

基于短相干技术的光学平板折射率测量方法

高波*, 李强, 刘昂, 柴立群

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 为测量光学平板玻璃折射率, 提出一种改进的基于迈克耳孙原理的折射率测量方法。利用短相干光源的空间相干性, 结合距离测量工具, 可准确获得光学间隔间的距离。分别测量放入样品前后以及按照一定角度旋转样品后的光学距离, 同时利用折射定律, 可以计算得到光学平板玻璃的折射率。提出了一种迭代计算方法, 不需要直接求解一元四次方程, 实现了折射率的快速计算。分析距离和角度测量误差以及样品平行度引入的误差可知, 本文方法折射率测量误差优于 5×10^{-5} 。与 V 棱镜折射率测量方法进行比较, 结果验证了本文方法的正确性。

关键词 测量; 迈克耳孙干涉; 短相干; 迭代算法; 折射率测量

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0804004

Measuring Refractive Index of Transparent Plate by Low-Coherent Interference

Gao Bo*, Li Qiang, Liu Ang, Chai Liqun

Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract In order to measure the refractive index of transparent plate, an improved method based on the Michelson principle is proposed. Using the spatial coherence of low-coherent light sources and distance measurement tools, the distance between optical intervals can be accurately obtained. The optical distances before and after placing the sample and after rotating the sample at a certain angle are measured, respectively. Hence, the refractive index of the optical glass plate can be calculated by using the law of refraction. An iterative algorithm is proposed to avoid directly solving the quaternary equation of one variable and realize fast calculation of the refractive index. By analyzing the measurement errors of distance, angle, and parallelism of the sample, it is found that the refractive index measurement error of the proposed method is better than 5×10^{-5} . The comparison result with the V-prism refractive index measurement method verifies the correctness of the proposed method.

Key words measurement; Michelson interference; low-coherent interference; iterative algorithm; measurement of refractive index

OCIS codes 120.3180; 160.4670; 120.3940

1 引言

航空、航天和天文学等领域的发展, 提高了对光学系统质量和精度的要求。为保证光学系统成像质量, 精确测量光学玻璃材料折射率变得越来越重要。大口径平行平板类元件广泛应用于惯性约束聚变、天文探测系统等大型光学装置中。折射率是该类元件的一项重要指标, 折射率与设计值不匹配将直接影响光束质量和成像质量。常用的折射率测量方法主要分为测角法^[1-2]、干涉法^[3]及其他方法^[4]。测角法一般需要将样品中用于测量的部分加工为垂直角

或其他角度。代表性测量方法有最小偏向角法^[5]、直角准直法^[6]以及 V 棱镜法^[7]。干涉法主要有迈克耳孙干涉法和法布里-珀罗 (FP) 干涉法^[8], 其测量对象一般为平行平板样品。

FP 干涉法通过分析经过平行平板样品前后干涉条纹的差异, 从而计算得到样品折射率, 该方法测量精度受限于样品厚度的测量精度。Choi 等^[9]提出采样双波长 FP 干涉方法, 并将此方法用于测量平行平板样品折射率, 测量精度可达 10^{-5} 。该方法测量精度受限于样品加工平行度。

迈克耳孙干涉法作为另外一种测量平行平板样

收稿日期: 2019-02-27; 修回日期: 2019-04-11; 录用日期: 2019-04-19

基金项目: 中国工程物理研究院项目 (GFZX02050102.1)

* E-mail: 48491061@qq.com

品折射率的方法^[10-12],其原理是利用迈克耳孙等臂干涉原理,将测量样品放入其中一组干涉光路中,旋转样品,所得干涉图将随旋转角度的变化发生变化。分析干涉图,计算得到样品折射率。该方法测得的折射率主要与样品厚度、变化角度和入射光波长相关。受限于样品厚度的测量精度,该方法的测量精度一般为 10^{-3} 。

短相干技术由于其相干长度短的特征,广泛应用于厚度和表面形貌的高精度测量^[13-15]。本文提出一种经过改进的基于迈克耳孙原理的折射率测量方法,利用短相干光源相干长度短的特征,通过旋转样品获得旋转前后光程变化,利用得到的光程和旋转

