

线偏振光反射法测量介质材料折射率的方法

王泽斌 周进朝 黄佐华

(华南师范大学物理与电信工程学院量子信息技术实验室, 广东 广州 510006)

摘要 依据线偏振光反射原理, 实现了对介质折射率的测量。使用高准直半导体激光器激光入射到待测样品表面, 逐步旋转样品或改变样品表面的入射角, 得到待测样品反射光强随入射角变化的关系曲线; 当用 p 线偏振光入射时, 曲线上有一光强随入射角的变化趋近于零的点, 其对应入射角为布儒斯特角, 由线偏振光反射原理可求得样品折射率。用此方法测量了玻璃和棱镜的折射率, 测量的结果偏差控制在 1×10^{-3} 量级, 测量的重复性比较好。

关键词 测量; 折射率; 偏振光; 反射光强

中图分类号 O443

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.121204

Measuring Refractive Index of Medium Based on Reflectance Curve of Linearly Polarized Light

Wang Zebin Zhou Jinzhao Huang Zuohua

(Laboratory of Quantum Information Technology, School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract Based on the principle of the reflection of polarized light, the measurement of refractive index of the medium is achieved. The highly collimated diode laser is incident on the surface of samples. By gradually rotating the sample or changing the angle of incidence of the sample surface, the relation curves of the test samples' reflected light intensity versus the incident angle is obtained. When p polarized light is used, there is an incident angle at which the changing rate of the curve approaches zero. The corresponding angle of incidence is called the Brewster angle. According to the principle of the reflection of polarized light, the sample refractive index can be figured out. We use this method to measure the refractive in dices of glass sample and a prism. The deviation of measurement result is at the order of magnitude of 1×10^{-3} , and the measurement repeatability is pretty good.

Key words measurement; refractive index; polarized light; reflected light intensity

OCIS codes 120.5700; 120.5710; 120.4640; 120.1880; 260.2130

1 引言

折射率是介质材料的主要光学参数之一, 其测量在工业生产和实验研究中具有重要意义。目前折射率的测量方法众多, 光学方法则是应用最广泛的方法之一。基于光学的测量方法又分为多种, 如最小偏向角法、布儒斯特角法^[2]、激光干涉法、椭圆偏振法^[3~5]、全反射法^[6]等。这些方法各有不同的测量精度及测量过程, 但一般都可以归结为测角法。它们都有一定的局限性, 若要自动检测, 不仅工序繁琐而且有主观误差, 还需要一套精密测量的光学仪器系统。为此, 本文提出了一种基于线偏振光反射原理的方法。在本实验测量方法中, 样品被放置在 $\theta/2\theta$ 转角仪旋转台上, 转台的转速及数据采集都由计算机来控制, 逐步旋转待测介质的入射角, 用探测器同步跟踪探测介质表面线偏振光(p 光)的反射光强, 通过计算机采集数据得到反射

收稿日期: 2012-08-03; 收到修改稿日期: 2012-08-30; 网络出版日期: 2012-11-02

基金项目: 广东省科技计划(C60109, 2006B12901020)资助课题。

作者简介: 王泽斌(1987—), 硕士研究生, 主要从事光电技术与系统、薄膜测量技术和激光参数测量技术等方面的研究。

E-mail: wangzebin.2008@163.com

导师简介: 黄佐华(1961—), 男, 教授, 主要从事光信息处理、光电技术与系统、椭圆偏振测量技术、相位物体成像及光声光谱技术等方面的研究。E-mail: zuohuah@163.com(通信联系人)

光强或反射率随入射角变化的关系曲线;当用 p 光入射时,曲线上光强随入射角的变化逐步趋近于零的点,其对应入射角为布儒斯特角,由线偏振光反射原理可得到介质材料的折射率。

2 实验测量原理

光入射到介质表面时,其在入射界面上可以分解为光矢量平行于入射面的偏振光(p 光)和光矢量垂直于入射面的偏振光(s 光)。根据菲涅耳公式,p 光的振幅反射公式为

$$r_p = \frac{E'_1}{E_1} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (1)$$

式中 r_p 为 p 光的振幅反射系数, E_1 为入射光的电矢量振幅, E'_1 为反射光的电矢量振幅, θ_1 为入射角, θ_2 为折射角。p 光反射与折射时的电磁矢量如图 1 所示。

