

一种简单的显微物镜波面 像差测定干涉仪

向才新 韩昌元 贾林贤 王立升
(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

提出一种结构简单的显微物镜波面像差测定干涉仪。该仪器可以测定各种倍率物镜轴上、轴外多种波长的波面像差等光学性能参数,并分析了仪器的系统误差。

关键词:简单的显微物镜波差测定干涉仪。

一、前 言

星点检验广泛用于显微物镜的加工和像质的检测。虽然,我们曾指出,星点法可以估值波面像差^[1]。但准确的定量检测仍必须采用干涉仪。特别现在用干涉仪与微机相结合,检测功能大为增加,它可以检测各种与光瞳函数有关的光学特性函数或参数,比如,传递函数、中心点亮度比、点列图、几何像差等等^[2]。

远在廿年代,就有 Twyman 的显微物镜波面像差测定干涉仪^[3]。近期,则有 Hariharan, P. 和 D. Sen 的环行径向剪切干涉法^[4], Steel, W. H. 的双程径向剪切干涉法^[5],以及伍树东的点衍射干涉法^[6]等。方法[3]、[4]、[5]不能作轴外和多种波长的波面像差测定,且仪器结构复杂,元部件精度要求较高,较难加工。方法[6]虽无方法[3]、[4]、[5]的缺点,但其针孔较难制作,(特别用于高倍物镜检测的)、且不同数值孔径的物镜、需配合不同孔径的针孔。我们认为采用下述简单形 Fizeau 干涉仪,可以无上述诸缺点。

二、原理与结构

原理与结构的示意图如图1所示。

干涉棱镜由一立方体分束棱镜、一平凹透镜和一平凸透镜三者胶合而成。平凹与平凸透镜两者球面的曲率中心重合。扩展镜的焦点、干涉棱镜球面的曲率中心和被测物镜轴上像点三者相重合。标准球面反射镜的曲率中心与被测物镜的物点相重合。

除干涉棱镜的参考面和标准球面反射镜的球面不镀膜外,其余各面均镀增透膜。

来自激光器的激光、经滤光片、转向平面镜、扩展镜、针孔,无像差、无色差地通过干涉棱镜*。在参考面处,部份反射、部份折射。反射光作为参考光经分束面通过放大镜;折射光通

收稿日期:1986年11月17日;收到修改稿日期:1987年3月9日

* 由于扩展镜前方安置有针孔,扩展镜无须是严格消失差的。

过被测显微物镜、标准球面反射镜，作为检测光束。用监视镜调正检测光束，使其自准返回并通过放大镜。参考与检测两光束通过放大镜后相叠加形成等厚干涉条纹。通过放大镜

(由于显微物镜出瞳口径较小、将其像放大之后、便于观测干涉条纹)对焦被测物镜出瞳处，则可以目视判断或照相记录、或用干涉数据自动处理系统来测得波面面形、峰谷值、均方根值、像差值、以及传递函数、中心点亮度等值。

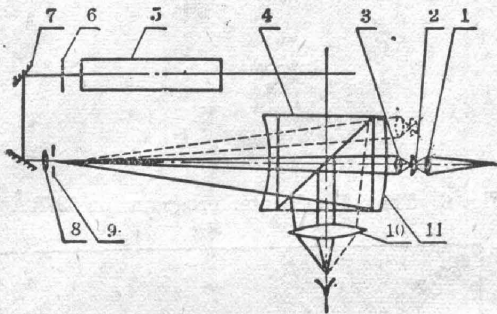


Fig. 1 Schematic diagram of the principle and construction of the simple interferometer

1—monitor lens; 2—standard spherical surface;
3—tested objective; 4—interference prism; 5—
multi-colour laser; 6—filter; 7—deflection
mirror; 8—expander; 9—pinhole; 10—
magnifier; 11—reference surface

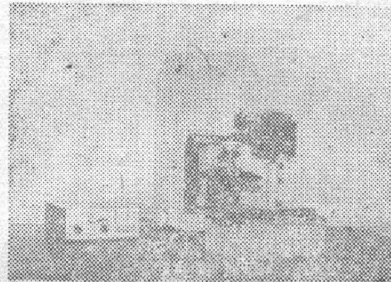


Fig. 2 Exterior view of the simple interferometer

由上述仪器结构和测试原理可知，该仪器实质上是用一台简单的 Fizeau 干涉仪按自准光路来检测显微物镜。仪器外形如图 2 所示。

作轴外测定时，只须把被测物镜与标准球面反射镜垂轴移动到所测轴外某一点处，并使检测光束自准返回，如图 1 中虚线部份所示。在垂轴移动被测物镜与标准球面反射镜后，两者间距的变化量要求远小于被测物镜的景深，比如小于 $0.2 \mu\text{m}$ 以下，以保证物距不变。为此我们采用联动镜头夹持器，该夹持器把被测物镜连同标准球面反射镜一同垂轴移动到轴外所测某点处，然后微量 ($0.5 \text{ mm} \sim 2 \text{ mm}$) 移动标准球面反射镜，使检测光束自准返回。

