得了满意的测量结果。

2 仪器的测量原理及主要误差源

由于垂直照射封闭测量法^[8] 测量精度高,而且易于实现自动化,故在我们所设计的仪器中得到了具体应用。

如图 1 所示,由准直光源发出的一束平行光与被测等边棱镜的 BC 面垂直入射,并经该面

出射, 其折射角为 φ , 测完折射角后, 将样品台按 120° 旋转两次, 使入射光束分别与样品的 AC 、 AB 两面垂直, 得出折射角 φ_1 、 φ_2 , 将测得的折射角平均值 $\varphi = (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) / 3$ 代入下式

$$n = \left[\frac{1}{3} \left(4 \sin^2 \frac{\varphi}{2} + 2 \sqrt{3} \sin \frac{\varphi}{2} + 3 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

即可求出被测样品的折射率^[9]。

为了分析测角误差对折射率的影响, 我们将上式对 φ 微分, 并令 $\frac{1}{6n} [2 \sin \varphi + \sqrt{3} \cos(\varphi/2)] = K$, 则得

$$dn = K d\varphi \quad (2)$$

对不同折射率值可求得相应的 K 值, 如表 1 所示。根据不同折射率测量精度的要求, 可计算出所要求的测角误差。

Table 1 K value for different the refractive indices

n	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
k	0.39	0.37	0.37	0.34	0.27	0.18

除角度测量误差外, 还存在着光束倾斜入射和光束不平行性引起的误差。图 2 为光束倾斜入射时的情况。实线和虚线分别代表垂直入射和具有 γ 倾角时的光线行迹, 可以计算出折射角的变化^[9] $\Delta\varphi$ 后代入 (2) 式求出具有倾角时的折射率测量误差。

用同样方法可求光束不平行对折射率的影响, 表 2 列出了测角误差为 1, 光束不平行偏差为 0.5, 入射光束的不垂直误差为 3 时所产生的折射率测量误差。从表中数据可知, 折射率值愈小, 测角误差影响愈大, 而倾斜误差则对折射率大的样品才有显著影响。而光束准直性的影响对不同材料的影响是基本一致的。

值得注意的是上述三种误差计算是建立在棱镜三个顶角相等的基础上的。而事实上, 棱镜的三个顶角不可能相等, 而存在着一定的加工误差。同样可以计算加工误差对折射率的影响, 但当加工误差小于 ± 1 时, 对测量精度不会产生明显影响。