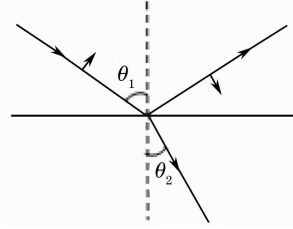


图 1 p 偏振光反射与折射时的电磁矢量图
Fig. 1 Electromagnetic vector plot of reflection and refraction of p polarized light

由(1)式可知,当 $\theta_1 + \theta_2 = \frac{\pi}{2}$ 时, $\tan(\theta_1 + \theta_2) \rightarrow \infty$,

p 光的振幅反射系数 $r_p = 0$, 反射光没有 p 光只有 s 光,此时为完全偏振光,满足这一条件的入射角叫作布儒斯特角,记为 θ_B 。根据折射定律可知,所测介质的折射率为

$$n = \tan \theta_B. \quad (2)$$

3 实验装置与测量结果

3.1 实验光路及装置

实验测量是在具备 $\theta/2\theta$ 转角仪和自动采集、处理数据功能的实验平台上进行的,并采取相应的光路布置。测试系统主要由光路系统、控制与采集系统和计算机 3 部分组成,原理图如图 2 所示。光源为带准直器的半导体激光器(波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$),通过小孔滤除边缘光束,经过起偏器后成为偏振光(可选 TE 模式或 TM 模式),经过半反半透镜,再经过小孔进一步滤除边缘光束,入射到样品表面,样品放在 $\theta/2\theta$ 转台上,样品每转动 θ 角,反射光线转动 2θ 角。探测器 1 与外转盘相连,能够保证探测器时刻跟踪反射光。由计算机控制的步进电机驱动样品的扫描,探测器接收的光强信号放大处理后经过模数(A/D)转换卡进入计算机,得到反射光强与入射角关系的扫描曲线。半反半透镜用来作光路自准,开始测量时,使入射光与棱镜表面垂直,此时棱镜的反射光沿原路返回,经过半反半透镜反射后经透镜会聚到探测器 2 上,在程序中扫描出反射光的最强点判断为起始点,曲线上给出的入射角度都以此自准点为基础。

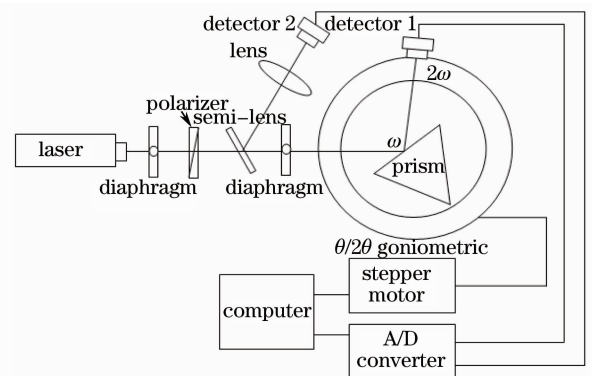


图 2 实验装置
Fig. 2 Experimental setup

3.2 介质折射率的测量过程

对于介质折射率的测量,首先扫描出反射光强随入射角变化的关系曲线,找出 p 光反射光强对应点的入射角度,测量时应尽量避免样品后表面反射光的影响。图 3 为玻璃表面反射光路原理图;下面以棱镜折射率的测量为例进行实验测量,其光路原理如图 4 所示。

具体测量过程如下:调节样品平台水平放置,选用起偏器 TM 测量模式,确定 p 线偏振光垂直通过介质表面,开始测量时,使入射光垂直入射到样品表面,转动电机,使探测器 2 正反扫描,找到光强最强点(波峰处)作为测量起始自准点,当介质表面反射光偏转过一定角度时,移上探测器 1 使其能够实时追踪介质表面反射光强,逐步旋转转台或改变介质表面的入射角,可得到该线偏振光反射光强与入射角关系的扫描曲线。

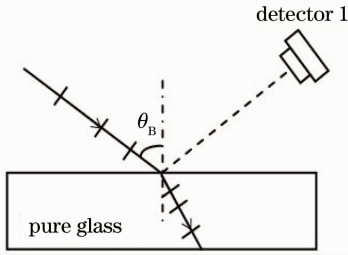


图3 玻璃表面反射光路原理图

Fig. 3 Reflected light path at the glass surface

图5为测量棱镜1(分光计法测量得折射率 $n_{p2}=1.6418$)表面的反射光强随入射角变化的关系曲线。测量入射角角度值都是相对于起始自准点。由于该装置的样品转台和外探测器的转动全程由计算机自动控制,实现数据的实时自动采集,因此可以有效提高测量的准确度。