测试不同波长的光学性能，只须变换滤光片、选用不同的波长即可。

色差的测定：沿轴移动标准球面反射镜，由干涉图确定某一波长的最佳像面位置（这时，干涉条纹最直或干涉条纹数最少）。变换波长后，由同一位置处的另一波长的干涉图确定该波长的最佳像面的离焦量^[2]，此离焦量即为这两种波长的色差；或移动另一波长时的标准球面反射镜，直至其最佳像面位置处，此位置的改变量，即为这两种波长的色差。

图 3、4、5、6 分别是日制 Olympus 显微物镜 ($20\times$, N. A. 0.4) 的 6360 \AA 与 5378 \AA 两

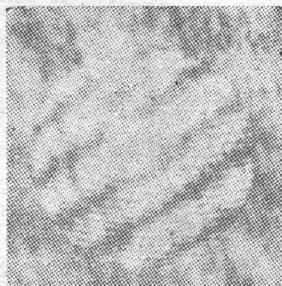


Fig. 3 The on-axis interferogram for 6360 \AA

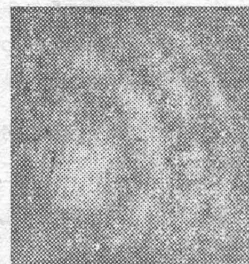


Fig. 4 The on-axis interferogram for 5378 \AA



Fig. 5 The off-axis interferogram for 6360 Å



Fig. 6 The off-axis interferogram for 5378 Å



Fig. 7 Isometric view of the tested wave front

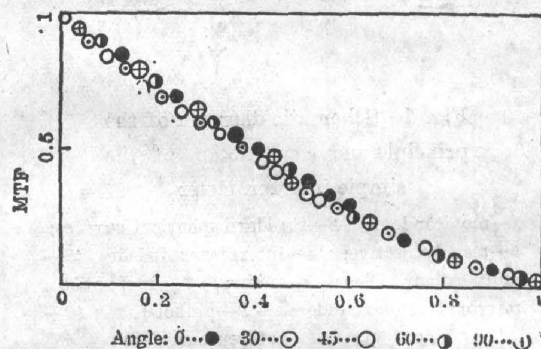


Fig. 8 MTF for various azimuth angle

种波长的轴上、轴外干涉图。由图 3、4 得知: 6360 Å 与 5378 Å 两波长的色差为 $\lambda/2$ 。

图 7 是用干涉数据自动处理系统对相应于图 3 处所得的波面立体图, 左上角为峰谷值、下角为最佳像面的离焦量, 右上角为均方根值。各数的单位均为波长; 图 8 则是相应于图 3 处的不同方位角的传递函数值。

三、干涉方程和系统误差

实际上, 由于加工装配等误差, 扩展镜的焦点、干涉棱镜两个球面的曲率中心三者不重合, 因而来自扩展镜的光波是有像差地通过干涉棱镜的。参考与检测两光束的波面像差分别由下式表示:

$$W_{\text{参}} = \Delta W_{\text{棱}} + 2N \cdot \Delta W_{\text{参球}} \quad (1)$$

$$W_{\text{检}} = \Delta W_{\text{棱}} + 2(N-1) \cdot \Delta W_{\text{参球}} + 2(\Delta W_{\text{物}} + \Delta W_{\text{准球}}) + \left[\left(\frac{\partial}{\partial \rho} \Delta W_{\text{棱}} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \Delta W_{\text{参球}} \right)^2 \right] \cdot S \quad (2)$$

(1)、(2)式中的 $\Delta W_{\text{棱}}$ 、 $\Delta W_{\text{参球}}$ 、 $\Delta W_{\text{物}}$ 、 $\Delta W_{\text{准球}}$ 分别是干涉棱镜的波面像差、参考球面的面形差、被测显微镜的波面像差和标准球面的面形差; N 为干涉棱镜的折射率; S 为被测物镜出瞳至参考球面的间距; ρ 为在被测物镜出瞳处的光线高度。(2)式中末一项是 $\Delta W_{\text{棱}}$ 、 $\Delta W_{\text{参球}}$ 在被测物镜出瞳与参考球面之间因波面变形传播所衍生的波面像差^{[7]*}。

