

数字波面干涉仪测试光学材料均匀性

许 卫 刚

(湖北5108厂)

摘要: 本文叙述了一种不受干涉仪系统误差及试样加工误差限制的测试光学材料均匀性的方法。借助于电子计算机,通过对四张干涉图的分析与处理,可以精确计算不包括线性变化的折射率偏差及厚度偏差。给出了两块玻璃的测试结果,并进行了测量精度的分析,对25mm厚的玻璃,精度为 4×10^{-7} 。

一、引 言

除制造工艺(设计、加工、装配)外,高质量光学系统往往受材料折射率的不均匀性所限制,为保证整个系统优良的性能,就必须指出所用材料的在小数点后第六位上的折射率变化。

光学均匀性的许多测试方法已在不同的报道中被描述。通常使用的定量干涉法是根据条纹与直线的偏离^[1,2]或使用剪切方法^[3,4]来实现测试的,这种方法的测试精度受干涉仪系统误差及试样加工误差所限制,但已被发现的其它方法却能同时测量出折射率变化及厚度变化,它们是:

(1) Twyman-Perry^[5]法。这种方法使用两张干涉图(图1),可同时求得折射率变化及厚度变化,但它的精度受干涉仪系统误差及两块平面镜的面形误差影响。利用全息两次曝光原理,已解决这两个问题^[6,7]。

(2) Rosberry^[8]为解决由空气流或震动引起的条纹漂移现象,在上述两张干涉图的基础上,通过倾斜一块反射镜,形成第三张本底干涉条纹图(图2),这样既抑制了条纹的漂移,也可以去掉两块平面镜的面形误差。Kowalik^[9]发展了他的方法,为提高测量精度,使用了多光束干涉术及电子计算机分析,给出的结果还包括折射率及厚度变化的方向和速率。

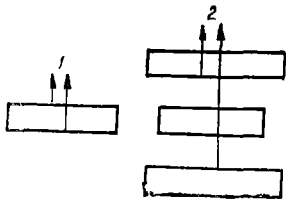


图1 二张Twyman-Perry干涉图

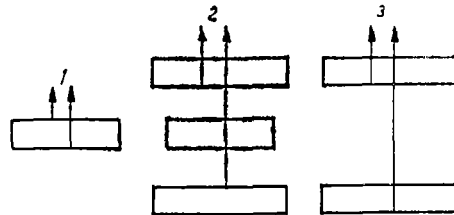


图2 三张Rosberry-Kowalik干涉图

(3) 对于楔角较大的试样, 它不具备形成反射条纹的能力。Roberts 和 Lange-nbeck^[10]采用 4 张干涉图 (图 3)。为获得所需精度, 试样的表面必须镀上高反射膜以便产生多光来干涉, 得到一张干涉图后, 必须去掉膜层以便获得下一张干涉图, 这种处理过程成了本方法的致命弱点。Schwider^[11]利用位相调制干涉仪 (PSI), 可不必对试样镀膜, 也能获得较高精度。

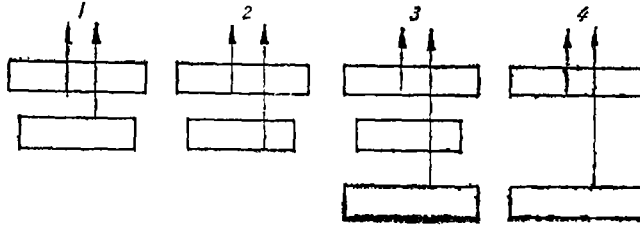


图 3 四张 Roberts-Langenbeck 干涉图

本文描述的方法是对 Roberts-Langenbeck 法的改进, 利用 Zygo 干涉仪的自动获得条纹中心技术, 可以精密确定条纹中心的位置。计算机根据适当的程序对从四张干涉图中获取的数据进行分析与处理, 最后给出折射率及厚度变化。虽然这种方法所得的结果不包括线性变化部分, 但对于用其他方法不能测试的楔角很大的试样 (例如分光镜、夹板玻璃等) 它却能有效地给出折射率变化的非线性变化部分, 而对这样的元件, 折射率的线性变化部分往往不影响成像质量。

二、测试原理

1. Δn 及 Δz 计算公式推导

测试是在斐索干涉仪上进行的 (图 4), 4 张干涉图分别为 (见图 3), ①由 TF 及样品前表面形成的干涉图; ②由 TF 及样品后表面形成的干涉图; ③由 TF 及经样品后 RF 形成的干涉图; ④无样品时 TF 及 RF 形成的干涉图。

对每张干涉图, 我们可以写出干涉场中任一点与样品中心点之间光程差的差值, 即波差 S_i (图 5):

