

引用格式: MA Zhiyao, ZHENG Donghui, CHEN Lei, et al. Method for Refractive Index Uniformity Measurement Based on Two-flat and Three-flat Test[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):0212001

马致遥, 郑东晖, 陈磊, 等. 基于两平晶三面互检的折射率均匀性测量方法[J]. 光子学报, 2024, 53(2):0212001

基于两平晶三面互检的折射率均匀性测量方法

马致遥, 郑东晖, 陈磊, 马骏

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 结合奇偶函数理论, 提出了一种基于两平晶三面干涉测量平晶折射率均匀性的方法。该方法通过两块平晶 3 个表面之间的组合测量, 对折射率均匀性引入的误差进行分部求解, 生成 4 个随机波面作为初始 3 个表面面形和折射率均匀性误差, 对其中的均匀性误差复原, 结果与初始值仅相差 0.6×10^{-6} , 残差与平晶表面面形的低频信息无关, 仅取决于折射率均匀性本身的旋转不变项。在 100 mm 口径 Zygo 干涉仪上完成了两平晶折射率均匀性检测实验。同时通过三平晶透射法对同一块平晶的折射率均匀性进行检测, 将两种方法的测量结果进行对比。结果表明两平晶方法获得的折射率均匀性结果与透射法获得的折射率均匀性波面形状相同, 指标结果仅相差 0.2×10^{-6} , 波面偏差峰谷值相差 3 nm。分析了影响评估精度的误差项, 旋转角度误差与对准误差的影响在实验精度条件下, 均方根偏差均小于 1 nm。实验结果表明所提出的两平晶三面互检方法能够有效地对平晶的折射率均匀性进行测量。

关键词: 物理光学; 光干涉测量; 奇偶函数法; 光学均匀性; 绝对检测

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245302.0212001

0 引言

光学制造技术的发展对光学平晶的面形质量和折射率均匀性的要求越来越高, 在动态干涉测量等领域都有应用^[1-3]。对于常用的 633 nm 红光波段, 1 ppm (10^{-6}) 量级的不均匀性就能引起波面变化。美国的 AIC 等提出了采用光学干涉法, 主要包括翻转法和透射法^[4], 来测量光学材料的均匀性。国内的郭培基等提出了光学平行平板样品不均匀性的绝对测量方法, 进一步丰富了光学玻璃均匀性测量的方法^[5-8]。张瑞应用同步移相干涉仪检测了平行平板的光学均匀性^[9], 白云波则完成了对 1 m 级大口径玻璃的均匀性拼接测量^[10]。MATOUŠEK O 通过傅里叶变换计算了折射率均匀性^[11]。透射法可以消除样品面形及系统带来的误差, 是目前定量测量光学均匀性精度最高的方法, 也是在高精度测量玻璃光学均匀性时使用最广泛有效的方法。但是上述干涉测量方法除了干涉仪的参考平晶和被测样品外, 还需要另外一块平晶作为反射平晶使用才能完成对被测样品折射率均匀性的检测, 即至少需要三块平晶才能实现。

奇偶函数法和旋转平均法都是光学绝对检验中常用的方法。AIC 等首次提出了奇偶函数法, 将波面分解为偶偶、偶奇、奇偶和奇奇四个部分分步求解^[12]。XU Chen 提出了用两块光学板实现绝对检验的方法, 他通过透射法预先对透射平晶的折射率均匀性进行检测和扣除, 并通过两平晶的三个平面完成了绝对检验工作^[13]。ZHAI Dede 提出了一种基于移位旋转的绝对测试算法。需要 90° 旋转和横向移位, 便于大口径平面的实施^[14-15]。ZHOU You 结合奇偶函数和 N 位旋转平均的思想完成了对 600 mm 平晶的绝对检验^[16]。WANG Yuntao 通过奇偶函数法完成了对 300 立式干涉仪的精度调校^[17]。

本文结合了光学平晶绝对检验中两平晶绝对检验方法、奇偶函数算法和旋转平均算法的思想, 提出了

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(No. 30923010934), 国家自然科学基金(Nos. 62005122, 61975081), 江苏省自然科学基金(No. BK20200458)

第一作者: 马致遥, njjustmzy@foxmail.com

通讯作者: 郑东晖, zdonghui@njust.edu.cn

收稿日期: 2023-07-25; 录用日期: 2023-09-11

<http://www.photon.ac.cn>

一种只需要使用参考平晶和反射平晶两块平晶就能够完成对参考平晶折射率均匀性质量评估的方法。该方法使用两块平晶的三个参考面以及多次旋转干涉测量,通过将折射率均匀性分成奇偶项求解再叠加的方式实现。利用Zernike多项式进行了原理性的仿真,在100 mm Zygo干涉仪上进行了实验,并通过透射法测量待测平晶的折射率均匀性。

1 两平晶三面测量折射率均匀性原理

提出的两平晶三面测量折射率均匀性的过程如图1所示,其中A表示透射平晶的非工作面,B表示透射平晶的工作面,C表示反射平晶的工作面, n 代表透射平晶(待测平晶)的玻璃材料折射率。