由于用于照明的单色光是由连续光谱光源经光栅分光得到的, 因此对单色光的波长精度必须提出严格要求, 根据色散公式

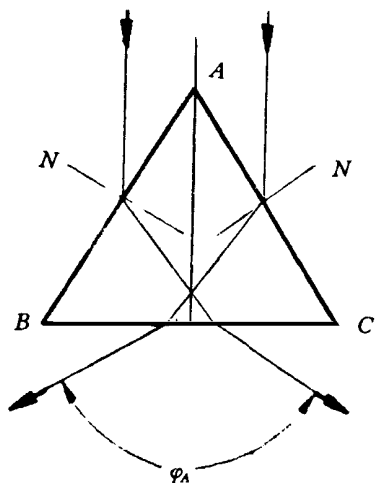


Fig 1 Schematic diagram of vertical illumination method

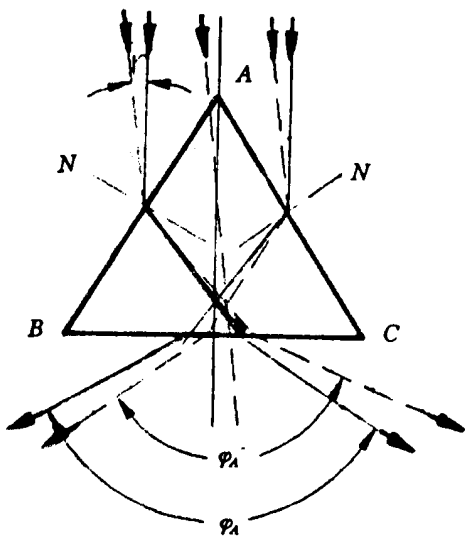


Fig 2 Condition of the beam illumination with inclination

Table 2 Error of the refractive indices is created by different source of error

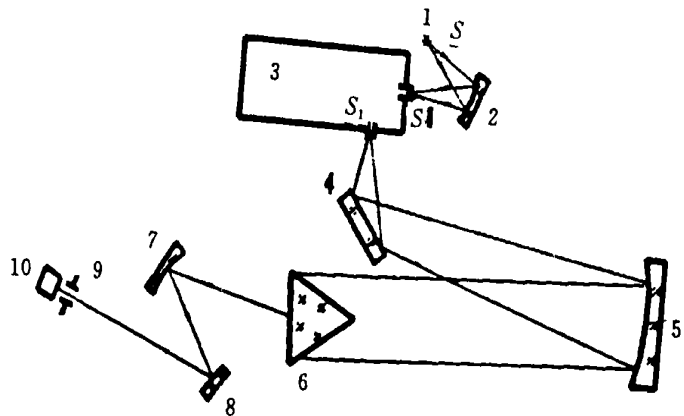
refractive indices source of error	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
measuring error of the refractive angle $\Delta Q \approx 1$	1.8	1.8	1.6	1.3	0.9
tilt angle $\gamma \approx 3$ for tilt incidence	0.34	0.36	0.44	0.43	0.96
parallelism of 0.5 for no-collimated	0.65	0.64	0.62	0.61	0.61
$\Delta n = [(\Delta n)^2]^{1/2} \times 10^{-6}$	1.94	1.94	1.77	1.50	1.45

$$n\lambda^2 = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^4 + A_3\lambda^6 + A_4\lambda^8 + A_5\lambda^{10} \quad (3)$$

式中 A_0, A_1, \dots, A_5 和 λ 分别表示色散系数和波长, 通过对 LaK₂ ($n_D = 1.699200$) 和 LaK₃ ($n_D = 1.746798$) 两种光学材料进行计算表明, 若单色仪存在着 $\pm 0.025\text{nm}$ 的波长误差时, 将产生 $\pm 1.8 \times 10^{-6}$ 的折射率测量误差。因此, 如要求折射率测量精度优于 $\pm 3 \times 10^{-6}$, 那么, 考虑到表 2 中的数据, 分光系统的波长重复性必须优于 $\pm 0.025\text{nm}$, 尤其在小于 400nm 波长范围内更应如此。波长准确性应定期由光谱灯的各谱线进行精确定标。

3 仪器组成及性能

仪器由波长范围从 365 至 12000nm 的单色准直光源、反射式光电瞄准系统, 具有 0.25 角秒分辨率和精度优于 0.5 角秒 (3 σ) 的摩尔光栅角度传感器以及以微计算机为核心的电子学控制系统等组成。仪器的光学系统原理示于图 3。光源 1、反射镜 2、4 及离轴抛物镜 5 组成了单色准直光系统, 由它发出的平行光投射到置于由步进机驱动样品台上的被测样品 6 上, 出射光被由离轴抛物镜 7、反射镜 8、振动狭缝 9 及三个可更换的探测器组



- 1 light source 2 spherical mirror 2 monochromator
- 5 7 off-axis paraboloidal mirror 6 SAMPLE prism
- 4 8 flat mirror 9 vibration slit 10 detection

Fig 3 Schematic of optical path for refractometer

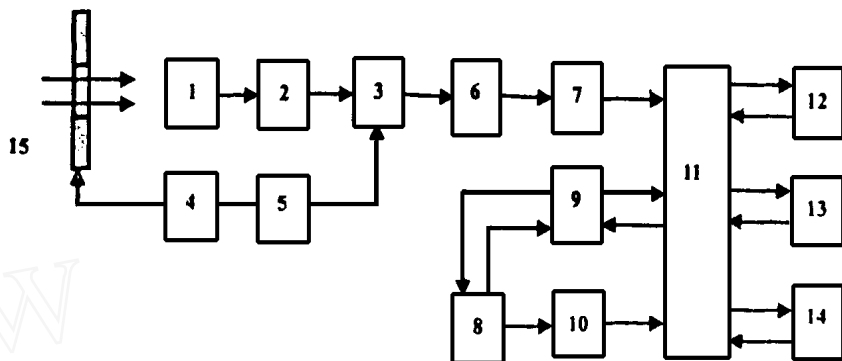
成的光电瞄准系统接收并转换成电信号。振动狭缝应严格置于光电瞄准系统的焦点上, 它是由具有 10^{-4} 量级的频率稳定性和 10^{-3} 量级的振幅稳定性的由特殊材料制的音叉驱动的。整个瞄