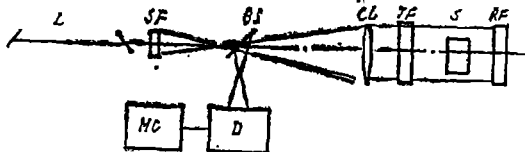


图 4 斐索干涉仪

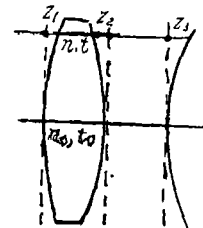


图 5 光程差图解

$$S_1 = S_0 - 2z_1$$

$$S_2 = S_0 + 2(n-1)z_1 + 2nz_2 - 2t_0(n-n_0)$$

(1)

$$S_3 = S_0 + 2(n-1)(z_1 + z_2) - 2t_0(n - n_0) - 2z_3$$

$$S_4 = S_0 - 2z_3$$

式中, S_0 是干涉仪本身产生的误差, 它包括准直物镜的像差、参考反射镜的面形差、接收器照相镜头的畸变等; z_1 、 z_2 、 z_3 分别是样品前、后表面及 RF 表面与平面的偏差, 对凸面取正、凹面取负; n_0 、 t_0 、 n 、 t 分别为两点的折射率及厚度。

由 (1) 可得:

$$S_2 - S_1 = 2n(z_1 + z_2) - 2t_0(n - n_0)$$

$$S_3 - S_4 = 2(n-1)(z_1 + z_2) - 2t_0(n - n_0) \quad (2)$$

故折射率偏差 $\Delta n = n - n_0$ 为:

$$\Delta n = [(n-1)(S_2 - S_1) - n(S_3 - S_4)] / 2t_0 \quad (3)$$

厚度偏差 $\Delta z = z_1 + z_2$ 为:

$$\Delta z = (S_2 - S_1 + S_4 - S_3) / 2 \quad (4)$$

因为波差 S 的处理过程中已消除了线性变化的影响, 所以 Δn 及 Δz 的偏差中不包括线性变化部分。由 (3) 式可知, 只要测出四个波差值, 就能计算出相应的折射率变化。

2. 波差 S 的计算^[2]

波差 S 的获得分两部分来完成 (见图 6)

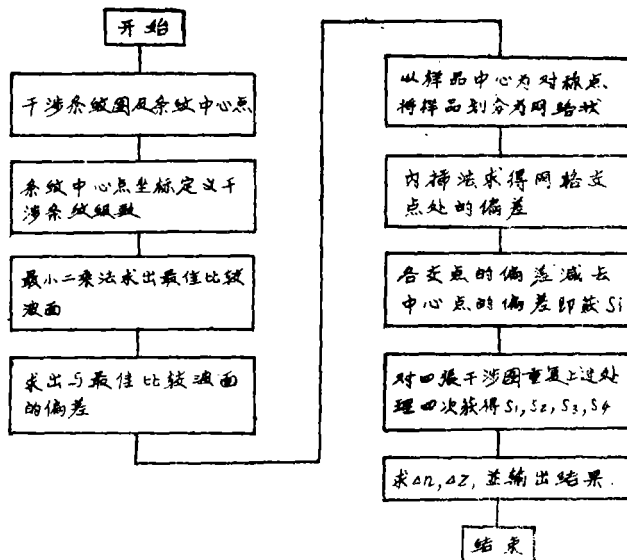


图 6 干涉图的分析与处理程序

公式中的 n 及 t_0 可用样品的名义折射率 (精确到小数点后第 4 位) 和名义厚度 (精确到 0.1mm) 代入。

三、测试精度

1. 测试环境将影响测试结果。环境包括空气的流动和温度梯度、样品的温度梯度、震动等。通过使用充气平台并远离震动源, 保证足够的时间使样品的温度平衡以及在干涉场周围用物体 (如有机玻璃) 屏蔽, 保证室内恒温恒湿, 可以使这些因素减少到在所需精度范围内不影响测试结果。

2. S 的测试精度是决定性的因素。它包括条纹定中心误差、线性内插误差等。条纹定中心的过程是采用等强度逐步逼近, 用 1000 个时钟脉冲在垂直干涉条纹方向划分 100 个等分来决定条纹中心点位于哪个时钟脉冲上, 分辨率为一个时钟脉冲。通常取 15 根左右条纹, 则定中心的误差为 $15/1000$ 波长^[13]。高条纹间隔太宽时, 线性内插引起的误差将会增加, 但高条纹多于 15 根时 (直径为 300 的样品), 它可忽略不计。

以上讨论的因素引起的误差总和约为 $1/60$ 波长。

3. 对 (3) 式微分可计算 Δn 的测试精度

$$\delta(\Delta n) = \sqrt{\frac{2(n-1)^2 + 2n^2}{4t_0^2}} \cdot (\delta S)$$

对 $n = 1.5147$ (K_9 玻璃), $t_0 = 25\text{mm}$, $\delta(\Delta n) = 4 \times 10^{-7}$ 。

四、测试结果

测试的样品是一块尺寸为 230mm , 厚度为 25mm , 楔角为 2 分的 K_9 光学玻璃。为保证测试精度, 样品在室内应恒温几十小时, 4 张干涉图的处理间隔尽可能缩短, 并将 TF 与 RF 之间的空间与外界隔绝, 以消除空气流动的影响。