角度可计算得到样品折射率。

2 基本原理

2.1 测量原理

大口径平行平板玻璃折射率检测原理示意图如图1所示。短相干光源发出的光经分光棱镜后变为两束光,其中一束光经分光棱镜 90° 反射后到达参考反射镜,另一束光透过分光棱镜后到达反射镜。由于短相干光源的相干长度较短,因此需移动参考反射镜,当参考光路光程与测量光路光程一致时,可探测到干涉条纹。参考镜移动距离可通过光栅尺给出。使用该方法可探测测量光路中不同界面之间的光程。

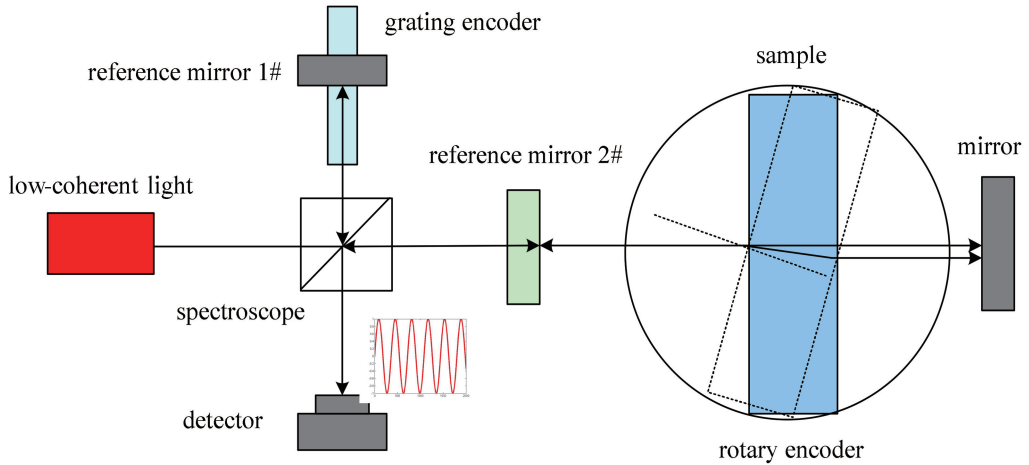


图1 大口径平行平板玻璃折射率检测原理示意图

Fig. 1 Schematic of measuring the refractive index for large parallel glass plate

如图2所示,放入样品前可测量参考镜2#与反射镜之间的光程 L ,放入样品后使样品垂直于光束,可测量样品前后表面光程

$$L_1 = nh, \quad (1)$$

式中: n 为样品在该波长下的折射率; h 为样品厚度。

如图2所示,假设以光线入射到样品的入射点为圆心 O 使样品旋转角度 i ,旋转角度 i 可通过角度编码盘测量得到。光线通过样品后的偏折角度与样品折射率和入射角度相关,由几何关系可知 $OA = OD = h$,因此 $BD = AB$ 。

折射光线传播方向有下列三种情况:当 $n = 2\cos(i/2)$ 时,折射光线沿 OB 方向传播;当 $n > 2\cos(i/2)$ 时,折射光线在 OB 下方传播;当 $n < 2\cos(i/2)$ 时,折射光线在 OB 上方传播。旋转后参考镜2#与反射镜之间光程 L_2 满足

$$L_2 = L + \frac{nh - h\cos(i - \theta)}{\cos\theta}, \quad (2)$$

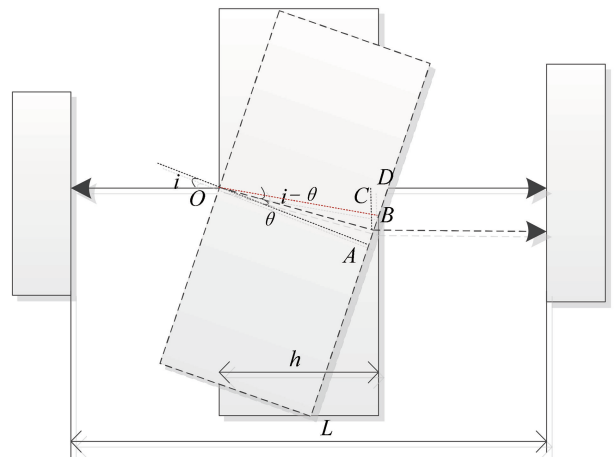


图2 旋转样品后光路示意图

Fig. 2 Optical path diagram after sample rotation

式中: θ 为折射角。

由(1)式和(2)式可消掉 h ,得到折射率 n 与入射角 i 和折射角 θ 的关系为

$$n = \frac{L_1 \cos(i - \theta)}{L_1 + (L - L_2) \cos\theta}. \quad (3)$$

由几何关系可知入射角与旋转样品角度相等,根据折射定律可得

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\sin i}{n}\right). \quad (4)$$