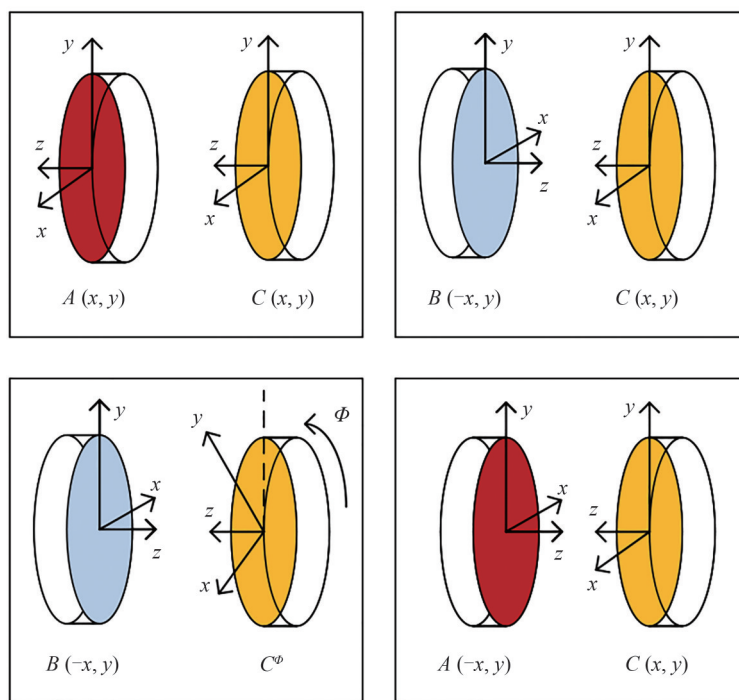


图1 两平晶折射率均匀性检测步骤

Fig.1 Steps of two-flats refractive index uniformity test

首先,透过B面使非工作面A和C进行干涉,测量得到波面结果记录为 M_1 。然后测量工作面B和C的波面结果记录为 M_2 。接着让C绕 z 轴旋转,测量旋转 45° 、 90° 、 180° 位置的结果,并分别与工作面B产生干涉,测量得到波面结果记为 M_3 、 M_4 和 M_5 。最后,将透射平晶沿 y 轴翻转 180° ,并将C转回到原位,直接测量非工作表面A和C,所得干涉测量波面结果记录为 M_6 ,即

$$\begin{cases} M_1 = nA(x, y) + (n-1)B(-x, y) - C(x, y) + \delta(x, y) \\ M_2 = B(-x, y) + C(x, y) \\ M_3 = B(-x, y) + C^{45} \\ M_4 = B(-x, y) + C^{90} \\ M_5 = B(-x, y) + C^{180} \\ M_6 = A(-x, y) + C(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y) 表示规定的以测试面C为正方向坐标系, $(-x, y)$ 表示该面关于 y 轴发生了翻转, C^φ 表示C面旋转了 φ 角度, $\delta(x, y)$ 表示折射率均匀性引入的波面误差, n 为材料折射率。

通过奇偶函数的分解方法,以偶奇(eo)项为例,利用测量结果 M_1 、 M_2 、 M_5 、 M_6 ,将其中的eo项分离出来,其中 M_5 为B面与C面旋转 180° 后的测量结果,结果表示为

$$\begin{cases} M_{1_{eo}} = nA_{eo} + (n-1)B_{eo} - C_{eo} + \delta_{eo} \\ M_{2_{eo}} = B_{eo} + C_{eo} \\ M_{5_{eo}} = B_{eo} - C_{eo} \\ M_{6_{eo}} = A_{eo} + C_{eo} \end{cases} \quad (2)$$

式中,下标eo表示该波面的偶奇分量,根据式(2)可以求得 δ_{eo} 分量,表示为

$$\delta_{eo} = M_{1_{eo}} - nM_{6_{eo}} - nM_{5_{eo}} + M_{2_{eo}} \quad (3)$$

同理,可以求得 δ 的奇偶分量 δ_{oe} 以及奇奇分量 δ_{oo} ,分别表示为

$$\delta_{oe} = M_{1_{oe}} + nM_{6_{oe}} - (n-1)M_{2_{oe}} \quad (4)$$

$$\delta_{oo} = M_{1_{oo}} - (n-1)M_{2_{oo}} + nM_{6_{oo}} \quad (5)$$

通过式(1)~(5)计算出折射率均匀性 δ 中的eo、oe和oo三个部分,还剩偶偶项 δ_{ee} 没有求解,但是根据已有的测量结果,无法直接得到 δ_{ee} 部分。因此采用继续分解的方案,将待求解的 δ_{ee} 分量继续分解为 δ_{eee} 和 δ_{eeo} 两部分,这两个分量分别表示关于 $y=x$ 呈正对称和负对称的两个部分,计算公式为

$$\begin{cases} \delta_{eee} = (\delta_{ee} + [\delta_{ee}]')/2 \\ \delta_{eeo} = (\delta_{ee} - [\delta_{ee}]')/2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $[\delta_{ee}]'$ 代表 δ_{ee} 关于 $y=x$ 翻转后的分量。