利用软件上的数据处理函数对扫描曲线进行平滑,用以消除测量时所产生的波动噪声,并在扫描曲线纵坐标光强最小处附近寻出光强的极小值点坐标 (θ, I) ,确定所测棱镜转动的角度。由于测量角度都是相对于起始自准点,系统自带软件测量曲线的默认开始角度为 60° ,因此实验所得到的棱镜表面入射布儒斯特角为

$$\theta_B = \theta - 60^\circ. \quad (3)$$

将所得偏转角度代入(2)式可得介质的折射率。

3.3 测量结果及误差分析

实验测量了薄玻璃、大棱镜1和小棱镜2的折射率,得到的测量数据及处理结果如表1所列,其中 $\sigma_n =$

$\sqrt{\frac{\sum (n_i - \bar{n}_p)^2}{k(k-1)}}$ 为标准不确定度。由表1可知折射率平均值及测量值的偏差,对于玻璃为 $n_1 = 1.5710 \pm 0.0048$,对于大棱镜1为 $n_2 = 1.6280 \pm 0.0068$,对于小棱镜2为 $n_3 = 1.6647 \pm 0.0084$ 。可见,测量所得各材料的测量值之间的偏差比较小,不确定度在 10^{-3} 量级,重复性比较好,实验测量得到了有益的结果。

表1 样品的测量结果

Table 1 Measurement results of the samples

Sample	Glass		Prism 1		Prism 2	
	θ_1	n_1	θ_2	n_2	θ_3	n_3
1	117.6783	1.5805	118.1264	1.6082	118.7167	1.6458
2	117.4325	1.5656	118.5442	1.6347	119.1193	1.6722
3	117.5872	1.5750	118.2956	1.6189	119.4214	1.6923
4	117.6554	1.5791	118.4798	1.6306	118.7753	1.6496
5	117.2543	1.5549	118.7465	1.6477	118.9876	1.6635
\bar{n}_p	1.5710		1.6280		1.6647	
σ_n	0.0048		0.0068		0.0084	
Measurement temperature / °C	24					

为验证测量结果的准确度,分别采用移测显微镜法测得薄玻璃折射率为 $n_{p1}=1.5458$;分光计法测得大三棱镜1折射率为 $n_{p2}=1.6418$ 和小三棱镜2折射率为 $n_{p3}=1.6436$ 。与表1比较,结果表明,在本实验平台上采用该方法的测量精度是有保障的,得到的结果是可信的。

要实现对介质折射率的精确测量,主要取决于布儒斯特角 θ_B 的确定。根据误差理论可给出 n_p 的绝对误差公式:

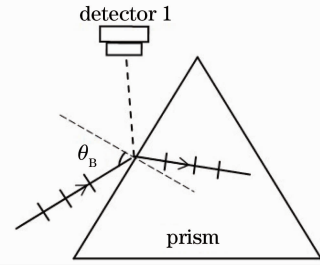


图4 棱镜表面反射光路原理图

Fig. 4 Reflected light path at the prism surface

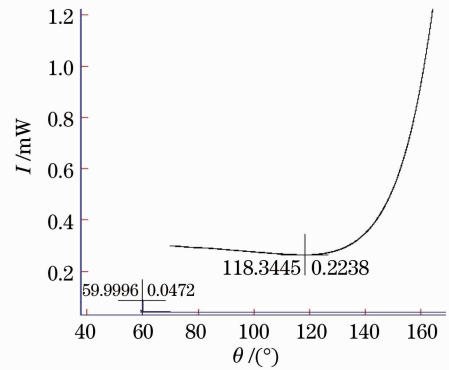


图5 线偏振光的反射光强与入射角的关系曲线

Fig. 5 Relation between the reflected light intensity and the incident angle for linearly polarized light

$$\Delta n_p = \sec^2 \theta_B \Delta \theta_B. \quad (4)$$

实验中, θ_B 值是由仪器扫描线偏振光反射光强与入射角的关系曲线确定的, 测量 θ_B 值的误差主要受转台精度、激光器的稳定度和入射角测量精度的影响。其中转台精度为 $\pm 2'$, 而角度和光强测量是由软件直接定位出反射光强随入射角变化的关系曲线所得。由于光源固有的不稳定性质和测量介质情况会使测量曲线有一定的波动噪声, 对测量谱线的平滑度有较大的影响, 这都会影响 θ_B 的准确度。不过本次实验平台采用高准直的半导体激光($\lambda=650$ nm、发散度小于 1 mrad、稳定度为 0.0017)作光源, 扫描全程采用计算机控制、自动采集并处理数据, 这有力地提高了测量的精度。实验结果表明: 在此实验平台上采用该方法测量, 能够控制测量结果的偏差在 1×10^{-3} 量级。测量的重复性比较好, 测量结果接近于其他测量方法所得数据。