由(3)式和(4)式以及三角函数关系 $\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$ 可求解得到折射率 n 。

2.2 距离测量位置判断

假设参考光路与测试光路光程差为 Δd ,参考光路和测试光路返回的光强分别为 I_1 和 I_2 ,测量光频率为 ν ,则探测器探测得到的光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\nu \Delta d). \quad (5)$$

假设 $I_1 = I_2 = 0.5$,则(5)式可简化为

$$I = 1 + \cos(\nu \Delta d). \quad (6)$$

考虑光源的光谱信号为高斯函数:

$$P(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta\nu} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_0}{\sqrt{2} \Delta\nu}\right)^2\right], \quad (7)$$

式中: $\nu_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为中心频率; $\Delta\nu$ 为光谱宽度。干涉光强可认为是光谱范围内所有单色光干涉光强的叠加,因此干涉光强可表示为

$$I(\Delta d) = \int_0^\infty P(\nu) [1 + \cos(\nu \Delta d)] d\nu, \quad (8)$$

求解可得

$$I(\Delta d) = 1 + \exp\left[-\left(\frac{4\Delta d}{d_c}\right)^2\right] \cos(\nu_0 \Delta d), \quad (9)$$

式中: $d_c = \lambda_0^2/\Delta\lambda$ 为光源相干长度。设光源中心波长 $\lambda_0 = 1310$ nm,光谱宽度 $\Delta\lambda = 50$ nm,则光源的相干长度 $d_c = 34.322$ μm 。由此可得参考光路与测试光路光程差 Δd 与光强调制幅度的关系曲线,如图3所示。

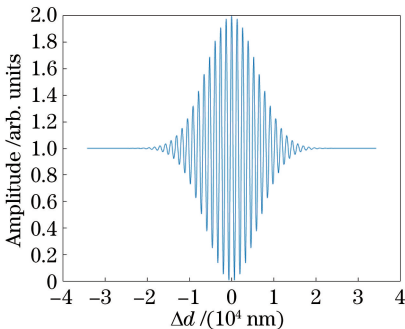


图3 光强调制幅度与参考光路和测试光路光程差之间的关系

Fig. 3 Intensity modulation versus optical path difference between the reference and test paths

利用光源相干长度短的特性,仅当测试光与参考光光程相当时,探测器才能探测到干涉条纹;当干涉条纹为零条纹时,测试光与参考光光程完全相等。

2.3 折射率迭代计算方法

直接由(3)式和(4)式计算折射率需要求解一元四次方程,过程复杂。为简便计算流程,快速获得样品折射率,拟通过迭代计算的方法实现。迭代流程如图4所示。迭代计算步骤如下:

- 1) 设定折射率初始值为1;
- 2) 由(4)式计算得到此时的折射角 θ ;
- 3) 将计算得到的折射角 θ 、入射角 i 、光程 L 、 L_1 和 L_2 代入(3)式,计算得到新的折射率 n ;
- 4) 设定新计算得到的折射率 n_j 与前次 n_{j-1} 之间的偏差是否小于 10^{-7} 为误差函数,当误差函数为真时回到步骤2),继续迭代,否则停止计算。