通过 M_2 和 M_4 的测量结果可计算eeo分量, M_4 是B和C旋转 90° 的测量结果,先求得这两个测量结果的ee分量,然后将这两个分量做差,可以表示为

$$M_{2_{ee}} - M_{4_{ee}} = B_{ee} + C_{ee} - B_{ee} - [C^{90^\circ}]_{ee} = C_{ee} - [C^{90^\circ}]_{ee} \quad (7)$$

式中,如果C在直角坐标系下表示为 $C(x,y)$,根据直角坐标系坐标变换, $[C^{90^\circ}]$ 表示为 $C(-y,x)$,根据ee函数的性质, $C(-y,x)$ 和 $C(y,x)$ 相等, $C(y,x)$ 就是 $C(x,y)$ 关于 $y=x$ 做翻转后的坐标,即 $[C]'$,所以

$$M_{2_{ee}} - M_{4_{ee}} = C_{ee} - [C_{ee}]' = 2C_{eeo} \quad (8)$$

因此 C_{eeo} 可以表示为

$$C_{eeo} = (M_{2_{ee}} - M_{4_{ee}})/2 \quad (9)$$

在得到 C_{eeo} 分量后,转换得到 δ 中的eeo分量部分,表示为

$$\delta_{eeo} = M_{1_{eeo}} - nM_{6_{eeo}} - (n-1)M_{2_{eeo}} + n(M_{2_{ee}} - M_{4_{ee}}) \quad (10)$$

对于还没有求出的eee项分量,继续分解为eeee和eeeo分量,和前面的类似,这两个分量分别是关于 $y = \tan(22.5^\circ)x$ 呈正负对称的分量。类似地,可以通过旋转 45° 的测量结果将 δ_{eeeo} 表示为

$$\delta_{eeeo} = M_{1_{eeeo}} - nM_{6_{eeeo}} - (n-1)M_{2_{eeeo}} + n(M_{2_{eee}} - M_{3_{eee}}) \quad (11)$$

此时已经求出了 δ 中除了eeee分量外的其他分量,而 δ_{eeee} 是关于 $y = \tan(22.5^\circ)x$ 呈正对称的分量,在Zernike拟合当中,它可以被认为是80分量,是部分高频分量。将这部分分量直接忽略的话,可以将折射率均匀性 δ 近似表示为

$$\delta = \delta_{oe} + \delta_{eo} + \delta_{oo} + \delta_{eeo} + \delta_{eeeo} \quad (12)$$

常用的Zernike多项式36项拟合只到50项,而忽略的部分为高于80的旋转对称分量,其中包含 $\delta_{f(\rho)}$ 部分,即旋转不变项分量。实际计算出的折射率均匀性中的误差项主要为离焦和球差部分。

2 仿真

为了验证所提方法的可行性,进行数值仿真。使用Zernike多项式的前36项构建平面A、B和C的原始表面误差和折射率均匀性误差波面,如图2所示,其中 Z_1 、 Z_2 和 Z_3 的系数为0, $Z_4 \sim Z_{36}$ 的系数随机生成,其中A、B和C三个面的峰谷值(Peak-valley, PV)约为60 nm,折射率均匀性引入的波面误差在80 nm左右,具体PV和均方根值(Root-mean-square, RMS)参数如表1所示。

根据提出的方法恢复得到的折射率均匀性结果如图3(a)所示,其分布与仿真预设的折射率均匀性基本一致,两者相减得到的残差如图3(b)所示,残差图的形式符合预期,呈现旋转不变的特征。对应的PV和RMS值如表2所示。理论的残差应该为实际的折射率均匀性引入波像差的eeee部分。将这部分单独提取出来,如图3(c)所示。