4 结 论

根据线偏振光反射原理, 扫描样品表面 p 光反射光强随入射角的变化曲线, 实现了对介质折射率的测量。实验平台的转台转速及数据采集都由计算机自动控制, 大大提高了测量精度。该方法的测量精度虽然没有棱镜耦合法^[7]、最小偏向角法等方法的测量精度高, 但所测数据的误差还是比较合理的。另外, 此方法由于采用直接探测介质表面反射光强随入射角变化的关系曲线, 因此具备了操作简单、结果直观、可同时测量透明和非透明材料的折射率等优点。

参 考 文 献

- 1 D. C. Yin, Y. Inatomi. Measurement of refractive index of gap crystal over a large temperature range using interferometry [J]. *Crystal Research and Technology*, 2000, **35**(1): 221~228
- 2 Wei Maojing, Yang Weiwei, Liu Degong. The research on measuring refractive index of medium based on reflectivity of linear polarized light[J]. *J. Applied Optics*, 2010, **31**(1): 100~104
魏茂金, 杨薇薇, 刘德功. 基于线偏振光反射率测量介质折射率的研究[J]. *应用光学*, 2010, **31**(1): 100~104
- 3 Huang Zuohua, He Zhenjiang. The optical methods for measuring the thickness and refractive index of thin films[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2003, (4): 42~44
黄佐华, 何振江. 测量薄膜厚度及其折射率的光学方法[J]. *现代科学仪器*, 2003, (4): 42~44
- 4 Yang Kun, Wang Xiangzhao, Bu Yang. Research progress of ellipsometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(3): 43~49
杨 坤, 王向朝, 步 扬. 椭偏仪的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(3): 43~49
- 5 Huang Zuohua, He Zhenjiang, Yang Guanling *et al.*. The multifunctional ellipsometer[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(5): 432~434
黄佐华, 何振江, 杨冠玲 等. 多功能椭偏测厚仪[J]. *光学技术*, 2001, **27**(5): 432~434
- 6 Cheng Shuying, Shen Hongyuan, Zhang Ge *et al.*. A simple measurement method of the refractive index of biotissue[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 450~454
程树英, 沈鸿元, 张 戈 等. 一种简单的测量生物组织折射率的方法[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5): 450~454
- 7 Zhao Xiaoxiang, Xu Zhengquan. Measurement of refractive index of substrate materials[J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(6): 426~429
赵孝祥, 许政权. 利用棱镜耦合器测量光波导衬底的折射率[J]. *中国激光*, 1992, **A19**(6): 426~429
- 8 Yang Tianxin, Zou Hao, Wang Lei *et al.*. Determining the graded-index profiles of channel waveguides by prism coupling method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 689~695
杨天新, 邹 豪, 王 雷 等. 棱镜耦合法确定条形波导的渐变折射率分布[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 689~695
- 9 Tami Kihara, Kiyoshi Yokomori. Simultaneous measurement of refractive index and thickness of thin film by polarized reflectances [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(34): 5069~5073
- 10 Deng Guang'an, Cai Zhigang, Zhang Yunhua *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
- 11 L. Wood, J. W. Fleming. Computerized refractive index measurement for bulk materials at UV, visible, and IR wavelengths[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1982, **53**(1): 43~47
- 12 Sun Zhongqiu, Zhao Yunsheng, Yan Guoqian *et al.*. Further study on calculating the density of seawater with polarized

- light technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2452~2458
- 孙仲秋, 赵云升, 阎国情 等. 利用偏振光技术计算海水密度的深入研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2452~2458
- 13 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
- 14 Wei Haoming, Xing Tingwen, Li Yun *et al.*. Measurement errors in 632.8 nm high precision phase-shifting Fizeau interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041202
- 魏豪明, 邢廷文, 李 云 等. 632.8 nm 高精度移相菲佐干涉仪测量误差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 041202
- 15 Hong Minfang, Shen Jianqi, Zhang Qiuchang *et al.*. Propagation of Gaussian beam through plannar interface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702005
- 洪敏芳, 沈建琪, 张秋长 等. 高斯光束垂直入射到不同折射率介质中的传播规律[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702005