准系统和角度传感器的摩尔光栅牢固地安装在一起。当振动狭缝的振动中心和狭缝 S_2 的象的中心严格重合时,由探测器输的信号基波为零,此时的瞄准装置即瞄准了被测的出射光线,该光束的角位置可由光栅角度传感器的显示器指示出来。

摩尔光栅盘有两种运转方式:当在大范围内寻找出射光束时,光栅盘快速旋转;当寻到欲测光后,光栅盘则按 0.1 /步的当量由步进机驱动微动机构使瞄准系统在 ± 10 的范围内对被测光进行精密瞄准。

仪器设有三种探测器(光电倍增管、硫化铅和热释电)以适应从 365 至 12000nm 不同波段的需要。光源采用卤素灯和能斯特灯,分别用于小于 2900nm 和大于 2900nm 波段的测量。

仪器的电子学框图如图4所示。其中前置放大器、乘法器、移相器及积分器组成了低噪声锁相放大系统,用来提取探测器输出的非正弦信号中的基波分量。基波大小及相位反映了瞄准偏差量和方向,由于在瞄准点处的信号基波为零,且相位突变,因而比极值法瞄准精度高得多。实际上由于电路噪声的存在将限制了瞄准精度,因而欲达到 0.1 角秒的瞄准误差,电路的等效输入端噪声必须小于 1 微伏。



1 detector 2 pre-amp 3 multiplier 4 oscillator 5 phaser 6 integrator 7 AD convertor
8 grating sensor 9 motor control 10 paralleling interface 11 micro computer
12 printer 13 CRT 14 disk 15 vibration slit

Fig 4 Block of electronics

计算机通过 12 位双极性AD变换器和并行I/O接口采集由锁相放大系统输出的光电瞄准信号和角度传感器输出的角度信号,确定被测光束的角位置。瞄准装置在软件控制下自动寻找被测光,自动调整样品到垂直状态,自动识别反射光、折射光和非偏光,控制四台电机及相应的执行机构完成各种测量动作,以及数据的自动处理和环境因素的校正。

4 测量结果及评价

我们在 365 至 12000nm 光谱范围内对 $n = 1.41$ 至 1.76 的大量光学材料进行了测量。在小于 2600nm 的光谱范围内获得了优于 $\pm 3 \times 10^{-6}$ 甚至达到了 $\pm 5 \times 10^{-7}$ 的重复精度。在大于 2600nm 的光谱范围内,达到了 $\pm 2 \times 10^{-5}$ 的重复精度。为了评价仪器的稳定性和准确性,我们在不同时间测量了不同样品,并和联邦德国K. J. Resenbruch教授测量过的同一号玻璃进行

Table 3 Measuring result of China and Gemany

$\lambda(\text{nm})$	930429	930503	930507	data are measured by Gem ay
435.8	1.526863	1.526863	1.526861	1.5268641
	1.526860	1.526865	1.526861	
	1.526862	1.526863	1.526861	
	$\bar{N} = 1.526862$	$\bar{N} = 1.526864$	$\bar{N} = 1.526861$	
480.0	1.5230015	1.5230023	1.5230035	1.5230023
	1.5230012	1.5230048	1.5230034	
	1.5229995	1.5230043	1.5230046	
	$\bar{N} = 1.5230007$	$\bar{N} = 1.5230038$	$\bar{N} = 1.5230038$	
546.1	1.5188896	1.5188891	1.5188905	1.5148815
	1.5188893	1.5188893	1.5188891	
	1.5188893	1.5188893	1.5188891	
	$\bar{N} = 1.5188894$	$\bar{N} = 1.5188892$	$\bar{N} = 1.5188896$	
643.8	1.514883	1.514883	1.514883	1.5148815
	1.514881	1.514885	1.514881	
	1.514882	1.514883	1.514881	
	$\bar{N} = 1.514882$	$\bar{N} = 1.5148837$	$\bar{N} = 1.5148817$	