* 对干涉花样的影响, $\Delta W_{\text{棱}}$ 、 $\Delta W_{\text{参球}}$ 的比之其衍生波面像差的小, 而 $\Delta W_{\text{物}}$ 、 $\Delta W_{\text{准球}}$ 则大于衍生波面像差, 因而仅考虑前两者的衍生波面像差的作用。

由(1)、(2)式之差,并考虑到 $\Delta W_{\text{参球}} \ll \Delta W_{\text{被}}$, 得到:

$$\Delta W = 2(\Delta W_{\text{参球}} + \Delta W_{\text{物}} + \Delta W_{\text{准球}}) + \left[\frac{\partial}{\partial \rho} \Delta W_{\text{被}} \right]^2 \cdot S. \quad (3)$$

(3)式即为本方法所采用的简易 Fizeau 干涉仪的干涉方程。

(3)式中除 $\Delta W_{\text{物}}$ 外,其余三项均为系统误差。则总系统误差 $\Delta W_{\text{系差}}$ 为该三项之和:

$$\Delta W_{\text{系差}} = 2(\Delta W_{\text{参球}} + \Delta W_{\text{准球}}) + \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \Delta W_{\text{被}} \right)^2 \cdot S. \quad (4)$$

按一般技术水平,对通光口径分别为 $\phi 40$ (曲率半径 160)的参考球面和 $\phi 20$ (曲率半径 10)的标准球面不难实现;整个面形的局部误差 $< \lambda/20 \sim \lambda/30$ 。使用时,不论轴上、轴外测定以及被测物镜倍率的大小与否,参考面实际使用的通光口径总是小于 $\phi 10$ 。因而平均来说参考球面实际使用时的面形局部误差将有:

$$\Delta W_{\text{参球}} < \lambda/80 \sim \lambda/100. \quad (5)$$

由于标准球面的实用面积较大,因而其实用误差 $\Delta W_{\text{准球}}$ 也较大。对于高倍被测物镜:

$$\Delta W_{\text{准球}} < \lambda/20 \sim \lambda/40. \quad (6)$$

对于低倍被测物镜:

$$\Delta W_{\text{准球}} < \lambda/50 \sim \lambda/100. \quad (7)$$

当干涉棱镜加工误差不严重并仅有球、慧差的情况,衍生波面像差有下面的近似式^[附录]:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{棱衍}} &= \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \Delta W_{\text{系}} \right)^2 \cdot S \\ &\doteq \frac{1}{4} N^2 (N^2 - 1)^2 \cdot [\sqrt{(\Delta r)^2 + (\Delta T)^2} + 3\Delta T]^2 \cdot \frac{(\Delta r)^2 + (\Delta T)^2}{r^4} \cdot U^2 \cdot S. \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式中, U 、 N 分别为被测物镜的孔径角和干涉棱镜的折射率; r 、 Δr 、 ΔT 分别是干涉棱镜前球面的曲率半径、两球面曲率中心的纵、横向的偏离量。当 $N=1.5$ 、 $r=120\text{mm}$ 、 $U=0.1$ 、 $S=20\text{mm}$, 根据(8)式,计算了几种不同 Δr 、 ΔT 时的 $\Delta W_{\text{棱衍}}$ 值,如下表:

Table 1 The calculated values of $W_{\text{棱衍}}$ for various Δr , ΔT

$\Delta r = \Delta T$ (mm)	$\Delta W_{\text{棱衍}}$
2	$\lambda/947$
3	$\lambda/187$
5	$\lambda/25$

表 1 表明: $\Delta r = \Delta T < 3\text{mm}$ 时、 $\Delta W_{\text{棱衍}} < \lambda/200$, 这表明干涉棱镜容许有较大的加工公差,因此比较容易研制。

由表 1 与(5)、(6)、(7)式,得到:

$$\Delta W_{\text{棱衍}} \ll \Delta W_{\text{参球}} \ll \Delta W_{\text{准球}}. \quad (9)$$

$$\Delta W_{\text{系差}} = 2(\Delta W_{\text{参球}} + \Delta W_{\text{准球}}) + \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \Delta W_{\text{被}} \right)^2 \cdot S < \lambda/11 \sim \lambda/25. \quad (10)$$

上述结果表明: 1. 干涉棱镜的加工是比较容易的,其系统误差可以忽略不计; 2. 系统误差最大的是标准球面的面形误差,整个仪器精度取决于这种系统误差的大小。标准球面应精加工,整个面形的局部误差最好在 $\lambda/40 \sim \lambda/50$ 之间。

