

全息干涉显微法测量自聚焦棒透镜的折射率分布

石之琅 黄献烈

(厦门大学物理系)

提要: 给出一种用全息干涉显微法测量自聚焦棒透镜折射率分布的测量原理、测量结果和误差分析。这种方法具有测量精度高、视场大、数据处理简单和放大倍数连续可调等优点。

Measurement of refractive index profile of selfoc rod lenses by holographic interference microscopy

Shi Zhilang, Huang Xianlie

(Department of Physics, Xiamen University)

Abstract: A method for measuring the refractive index profile of selfoc rod lenses using the holographic interference microscopy is presented. Principle of method, measurement results and error analysis are given. It has the advantages of high accuracy, wide field of view, simple data processing and continuous variable magnification.

一、引言

折射率分布的准确测量对于自聚焦棒透镜性能的评价和制造过程的控制都是很重要的。已经提出了好多种测量方法,如纵向干涉法^[1]、横向干涉法^[2]、散射图样法^[3]、端面反射法^[4]和聚焦法^[5]等,这些方法的优缺点已有专文评述^[6,7],它们都在一定的场合使用。其中以纵向干涉法和聚焦法的测量精度最高,但它们的数据处理通常较繁杂,视场通常较小,不容易测量直径2 mm以上的棒透镜。

用全息干涉显微法^[8]测量,可拍得折射率沿径向分布的干涉图。从图上环形干涉条纹的分布情况,可直观地了解棒透镜的性能。测量各干涉环的半径 r ,作 $(n_0 - n_r)$ 与 r^2 的关系曲线,可定量了解棒透镜的径向折射率分布与抛物线分布的符合程度。由曲线的斜率可求得分布常数。

二、测量原理

全息干涉显微法测量棒透镜折射率分布

收稿日期:1984年1月9日。

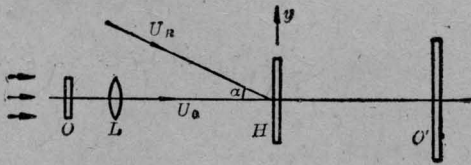


图1 干涉全息图的记录

O—待测棒透镜；L—显微物镜；H—全息干版；O'—棒透镜的放大象

的原理如图1所示。平行激光束垂直射入待测棒透镜O，显微物镜L将O成一适当放大的象在屏O'上。然后在O'前方某处放全息干版H，这时在H上的光场分布就是物光 U_0 。再引入倾斜($\alpha \approx 20^\circ$)的平行参考光 U_R ，作第一次全息记录。去掉棒透镜，在同一全息干版上作第二次记录。这就是双曝光全息干涉法。

干版经洗相处理后成为一张携带棒透镜径向折射率分布信息的全息图。当全息图放回原处，并用原平行参考光重现时，则在屏O'上得到两个相干象的迭加。一个是待测棒透镜的放大象，另一个是棒透镜所在环境的放大象。两象迭加的结果，放大的棒透镜重现象的光强分布被余弦平方因子所调制，形成干涉条纹，即：

$$I = 4 \cos^2\left(\frac{1}{2} \phi_r\right)$$

其中 ϕ_r 为与 r 有关的位相。对于自聚焦棒透镜，

$$\phi_r = \frac{2\pi}{\lambda} n_r t$$

由于棒透镜的长度 t 是固定的，这些干涉条纹的形状就反映了棒透镜的径向折射率分布。观察干涉图样，可直观地了解棒透镜的性能。

若干干涉环环心为亮纹，

$$\frac{1}{2} \phi_r = \frac{\pi}{\lambda} n_0 t = m\pi,$$

则对于干涉环的第 k 条亮纹，

$$\frac{\pi}{\lambda} n_r t = (m - k)\pi$$

两式相减得：

$$n_0 - n_r = \frac{k\lambda}{t}. \quad (1)$$

作 $(n_0 - n_r)$ 与 r^2 的关系曲线，可定量了解棒透镜的径向折射率分布与抛物线分布的符合程度。

三、实验装置和结果

实验装置如图2所示。从激光器射出的激光，经反射镜 M_1 、 M_2 和准直系统 L_1 、 L_2 成为平行光束。平行光束经分束镜BS分为两束。一束经反射镜 M_3 和光阑P射到待测的棒透镜O上，再经显微物镜 L_3 在全息干版H后面全息图重现时放底片的位置O'上成一放大的实象，这就是物光束。另一束经反射镜 M_4 、 M_5 和扩束准直系统 L_4 、 L_5 成为扩束平行光射到全息干版H上，这就是倾斜的参考光。