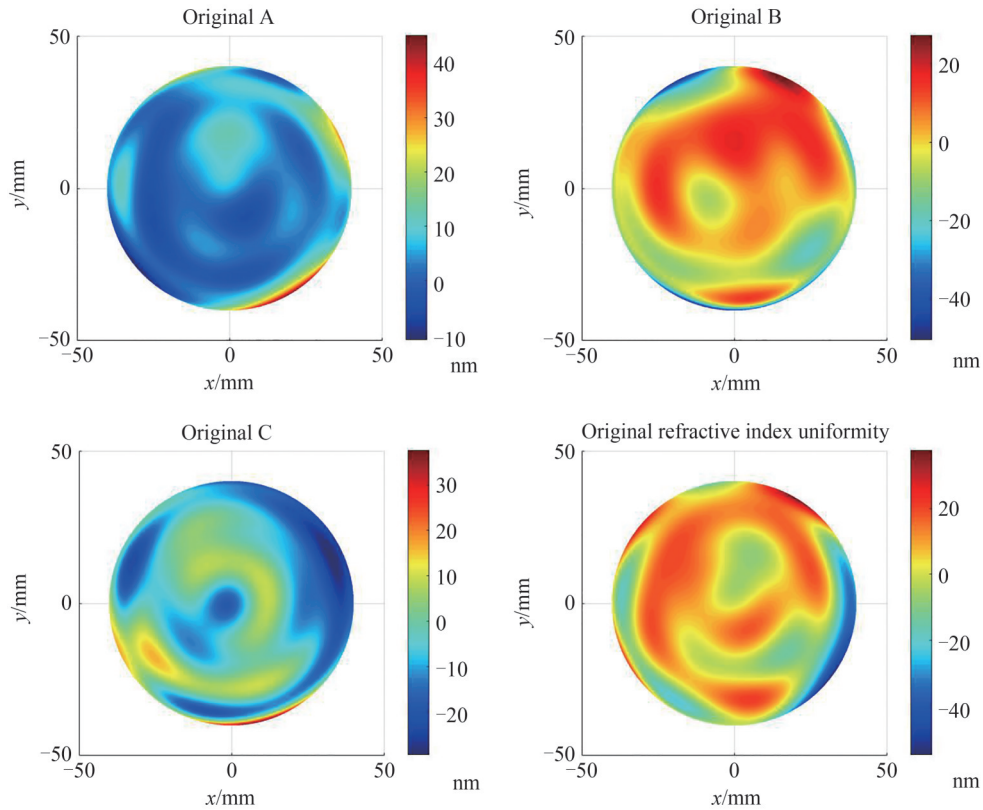


图2 原始仿真波面

Fig.2 The original simulation wave

表1 仿真原始波面PV和RMS值

Table 1 PV and RMS values of original simulation wavefront

Wavefront	Original wavefront A	Original wavefront B	Original wavefront C	Refractive index uniformity wavefront
PV/nm	50.65	66.67	63.14	78.00
RMS/nm	5.52	9.53	8.63	11.59

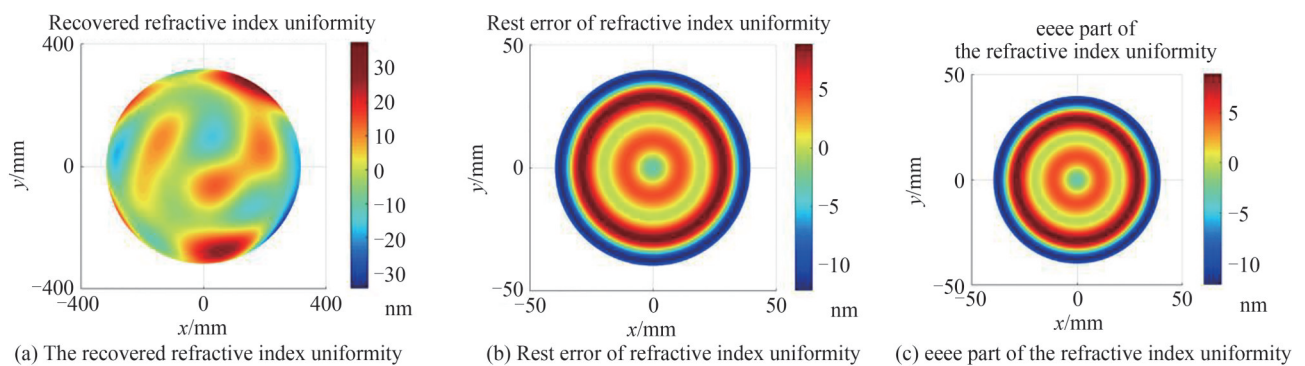


图3 折射率均匀性波面复原结果及残差对比

Fig.3 Recovered refractive index uniformity wavefront results and its residual comparison

从图3中可以看出,所求出的折射率均匀性的残差和原始的折射率均匀性波面的 eeee 项部分完全相同,符合理论预期。说明在 Zernike36 项内,即中低频区域内,待测面的面形精度对恢复折射率均匀性没有影响。根据原理,残差为 eeee 项部分,这部分分量每 45° 呈现正对称性质,因此是频率 8θ 分量,在实际测量中,面形信息中超过 8θ 的部分,会对恢复结果产生影响。但是这部分高频信息本身所占比重很低并且对整体面形以及波面参数的影响很小。

表2 复原折射率均匀性的PV和RMS值
Table 2 The PV and RMS values of recovered refractive index uniformity

Wavefront	Original refractive index uniformity	Recovered refractive index uniformity	Rest error
PV/nm	78.00	72.44	21.11
RMS/nm	11.59	9.27	6.57

以材料折射率均匀性的标准来判断,假设平晶材料的厚度为10 mm,原始波面折射率均匀性为7.8 ppm,而复原波面的折射率均匀性为7.2 ppm,结果仅相差0.6 ppm,可以认为两者处于同一量级,说明该方法对评价折射率均匀性指标具有较好的效果。

3 实验与结果

3.1 100 mm 平晶实验

为了进一步验证该方法的准确性,在Zygo GPI干涉仪上使用 $\Phi 100$ mm平晶进行实验,装置如图4所示,6次测量的波面如图5所示。使用的透射平晶为石英材料,前后表面质量均优于 $\frac{\lambda}{10}$, λ 表示波长,且具有一定的楔角,不会产生自干涉的条纹。反射平晶的使用的是一块微晶平晶,表面质量同样优于 $\frac{\lambda}{10}$ 。