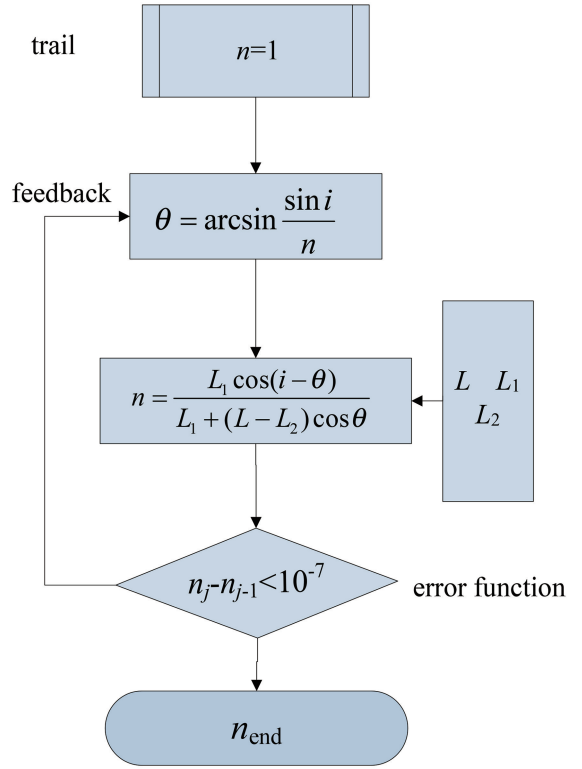


图4 折射率迭代计算流程

Fig. 4 Flow chart of the iteration algorithm for refractive index calculation

3 实验结果及分析

按照图1所示光路进行实验。实验中光源选择超辐射发光二极管(SLD,中心波长为 1.31 μm ,带宽 30 nm)。采用光栅尺(LIP481,Heidenhain公司)测量距离,其测距精度为 ± 1 μm 。角度测量采用角度编码器(ECA4402,Heidenhain公司),角度测量精度为 $2''$ 。K9玻璃尺寸为 40 mm \times 40 mm \times 40 mm,抛光后用于实验。距离、角度测量结果和折射率计算结果如表1所示。

表 1 各物理量测量结果

Table 1 Measurement results of various parameters

| Parameter | L /mm | L_1 /mm | L_2 /mm | i /($^\circ$) | K9 index |
|-----------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------|
| Value | 198.7546 ± 0.001 | 60.4543 ± 0.001 | 219.9015 ± 0.001 | 19.804 ± 0.00056 | 1.506386 |

测量误差包含位置判断,迭代计算,平行度、距离和角度测量引入的误差。使用干涉条纹进行位置判断,引入的误差可忽略不计。迭代计算引入的误差小于 10^{-7} ,在该方法中可忽略不计。平行度引入的误差主要源自样品加工无法控制为绝对平行,样品加工后楔角为 α ,则(3)式变为

$$n = \frac{L_1 \cos(i - \theta)}{L_1 + (L - L_2)(\cos \theta + \sin \theta \tan \alpha)} \quad (10)$$

假设楔角 α 不大于 $10''$,计算后折射率最大偏差为 7.87×10^{-6} 。则平行度引入的测量误差为

$$\sigma_1 = 7.87 \times 10^{-6} / \sqrt{3} = 4.54 \times 10^{-6} \quad (11)$$

距离测量误差主要源自光栅尺测量误差。假设距离测量误差为 $1 \mu\text{m}$,通过迭代计算可以得到其导致的折射率最大偏差为 8.66×10^{-5} 。距离测量引入的误差为

$$\sigma_2 = 8.66 \times 10^{-5} / \sqrt{3} = 5 \times 10^{-5} \quad (12)$$

角度测量误差主要由角度编码器测量误差引入。假设角度测量误差为 $2''$,通过迭代计算可以得到其导致的折射率最大偏差为 9.06×10^{-6} 。角度测量引入的误差为

$$\sigma_3 = 9.06 \times 10^{-6} / \sqrt{3} = 1.57 \times 10^{-6} \quad (13)$$

距离和角度测量引入的测量误差不相关,最终得到折射率测量总误差为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = 5.023 \times 10^{-5} \quad (14)$$

4 对比验证

为了验证本文方法的正确性,采用 V 棱镜方法测量实验所用 K9 样品。设备为 KPR-2000 测试仪(Kalnew 公司),其测量精度为 $\pm 3 \times 10^{-5}$,测量结果如表 2 所示。

表 2 V 棱镜法测量结果

Table 2 Refractive index measured by V-prism

| Wavelength /nm | 404.7 | 435.8 | 486.1 | 546.1 | 587.6 | 656.3 | 706.5 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| Refractive index | 1.529688 | 1.526146 | 1.521863 | 1.518214 | 1.51631 | 1.513846 | 1.512428 |

折射率可通过柯西公式计算,即

$$n = a + b/\lambda^2 + c/\lambda^4 \quad (15)$$

式中:系数 a, b, c 可通过表 2 中数据通过最小二乘拟合得到,分别为 $1.503850548, 4.340724 \times 10^3, 1.865 \times 10^7$ 。拟合结果如图 5 所示。可以计算得到 K9 样品在 1310 nm 波长处折射率为 1.506374 ,与本文方法测量得到的折射率偏差为 1.2×10^{-5} 。