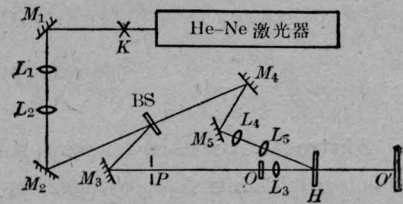


图2 测量棒透镜折射率分布的实验装置

K—快门； M_{1-5} —反射镜；BS—分束镜； L_1 、 L_2 —准直系统；P—光阑； L_3 —显微物镜； L_4 、 L_5 —扩束准直系统；O—待测棒透镜；H—全息干版；O'—重现时放底片的位置

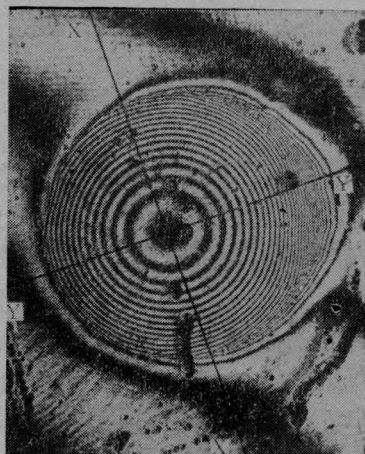
待测的棒透镜O装在一个五维调节架上。实验装置的调整如一般拍摄全息图的做法相同，调整之后作第一次曝光；去掉棒透镜再作第二次曝光。干版经洗相处理之后就成为一张双曝光的全息图。

当全息图放回原处，遮去物光束并用原参考光重现时，在全息图后面的O'处放置底片，拍摄棒透镜的折射率分布图。

采用上述实验装置，我们对1423研究所提供的两种自聚焦棒透镜样品进行拍摄，所

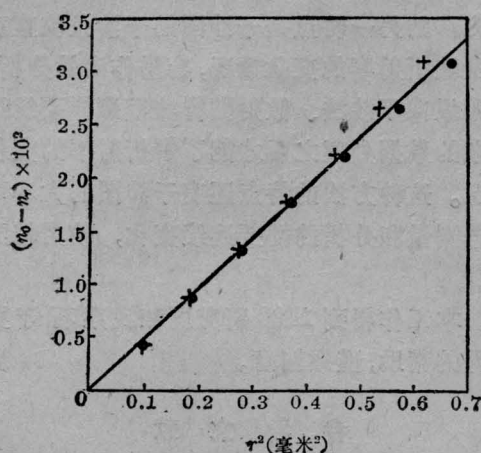


(a) 样品一, 放大倍数 $M=32.4$

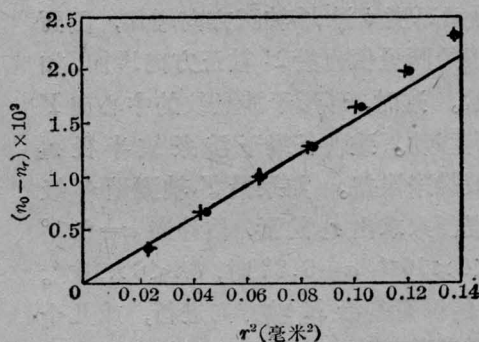


(b) 样品二, 放大倍数 $M=42.8$

图3 棒透镜的折射率分布图



(a) 样品一



(b) 样品二

图4 棒透镜的折射率分布曲线

+-X方向测量点; ●-Y方向测量点

表1 自聚焦棒透镜的测量和计算结果

| 样品编号 | 直径 D (mm) | 两端面的不平行度 | 长度 t (mm) | n_0 | $\text{tg } \theta$ | A (mm^{-2}) |
|------|-------------|----------|-------------|--------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 1.92 | 15' | 0.144 | 1.6570 | 0.0478 | 0.0577 |
| 2 | 1.03 | 8' | 0.189 | 1.6550 | 0.0156 | 0.1885 |

得的折射率分布图示于图3。由图可见,这两种样品的干涉环中心均不在棒透镜的中心轴上,这主要是由于棒透镜两端面的不平行度引起的。棒透镜外围的套层玻璃上的干涉条纹反映了棒透镜两端面的不平行度。