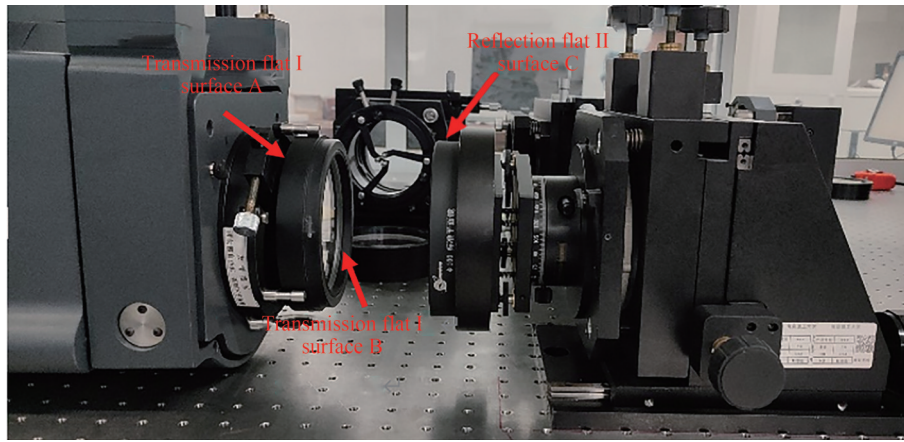


图4 两平晶折射率均匀性检测装置

Fig.4 Experimental setup for two flats refractive index uniformity test

在测量过程中,透射平晶在对点板上存在前后表面2个光斑,反射平晶只有1个光斑。透过平晶测量会引入折射率均匀性误差,条纹图及测量结果中能够看出比较明显的应力条纹,如图5中的 M_1 所示,可以直接判断出是否为透射测量。

采用传统三平晶透射法测量同一块透射平晶的折射率均匀性,与两平晶法进行比较,实验装置如图6所示。

透射法测量折射率均匀性的步骤如图7所示,总共需要进行4次测量:1)测量参考面A和反射面D的空腔干涉结果;2)将待测折射率均匀性的测试平晶放到中间,测量穿过透射平晶后,参考面A和反射面D的干涉结果;3)测量参考面A和测试平晶前表面B的干涉结果;4)测量测量A和测试平晶后表面C的干涉结果。测量结果可以表示为

$$\begin{cases} M_1 = A(-x, y) + D(x, y) \\ M_2 = A(-x, y) + (1-n)B(x, y) + (1-n)C(-x, y) + D(x, y) + \delta(x, y) \\ M_3 = A(-x, y) + B(x, y) \\ M_4 = A(-x, y) + (1-n)B(x, y) - nC(-x, y) + \delta(x, y) \end{cases} \quad (13)$$

