

测量光学系统焦平面能量分布的一种方法

邓锡铭 赵庆春

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

介绍了测量加工不完善光学系统焦平面能量分布的“光线追迹”法。它类似于哈特曼方法,用该法测量了用于激光等离子体实验的非球面-球面透镜的焦点大小及能量分布,为改进透镜加工及计算靶面上的能量密度提供了依据。

在激光等离子体实验中,靶面上的激光能量分布是一个重要的参量。它除了取决于激光束的位相和振幅空间分布之外,还取决于靶室内聚焦光学系统的像差。为此,使用了一种“光线追迹”测量法,用以测定加工不完善的非球面-球面聚焦透镜的焦点弥散圆。

用于靶室的光学系统,一般采用单片非球面透镜,要求相对孔径很大($f/1.0 \sim f/2.0$),加工精度受到限制。其在轴上的焦点弥散圆比衍射 Airy 斑直径要大一个数量级左右。在这种特定的条件下,采用“光线追迹法”测量是有效的。而这种测量法所提供的入射光束的各个局部能量密度与焦平面的各个局部能量密度的直接对应关系,也正是我们所需要的。

一、测量方法

测量用的光路安排如图1所示。He-Ne 激光器 HN 所发射出的单横模激光束,经高光学质量的扩束器 EX , 扩展为 $\phi 60$ 毫米平行光束。在被测透镜 L 前放置一个直径约为透镜通光孔径 $1/10$ 的可移动光阑 MA , 即把透镜分为近百个局部。让平行光通过 MA 。这样在非球面透镜 L 的焦平面上,就形成一个焦斑(简称“小孔焦斑”)。在 L 的通光孔径内,移动 MA , 就得到 L 各个局部形成的“小孔焦斑。”逐个测定这些“小孔焦斑”的中心位置。由

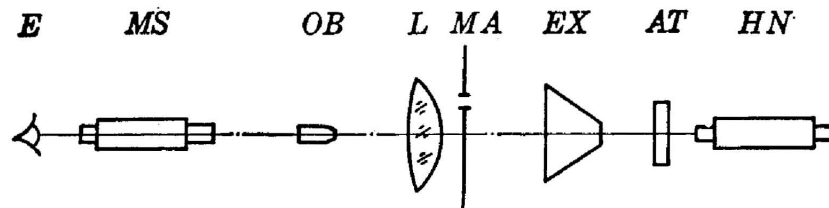


图1 测量装置示意图

HN —单横模 He-Ne 激光器; AT —衰减片; EX —扩束器; MA —可移动光阑; L —待测非球面-球面透镜; OB —显微镜物镜($40\times, N.A.=0.65$); MS —读数显微镜($30\times$); E —眼睛

Fig. 1 Schematic diagram for measurement

NH —single mode He-Ne laser; AT —attenuator; EX —beam expander; MA —moveable stop; L —tested aspherical—spherid lens; OB —microscopic objective($40\times, N.A.=0.65$); MS —a reading microscopy ($30\times$); E —eye

于透镜面形的不完善, 这些“小孔焦斑”一般无规分布在焦平面的一定区域内。考虑到整个

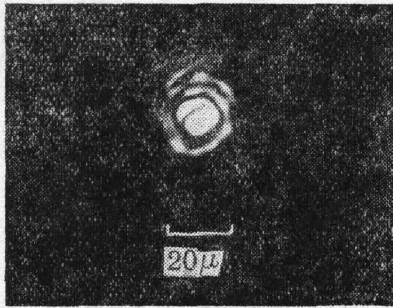


图2 非球面-球面透镜焦斑
(通光口径 $\phi 55$ mm, $f/2.0$)

Fig. 2 Focal spot of an aspherical-spherical lens (aperture $\phi 55$ mm $f/2.0$)

透镜的焦点弥散圆远大于相应的衍射 Airy 斑, 在这种条件下, 焦平面某区域内的“小孔焦斑”数目与“小孔焦斑”总数(这里是 93 个)之比, 应正比于入射光束通过整个透镜后, 落在焦平面上该区域内的相对能量。因此, 只要能准确地测量出各个小孔焦斑的中心位置, 就可得出能量分布。如图 1 所示, 用 $40\times$ 显微镜的物镜 OB (它的数值孔径必须与被测透镜的相对孔径匹配, 这里 $N.A=0.65$) 及 $30\times$ 测量显微镜 MS 来测定小孔焦斑中心的座标。