我们对图3的干涉环半径进行测量,测量是沿互相垂直的X、Y方向进行的。从测量数据绘制 $(n_0 - n_r) \sim r^2$ 关系曲线如图4所

示。其中 $(n_0 - n_r)$ 与干涉级 k 的关系由式(1)确定。从图中可见,当测量点的 r 值较小时,偏离直线较小,表明符合抛物线分布。

根据图4的曲线,求出斜率 $\text{tg } \theta$,就可计算折射率分布中的

$$n_r = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} A r^2 \right)$$

常数 A 。测量和计算结果列于表1。

四、讨 论

这种测量方法的折射率测量误差 δn 主要来源于干涉图上环形干涉条纹的测量误差和棒透镜两端面的不平行度。

干涉图上环形干涉条纹半径的测量误差 δr 引起的折射率测量误差 $\delta n = n_0 \Delta r \delta r$ 。在我们的测量装置中，当采用多次测量取平均的方法，可使 $\delta r < 3 \times 10^{-3}$ mm，则 $\delta n < 3 \times 10^{-4}$ 。如果测量象纵向干涉法^[1]那样采用自动化和计算机系统，测量误差还可减少。

棒透镜两端面不平行度对折射率测量误差的分析如下：设棒透镜两端面的不平行度 α 引起透镜厚度 t 沿 Y 轴正方向增加，因而使折射率的测量值也沿 Y 轴正方向增加，如图 5 所示。这时，环形干涉条纹的中心向 Y 轴正方向移动。致使各级干涉条纹半径 r_k 的测量值带来误差。如果沿 Y 轴测量各级条纹的直径来求出 r_k 的话，估计当 $\alpha = 0.1^\circ$ 时， $\delta n < 4 \times 10^{-4}$ ； $\alpha = 0.3^\circ$ 时， $\delta n < 6 \times 10^{-4}$ 。如果 r_k 的测量是沿 X 轴方向进行，或几个方向测量后取平均，则当 $\alpha = 0.1^\circ$ 时， $\delta n < 2$

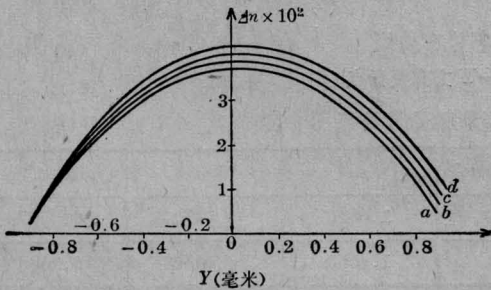


图 5 棒透镜的不平行度引起的误差分析
a— $\alpha = 0^\circ$ ；b— $\alpha = 0.1^\circ$ ；c— $\alpha = 0.2^\circ$ ；d— $\alpha = 0.3^\circ$

$\times 10^{-4}$ ； $\alpha = 0.3^\circ$ 时， $\delta n < 3 \times 10^{-4}$ 。

其他引起折射率测量误差的来源还有平行光垂直入射棒透镜端面的误差、端面的研磨精度、透镜厚度造成的光线弯曲和全息图制作与重现的误差等。但这些误差在我们的装置中比起前两种误差可略去。因此测量系统的精度约为 5×10^{-4} ，与纵向干涉法^[1]的测量精度相当。

这种测量方法的主要特点是视场大，可以测量直径 2 mm 以上的棒透镜。这是由于全息法的特点引起的。全息底片上记录的是放大象的波前，而不是放大象本身。这种测量方法的另一特点是干涉图的干涉条纹直观地反映折射率的变化情况，容易作定性分析，不象纵向干涉法、散射图样法等那样要经过繁杂的数据处理之后才能了解折射率的变化情况。这种方法的特点还有干涉图的大小可根据测量和分析的需要连续变化，使用较灵活。

本工作得到 1423 研究所和我系石守勇讲师的帮助，谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] B. C. Wonsiewicz *et al.*; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, 1048.
- [2] A. M. Hunter II *et al.*; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, 634.
- [3] T. Okoshi, K. Hotate; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, 2756.
- [4] W. Eickhoff, E. Weidel; *Opt. Quantum Electron.*, 1975, **7**, 109.
- [5] D. Marcuse, H. M. Presby; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, 14.
- [6] 大越孝敬；光学纤维基础，第九章，人民邮电出版社，1980。
- [7] 陈跃；《光纤通讯》，1983，No. 2，30。
- [8] K. Snow, R. Vandewarker; *Appl. Opt.*, 1968, **7**, 549.