三、结 论

本仪器有下述优点: 1. 采用了简易的 Fizeau 干涉仪系统和联动镜头夹持器的轴外测定机构, 整个仪器结构简单, 较易加工; 2. 功能较全, 可以检测高低倍显微物镜的轴上、轴外多种波长的波面像差、色差等多种光学性能参数; 3. 系统精度基本满足使用要求; 4. 干涉条纹对比良好; 5. 采用了“对焦监视系统”, 操作方便。其缺点是, 采用了多色激光器、价格较贵。

参加本工作的还有赵淑清、朱天贤两同志, 徐景华同志代为制图, 在此一并致谢。

附 录

当 $\Delta W_{\text{球}}$ 仅包含初级球、慧差时, 可用下式表示^[8]:

$$\Delta W_{\text{球}} = \frac{1}{8} S_{\text{I}} \left(\frac{\rho}{y} \right)^4 + \frac{1}{2} S_{\text{II}} \left(\frac{\rho}{y} \right)^2. \quad (\text{A1})$$

(A1) 式中 ρ, y 分别为被测物镜出瞳处的光线高度和光瞳半径; $S_{\text{I}}, S_{\text{II}}$ 分别为球、慧差系数。

$$S_{\text{I}} = A^2 \cdot y \cdot \Delta \left(\frac{U}{N} \right), \quad (\text{A2})$$

$$S_{\text{II}} = A \cdot B \cdot y \cdot \Delta \left(\frac{U}{N} \right). \quad (\text{A3})$$

由 (A1)、(A2)、(A3) 式, 得:

$$\left(\frac{\partial}{\partial \rho} \Delta W_{\text{球}} \right)^2 \cdot S = \frac{1}{4} (A + 3B)^2 \cdot A^2 \cdot \left(\frac{N^2 - 1}{N} \right)^2 \cdot U^2 \cdot S. \quad (\text{A4})$$

设干涉棱镜两球面的曲率中心的纵、横向偏离间距, 分别为 $\Delta r, \Delta T$; N, r 分别为干涉棱镜的折射率和前球面的曲率半径, 则有

$$A = N \cdot \sqrt{(\Delta T)^2 + (\Delta r)^2} / r. \quad (\text{A5})$$

$$B = N \cdot \Delta T / r. \quad (\text{A6})$$

代 (A5)、(A6) 式于 (A4) 式, 即得衍生物面像差表示式:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{球}} &= \left(\frac{\partial}{\partial \rho} \Delta W_{\text{球}} \right)^2 \cdot S \\ &= \frac{1}{4} N^2 (N^2 - 1) \cdot [\sqrt{(\Delta T)^2 + (\Delta r)^2} + 3\Delta T]^2 \cdot \frac{(\Delta T)^2 + (\Delta r)^2}{r^4} \cdot U^2 \cdot S. \end{aligned} \quad (\text{A7})$$

参 考 文 献

- [1] 向才新;《光学学报》, 1983, 3, No. 2 (Mar), 146.
向才新;《光学学报》, 1983, 3, No. 6 (Sep), 557.
- [2] J. S. Loomis; *Fringe User's Manual*, Version 2, (Optical Sciences Center, University of Arizona, Tucson Arizona, November 1976), 43~57.
- [3] F. Twyman; *Trans. Faraday Soc.*, 1920, 16, 208.
- [4] P. Hariharan, D. Sen; *Opt Acta*, 1962, 9, No. 2 (Apr), 159.
- [5] W. H. Steel; *J. Sci. Instrum.*, 1965, 42, No. 2 (Feb), 102.
- [6] Wu Shutung, Xu Chenling et al.; *The 13th congress of the international commission for optics*, (ICO-13: Sapporo, August 20~24, 1984), 458.
- [7] D. Malacara; *Optical Shop Testing*, (John Wiley and Sons, 1978), 68.
- [8] H. H. Hopkins; *Wave Theory of Aberrations*, (Oxford, 1950), 79.

A simple interferometer for testing microscopic objective wave aberrations

XIANG CAIXIN, HAM CHANGYUAN JIA LINXIAN AND WANG LINSHENG
(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 17 November 1986; revised 9 March 1987)

Abstract

We have developed a simple interferometer to test the microscopic objective. It may be used to test the on- or off-axis various wavelength wave aberrations, chromatic aberration and other optical performances of various magnification microscopic objective. We have described and discussed the system errors of this instruments

Key Words: simple interferometer for testing microscopic objective wave aberrations.

订 证

本刊 7 卷 8 期《多光子过程和自发辐射对激光诱导自电离的影响》一文中图 1 应是下图(1); 图 2(b)应是下图(2)。特此订正。