计算出折射率均匀性 δ 引入的波面差可以表示为

$$\delta(x, y) = n(M_2 - M_1) - (n-1)(M_4 - M_3) \quad (14)$$

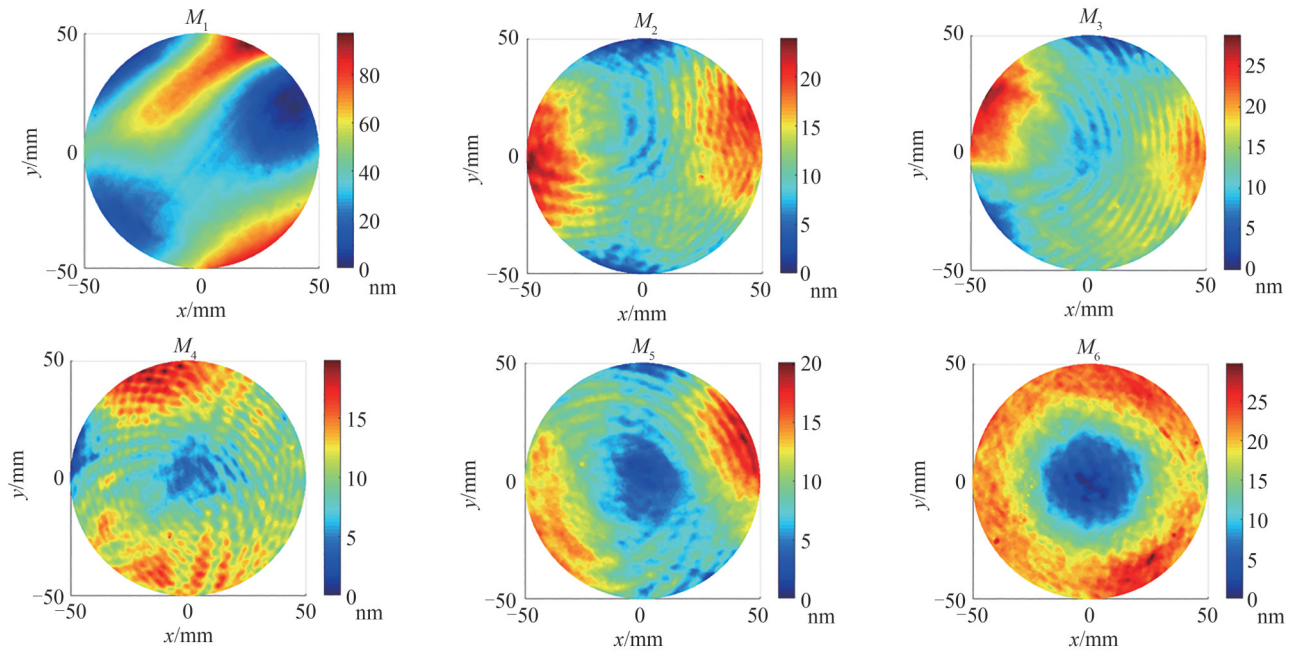


图5 两平晶法测量透射平晶折射率均匀性波面

Fig.5 Wavefront of refractive index uniformity of transmission flat by two flats method



图6 透射法测量折射率均匀性实验

Fig.6 Experiment of transmission method for refractive index uniformity test

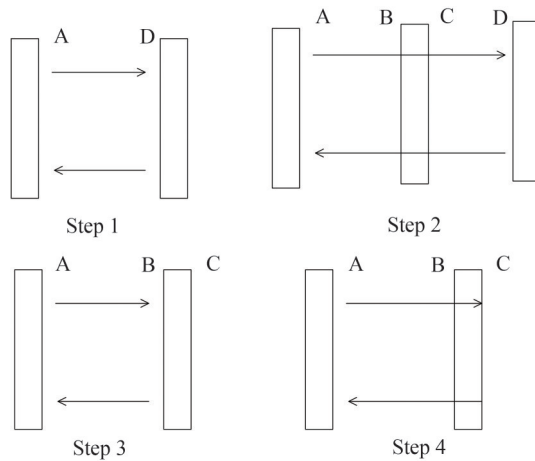


图7 透射法测量折射率均匀性步骤

Fig.7 Steps for measure refractive index uniformity by transmission method

3.2 结果比较

通过两种方法计算出透射平晶的折射率均匀性结果如图8所示,平晶厚度为15 mm,恢复结果的PV和RMS值如表3所示。两种方法的测量结果在面形分布上相似,明显的应力条纹分布位置也能够显示出来。

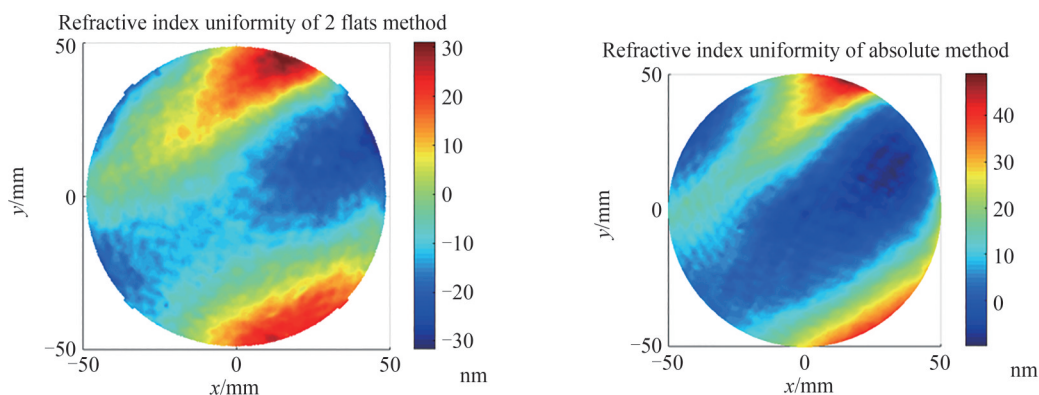


图8 折射率均匀性测量结果
Fig.8 The result of refractive index uniformity

表3 折射率均匀性复原结果的PV和RMS值
Table 3 PV and RMS of the recovered refractive index uniformity

Wavefront	Recovered refractive index uniformity by two flats method	Recovered refractive index uniformity by transmission method
PV/nm	62.80	59.06
RMS/nm	12.05	10.78

根据表3的结果,两种方法恢复的折射率均匀性结果PV值相差3.02 nm,RMS值相差1.27 nm。计算出通过两平晶法恢复的折射率均匀性为4.1 ppm,通过透射法测量的结果3.9 ppm,两者处于同一量级,仅相差0.2 ppm。因此,可以认为该方法能比较好地评价平晶的折射率均匀性质量,并且能够恢复出其中明显存在应力分布的位置。

4 误差分析

4.1 旋转角度误差

在实际测量过程中,由于旋转装置的机械误差,旋转过程中会产生角度误差。原始波面采用图2的波面,每次的旋转角度为45°,在这个角度基础上每次增加0.1°的旋转角度误差,计算此时恢复波面的误差情况。这里忽略了固有的理论误差值,只考虑由于旋转角度误差造成的影响。