被测透镜为非球面-球面结构, 即可消除轴上的球差, 也可消除彗差, 其典型设计参数为通光口径 $\phi 55$ mm, $f/2.0$ 。其焦斑如图 2 所示。可移动光阑孔径为

$\phi 5$ mm。在实验中, 透镜被分为 5 个同心带, 每个带切取的光束数目分别为 6, 12, 19, 25, 31。

二、有关测量的几个问题

1. 可能达到的定位精度

由于可移动光阑的直径只有被测透镜全孔径的 $1/10$, 因此, 通过移动光阑的光束, 其 Airy 斑直径是通过被测透镜全孔径光束的 Airy 斑直径的 10 倍。实验结果表明, 在透镜大部分面形上, 加上移动光阑后的衍射斑畸变较少, 接近理想情形, 如图 3 所示。一小部分的衍射斑有畸变, 如图 4 所示。这是局部面形有较严重缺陷所引起的。即使在这种情况下, 通过测量显微镜定出的小孔焦斑中心坐标, 精度仍可达小孔焦斑直径的 $1/10$, 即定位精度可达透镜全孔径衍射 Airy 斑的直径。显然, 对于近 10 倍于衍射斑的焦点弥散圆来说, 这样的测量精度是可用的。如果整个透镜的焦点弥散圆仅略大于相应的 Airy 斑, 这样的精度就

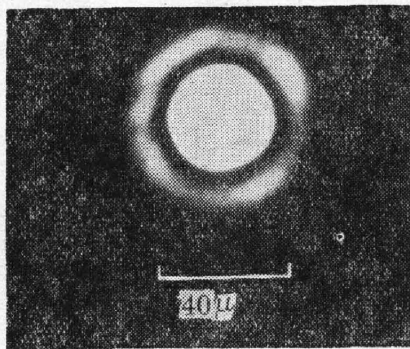


图3 $\phi 5$ mm 光束经透镜后, 在焦平面上的衍射斑
Fig. 3 Diffraction spot on the focal plane of $\phi 5$ mm beam after passing through lens

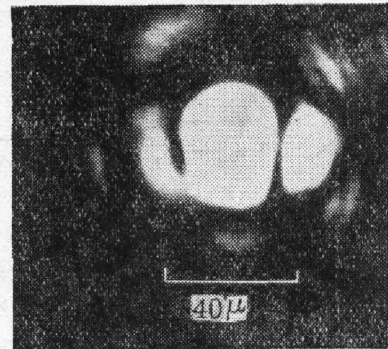


图4 $\phi 5$ mm 光束经透镜面形有缺陷处之后, 在焦平面上产生的衍射斑
Fig. 4 Diffraction spot of $\phi 5$ mm beam after passing through an imperfect part of lens

不够了。

2. 要求高单色亮度光束

对测量光束的单色亮度要求,可作如下考虑。如果光束谱线宽度为 $\Delta\lambda$, 则相干长度为 $\Delta l = \lambda^2 / \Delta\lambda$, 其中 λ 是中心波长。这样,通过可移动光阑的光束功率 P 只有

$$P = \frac{c \cdot N \cdot h\nu}{\Delta l} = \frac{c \cdot \Delta\lambda \cdot N \cdot h\nu}{\lambda^2},$$

其中 c 是光速, N 为光子简并度, $h\nu$ 为光子能量。如果为了避免色差的影响,取 $\Delta\lambda = 10 \text{ \AA}$, $\lambda = 6 \times 10^{-4} \text{ mm}$, 则 $P \approx 3 \times 10^{-7} \cdot NW$ 。如果采用普通光源,一般光子简并度 $N < 10^{-3}$, 即 $P < 10^{-10} \text{ W}$ 。如此低的光通量,无论用目视或光电元件都难以进行焦斑定位测量。但是,