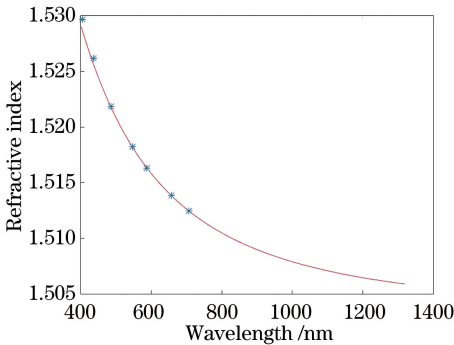


图 5 由柯西公式拟合得到的折射率结果

Fig. 5 Refractive index result fitted by Cauchy formula

5 结 论

提出了一种基于短相干技术的光学平板折射率测量方法。分析了距离和角度测量误差来源,得到该方法总测量误差为 5×10^{-5} 。与 V 棱镜法进行对比,验证了该方法的正确性。如果该方法中使用精度更高的光栅尺进行距离测量,该方法测量精度可优于 10^{-5} 。与最小偏向角法、自准直法等方法相比,本文方法无需特别制备用于折射率测量的样品。

参 考 文 献

- [1] Shumate M S. Interferometric measurement of large indices of refraction [J]. Applied Optics, 1966, 5 (2): 327-331.
- [2] Rosfjord K, Chang C, Miyakawa R, et al. Direct index of refraction measurements at extreme-ultraviolet and soft-X-ray wavelengths [J]. Applied Optics, 2006, 45(8): 1730-1735.
- [3] Gillen G D, Guha S. Use of Michelson and Fabry-Perot interferometry for independent determination of

- the refractive index and physical thickness of wafers [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(3): 344-347.
- [4] Tan T Y, Yi K, Shao J D. Measurement of refractive index of the optical crystal with spectrophotometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(12): 1678-1682.
谭天亚, 易葵, 邵建达. 利用分光光度计测量光学晶体的折射率 [J]. *中国激光*, 2005, 32(12): 1678-1682.
- [5] Meng Q H, Xiang Y. Novel high accurate measurement method for refractive index of optical glass [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2114-2119.
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): 2114-2119.
- [6] Song D S, Wang L, Xu R G, *et al.* Refractive index measurement for quartz glass in ultraviolet band [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 705-708.
宋冬生, 王雷, 许荣国, 等. 石英玻璃紫外波段折射率测量 [J]. *应用光学*, 2011, 32(4): 705-708.
- [7] Sun G L. A new refractive index measuring method [J]. *Journal of Applied Optics*, 1995, 16(1): 58-61.
孙桂林. 一种折射率测量新方法 [J]. *应用光学*, 1995, 16(1): 58-61.
- [8] Wei R X, Jiang D S. Refractive index measurement with Fabry-Perot interference wavelength [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(6): 551-554.
魏仁选, 姜德生. 基于 F-P 干涉波长的折射率测量 [J]. *中国激光*, 2003, 30(6): 551-554.
- [9] Choi H J, Lim H H, Moon H S, *et al.* Measurement of refractive index and thickness of transparent plate by dual-wavelength interference [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9429-9434.
- [10] Gillen G D, Guha S. Refractive-index measurements of zinc germanium diphosphide at 300 and 77 K by use of a modified Michelson interferometer [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(10): 2054-2058.
- [11] Hao D Z, Wu F Q, Kong W J. Measurement of refractive index of crystals with interferometry [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(5): 407-408.
郝殿中, 吴福全, 孔伟金. 干涉法测量晶体的折射率 [J]. *激光技术*, 2003, 27(5): 407-408.
- [12] Xiong F, Hu Z W, Jiang M D. Non-contact measurement of refractive index based on parallel surface plate [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1): 148-152.
熊芬, 胡中文, 姜明达. 基于平行平板的折射率高精度非接触测量 [J]. *应用光学*, 2012, 33(1): 148-152.
- [13] Xue H, Shen W D, Gu P F, *et al.* Thickness measurement of thin film based on white-light spectral interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1877-1880.
薛晖, 沈伟东, 顾培夫, 等. 基于白光干涉的光学薄膜物理厚度测量方法 [J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1877-1880.
- [14] Ma Y, Chen L, Zhu W H, *et al.* Dynamic Twyman interferometer for phase defect measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1204009.
马云, 陈磊, 朱文华, 等. 用于相位缺陷检测的动态泰曼干涉仪 [J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1204009.
- [15] Deng Q Y, Tang Y, Zhou Y, *et al.* High-resolution surface topography measurement based on frequency-domain analysis in white light interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0604001.
邓钦元, 唐燕, 周毅, 等. 基于白光干涉频域分析的高精度表面形貌测量 [J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0604001.