根据图9,当旋转角度误差小于0.5°时,残差的PV值小于1 nm,当旋转角度误差小于1°时,残差的PV值

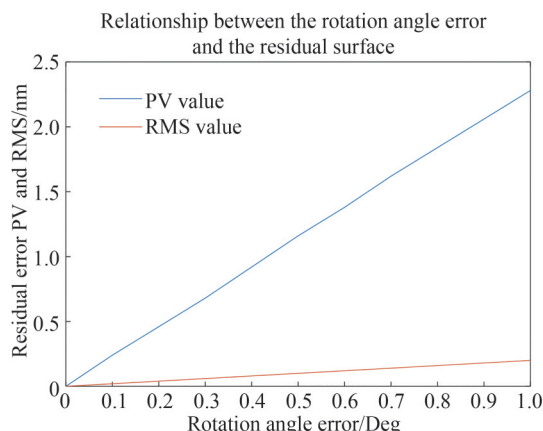


图9 旋转角度误差与残差关系
Fig.9 Relationship between the rotation angle error and the residual error

小于 2.5 nm。所使用的旋转结构分度值为 0.5° ，实际由于旋转造成的误差能够小于 1 nm，对恢复折射率均匀性的影响并不明显。

4.2 对准偏差

在干涉测量过程中，干涉仪参考平面坐标被当作参考坐标。其他平面在对准以及旋转过程中都与参考坐标对准，但是实际上总会存在一定的偏差，影响测量结果。对准偏差和残差面之间的关系如图 10 所示。对准偏差的计算方式与旋转角度误差类似，忽略固有的理论误差引入的影响，只考虑对准偏差造成的影响。

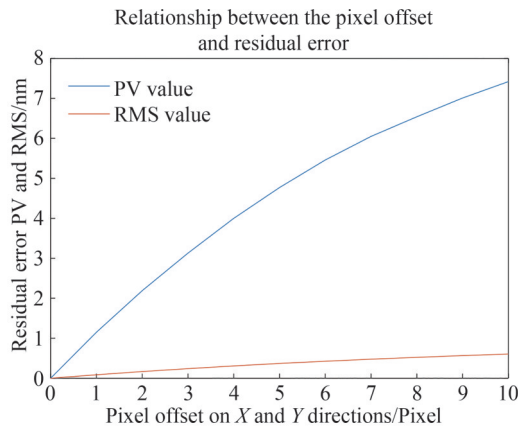


图 10 对准偏差和残差关系曲线

Fig.10 Relationship between the pixel offset and residual error

随着对准误差的增大，残差 PV 值快速变大，RMS 值的增大则缓慢一些。如果偏差达到 10 像素，残差的 RMS 也能小于 1 nm。换算成实际尺寸，在 100 mm 的平晶中，保证对准偏差小于 1 mm，恢复结果的 RMS 值偏差能够小于 1 nm。

5 结论

本文提出了一种基于两平晶三面互检的折射率均匀测量方法。在 $\Phi 100$ mm Zygo GPI 干涉仪上对该方法进行了实验验证，并与传统三平晶透射法进行了比对，结果表明，两种方法测量得到的折射率均匀性结果分布一致，数值仅相差 0.2 ppm，验证了所提方法的准确性与可靠性。该方法仅需两块平晶，可拓展应用至大口径光学平晶折射率均匀性的检测，降低检测成本。

参考文献

- [1] ZHENG D, CHEN L, KONG L, et al. System design and error correction for 300 mm aperture vertical Fizeau spatial-temporal phase-shifting interferometer[J]. Applied Optics, 2020, 59(8): 2513-2520.
- [2] GUO R, LIAO Z, LI J, et al. Optical homogeneity measurement of parallel plates by wavelength-tuning interferometry using nonuniform fast Fourier transform[J]. Optics Express, 2019, 27(9): 13072-13081.
- [3] ASAI K, YOSHIDA S, YAMADA A, et al. Micro-photoelastic evaluation of indentation-induced stress in glass[J]. Materials transactions, 2019, 60(8): 1423-1427.
- [4] AIC, WYANT J. Measurement of the inhomogeneity of a window[J]. Optical Engineering, 1991, 30(9): 1399-1404.
- [5] GUO Peiji, YU Jingchi, DING Zezhao, et al. High accuracy testing method of the homogeneity of optical glass[J]. Optical Technique, 2001, 27(6): 528-531.
郭培基, 余景池, 丁泽钊, 等. 光学玻璃光学均匀性高精度测量技术[J]. 光学技术, 2001, 27(6): 528-531.
- [6] LI Qiang, LIU Ang, GAO Bo, et al. Error analysis of absolute test method of inhomogeneity of optical materials[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(3): 464-468.
李强, 刘昂, 高波, 等. 光学材料光学不均匀性绝对测量误差分析[J]. 应用光学, 2013, 34(3): 464-468.
- [7] LIN Juan. Interference absolute measurement for homogeneity of large-aperture optical glass[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 120-123.
林娟. 大口径光学玻璃光学均匀性干涉绝对测量方法[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 120-123.
- [8] GUO Peiji, YU Jingchi, DING Zezhao, et al. Absolute testing method of the homogeneity of optical glass[J]. Laser