了比较。由于篇幅所限,表3中只列出了由成都光明器材厂提供的K9样品的测量结果。表中数据清楚说明了仪器具有较好的稳定性和准确性。表4给出了用任意偏折角法^[7]对北京有色金属研究院研制的Ge进行的测试结果(表中数据已进行了温度修正),这表明该仪器也可以用来对高折射率的材料进行测量。

Table 4 Measuring result for Ge sample (P = 750mmHg)

$\lambda(\mu)$	5	6	7	8	9	10
n	4.01510	4.00987	4.00738	4.00513	4.00386	4.00324
repeatability σ	2×10^{-5}	2×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	7×10^{-5}

本工作是和韩昌元、段文琴、曹甲彻、李有芝等同志合作下进行的,并得到了丁林辉同志的帮助,在此一致表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Debenham M ary, Dew G D, Putland D E. An improved recording refractometer for optical glasses in the wavelength range 300 to 2600 nm. OPTICA ACTA, 1979, 26(12): 1487~ 1503
- 2 Wood D L, Fleming J W, Jr. Computerized refractive index measurement for bulk materials at UV, visible, and IR wavelengths Rev Sci Instrum, 1982, 53(1), Jan: 43~ 47
- 3 Heidenhain J. Das neue pr zisions-Gonimeter Zur Brechzahlmessung in der physikalisch-Technischen Bun-

- desanstalt Meßtechnische Information, 8 Ausgabe, März, 1980
- 4 Bhattacharya J C. Refractive index measurement Optics and Laser Technology, 1987, 19(1): 29~ 32
 - 5 Karyn Z, Kafri O. Refractive index measurement by more deflectometry. Appl Opt. 1982, 21(18): 3326~ 3328
 - 6 Edwin R P, Dudemmel M T, Lamare M. Refractive index measurements of ten germanium samples Appl Opt, 1982, 21(5): 878~ 881
 - 7 苏大图等编 光学测量与像质鉴定 北京: 北京工业学院出版社, 1988
 - 8 苏大图等 一种高精度测量光学玻璃折射率和色散的方法 全国光学测试学术交流会论文, 南京, 1986 8
 - 9 米宝永 高精度红外自动折射仪 宇航学会计量测试学术交流会论文, 桂林, 1987, 10

Photoelectric Automatic Refractometer with High Precision in the Wavelength Range 365 to 12000nm

M I Bao-Yong

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes measuring principle of the photo-electric automatic refractometer with high precision in the wavelength range 365 to 12000nm and its construction and discusses the sources of error. The refractive indices of different optical materials are measured with this instrument. The measuring uncertainties of better than 3×10^{-6} and 3×10^{-5} in the wavelength range of 365 to 2600 nm and 2600 to 12000 nm are obtained, respectively.

Key words: Refractometer, Refractive index, Automatic measurement, Vertical illumination

米宝永 男, 副研究员, 硕士生导师, 1964年毕业于北京理工大学。长期从事微弱信号处理和高精度光电测量仪器的研究工作。曾先后主持了光学膜厚动态监控仪、高精度光电自动折射仪、等离子刻蚀终点检测仪、短波段光子计数器、非接触 X 射线低噪声应力测头等的研制工作, 参加了极紫外光栅摄谱仪、太阳紫外光谱监视器, 大气臭氧垂直分布探测仪等多项课题的研究工作。先后获中科院科技进步二等奖一项, 三等奖两项, 1991 获电子工业部“七五”科技攻关先进个人荣誉奖一项, 1991 年度电子工业部优秀成果奖一项。在国内外核心期刊上发表论文 20 余篇。