公式 (3) 中的 S 值对 4 张干涉图而言, 是对应于样品上相同的两点。因此在拍摄干涉图的过程中不能在大范围内移动及转动样品, 以免破坏这种对应关系。但样品存在楔角, 为获得不同的干涉图, 通常要稍微转动样品, 一方面为获得下一张干涉图, 另一方面也消除了附加干涉条纹的干扰, 并将调节条纹的宽度、方向、光程差增加方向以适应测试要求, 这种调节的范围非常小, 因此不会破坏这种对应关系。

图 7 为样品的获得条纹中心以后的四张干涉图, 中心点以一系列的 “ \times ” 和 “ $+$ ” 表示。将获得的中心点座标及定义的干涉级数输入计算机, 通过图 6 表示的程序可计算各种所需的结果, 如图 8。从其中的数据我们可以获得折射率的最大差值为 2.82×10^{-6} 。最大厚度差值为 0.113λ 。

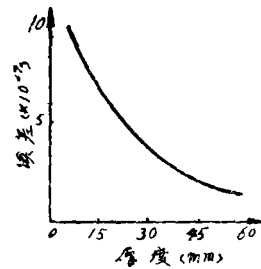


图 7 四张干涉条纹的中心图

图 9 为另一块样品的计算结果, 折射率的最大差值为 2.55×10^{-6} 。

对于 Zygo 干涉仪, 使用两个主机控制终端上的两个功能键可以很方便地测出样品折射率的最大偏差。前一个键的作用是将当前的光程差值减去已存储的光程差值, 后一个键的作用是将光程差值存储在 KAM 中^[13]。为说明原理, 我们首先将公式 (3) 分解为:

$$\Delta n = [nS_4 - nS_3 + (n-1)S_2 - (n-1)S_1] / 2t_0 \quad (6)$$

对第一和第二张干涉图, 设干涉条纹因子 ISF 为 $(n-1)$, 它在测试前的人机对话中输入。对第 3、第 4 张干涉图, $\text{ISF} = n_0$ 。因此, 首先测得 $(n-1)S_1$, 并用 STORE 键存储, 第二次测得 $(n-1)S_2$, 通过 SUB 键得 $(n-1)S_2 - (n-1)S_1$, 第三次测得 nS_3 , SUB 键后得 $nS_3 - (n-1)S_2 + (n-1)S_1$, 第 4 次得 nS_4 , SUB 键后得 $nS_4 - nS_3 + (n-1)S_2 - (n-1)S_1$, 将这时监视器屏幕上得到的峰谷值 (PV) 除于二倍的名义厚度, 即得样品的折射率最大偏差。通

过PLOT键，屏幕上将显示如图10所示的折射率变化的三维图。

作者对唐海林同志帮助编写计算程序，表示感谢。



图10 $\phi 80 \times 20$ 样品的折射率变化三维等高图

参 考 文 献

- [1] F.Reitmauger et.al., Appl.Opt., 1972, 11, No.5, 1107.
- [2] Ю.В.考洛米佐夫,《干涉仪的理论基础及应用》,技术标准出版社, 1982.297.
- [3] A.S.Devany,《Master Optical Technlques》, John Wiley & Sons, New York, 1981, 61.
- [4] 许卫刚, 光学机械, 1988, 2, 33.
- [5] F.Twyman,《Prism and Lens Marking》, znd ed.Hilger & Watts, London, 1952.507.
- [6] 四川大学物理系光学教研室等,《激光》, 1976, 3, No. 6 (Dec), 18.
- [7] 李锡善等, 硅酸盐学报, 1978, 6, No.3, (Aug), 149.
- [8] F.W.Rosberry, Appl.Opt., 1966, 5, No.6 (June), 961.
- [9] W.Kowalik, Appl.Opt., 1978, 17, No.18(15 Sep), 2956.
- [10] F.E.Roberts and P.Langenberg, Appl.Opt., 1969, 3, No.11(Nov), 2311.
- [11] J.Schwider et.al., Appl.Opt., 1985, 24, No.18(15 Sep), 3059.
- [12] 谷田貝豊彦, 光学技术コンタクト, 1982, 20, No. 9(sep), 18.
- [13] Zygo Coporation, Mark III Interferometer Operation and Maintenance Manual, OMP-087F, 1986.

Homogeneity Measurement of Optical Materials by a Digital Wavefront Interferometer

Xu Weigang

Abstract

This paper describes a method for the homogeneity measurement of optical material which is free from the system errors and the sample geometrical errors. Using a microcomputer the variations of the refractive index and the thickness apart from a linear slop can be measured accurately by means of analyzing and processing four interferograms. Measurement results of two pieces of glass are given with the accuracy analysis. It shows the accuracy is 0.0000004 for a 2.5 cm thick sample.