- Journal, 2003, 24(3):26-27.
- 郭培基,余景池,丁泽钊,等. 光学玻璃光学均匀性的绝对测量技术[J]. 激光杂志, 2003, 24(3):26-27.
- [9] ZHANG Rui, CHEN Lei, ZHU Wenhua, et al. Measuring optical homogeneity of parallel plates based on simultaneous phase-shifting by lateral displacement of point sources[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 0112002.
- 张瑞, 陈磊, 朱文华, 等. 点源异位同步移相法检测平行平晶的光学均匀性[J]. 光子学报, 2018, 47(1): 0112002.
- [10] BAI Yunbo, ZHOU You, LIU Shijie, et al. Splicing detection technique of homogeneity of large-aperture laser neodymium glass[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0912004.
- 白云波, 周游, 刘世杰, 等. 大口径激光钕玻璃均匀性拼接检测技术[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0912004.
- [11] MATOUSEK O. Methods for refractive-index homogeneity calculation using Fourier-transform phase-shifting interferometry[J]. Optical Angular Momentum, 2016: 101510Y.
- [12] AI C, WYANT J. Absolute testing of flats by using even and odd functions[J]. Applied Optics, 1993, 32(25): 4698-4705.
- [13] XU Chen, CHEN Lei. Method for absolute flatness measurement of optical surface[J]. Applied Optics, 2009, 48(13): 2536-2541.
- [14] ZHAI Dede, CHEN Shanyong, XUE shuai. Pixel-based absolute surface metrology by three flat test with shifted and rotated maps[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, (102): 92-99.
- [15] ZHAI Dede, CHEN Shanyong. Absolute flat test using rotated and multi-shifted maps with relative tilt measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, (114): 121-128.
- [16] ZHOU You, LIU Shijie. In situ absolute surface metrology for a 600 mm aperture interferometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, (129): 106-154 .
- [17] WANG Yuntao, CHEN Lei, HU Chenhui, et al. Iterative deformation calibration of a transmission flat via the ring-point support on a 300-mm-aperture vertical Fizeau interferometer[J]. Optical Express, 2021, 29(3): 2984-3000.

Method for Refractive Index Uniformity Measurement Based on Two-flat and Three-flat Test

MA Zhiyao, ZHENG Donghui, CHEN Lei, MA Jun

(Nanjing University of Science and Technology, School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing 210094, China)

Abstract: Traditionally, the interferometric method has been employed to test the refractive index uniformity of flat optical materials. The method mainly involves two approaches: the overturning method and the transmission method. Both methods require a minimum of three flat samples, including the reference flat, the transmission flat, and the sample flat to be tested. This requirement for multiple flats increases the overall cost of testing.

We have proposed a novel method for evaluating the refractive index uniformity of transmission flats, which only requires two flats, offering a significant improvement over existing method. The method is realized by using two surfaces of the transmission flat and one surface of the reference flat, and the sample flat is used as the transmission flat. Based on the even-and-odd functions, we can get the even-odd, odd-even and odd-odd parts of the refractive index uniformity directly. To the even-even part, we resolve it as the even-even-even (eee) and even-even-odd (eeo) part and we can calculate the eeo part by rotate 90° measurement result. Then we resolve the eee part into even-even-even-even (eeee) and even-even-even-odd (eeeo) part and get eeoo part through the rotate 45° measurement result. Finally, by neglecting high-order rotational symmetry terms, we can calculate the refractive index uniformity from the obtained components. This method with its step-by-step decomposition providing an effective and efficient approach to characterize the optical properties of the flat under test.

Four random wavefronts are generated as the initial three surface error and the refractive index uniformity errors. The uniformity errors are recovered according to the proposed method. Compared the difference between the recovered results and the initial values, that only 0.6 ppm (10^{-6}) in differ. Additionally, the residual error exhibits rotation invariance, which aligns with theoretical expectations. It is important to note that in the low and middle frequency ranges, the residual error is not affected by the

surface error of the flat, but solely determined by the refractive index uniformity itself.

The theory is verified the experiment on a 100 mm Zygo interferometer and the refractive index uniformity of the same flat is measured by the three flat transmission method. The test flat is made by quartz. The surface error of the two surfaces are better than $\lambda/10$. The flat has a certain wedge angle. The front and the back surface will not generate interference fringes. The reference flat is a microcrystalline flat, better than $\lambda/10$ as well.

The result of the two flat method have the same shape with the three flat transmission method. The refractive index uniformity obtained by the two flats methods is only 0.2 ppm different from that obtained by the transmission method, and the peak-valley value is 3 nm different. To ensure accuracy in the evaluation process, error influence is analyzed considering factors such as rotation angle errors and pix offset errors. By evaluating the influence of error, the experimentally verified results illustrate the effectiveness of this method in accurately evaluating the refractive index uniformity of flat optical materials. The proposed method demonstrates promising potential in the evaluation of refractive index uniformity, reducing resource requirements, and improving cost-effectiveness.

Key words: Physical optics; Optic interferometry; Odd and even function; Optical uniformity; Absolute test

OCIS Codes: 120.3180; 120.4640; 120.4800