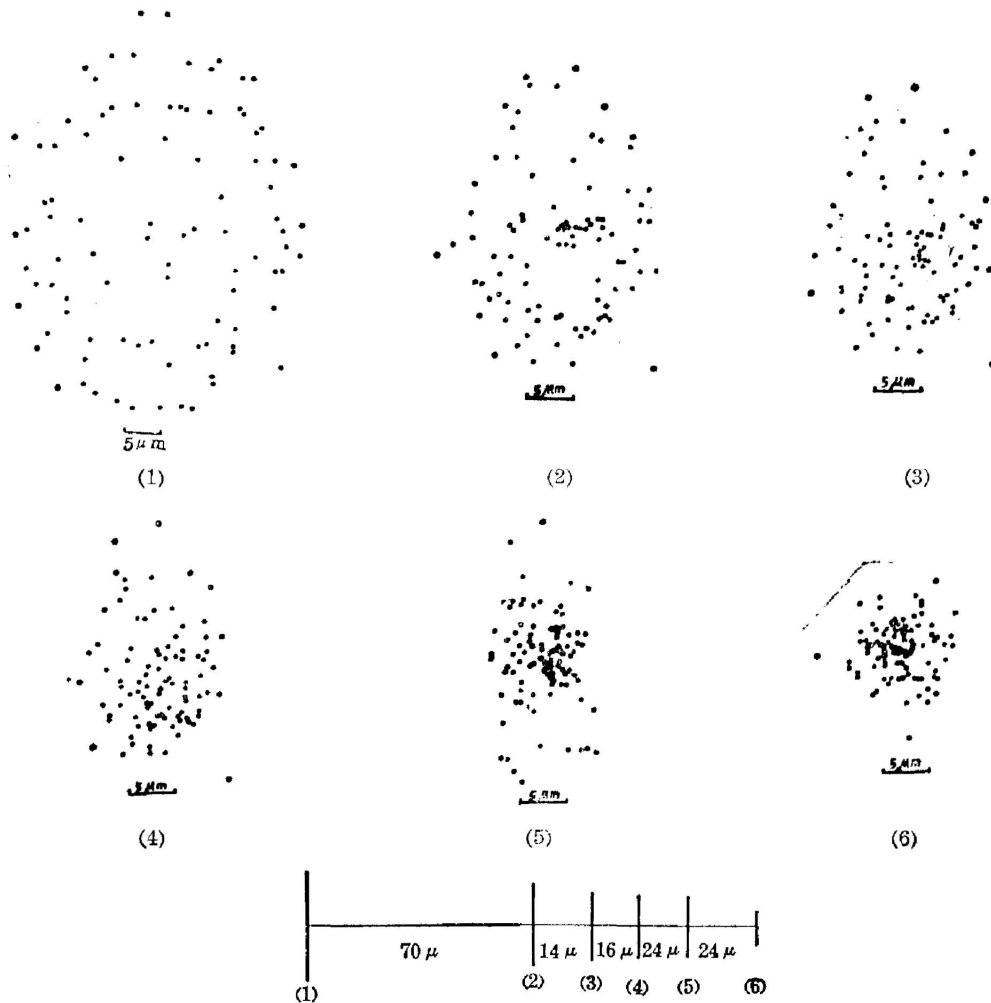


图5 测量和计算相继六个截面上“小孔焦斑”的分布与各截面之间的相对位置图。截面(1)和(3)的分布是测得的,其余是计算的。

图中标出了截面之间的距离。

Fig. 5 Distribution focal spots on the successive six cross sections, and relative position of each cross section.

Distribution focal spots on cross sections 1 and 3 are measured, the rest are calculated. spacing of two cross sections are shown

当采用 He-Ne 激光束时, $N > 10^{10}$, 测量起来就很方便。因此, 这种测量必须使用高单色亮度的激光光源。该光源也必须是单横模的, 否则, 通过可移动光阑的光束的衍射斑就会扩大或变形, 使测量精度降低。

3. 确定焦平面

精确确定焦平面位置是测量焦点弥散圆能量分布的关键, 一般测得的并不一定是最小焦点弥散圆的能量分布, 往往偏大。为了准确确定焦平面位置, 我们在焦平面附近 (例如 $\pm 50 \mu\text{m}$) 选取两个参考截面进行测量。根据光线与这两个截面相交点的空间坐标, 按下

$$\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1} = \frac{Z - Z_1}{Z_2 - Z_1},$$

其中 (X_1, Y_1, Z_1) 和 (X_2, Y_2, Z_2) 是一“光线”分别与两参考截面的相交点的空间坐标。选取不同位置的截面, 计算每条“光线”与它的相交点的坐标, 就可知道该截面上的能量分布, 从而找到能量分布最集中的截面—焦平面的位置, 并在该截面处再直接测量一次进行核对, 其测量及计算的结果如图 5 所示。通过这样的测量还可直接显示出整个焦深区域内各截面上的能量分布。这对靶室的调焦精度及计算靶面上功率密度也是重要的。



图 6 另一个非球面-球面透镜的象差。“+”表示第五带的小孔焦斑位置。

Fig. 6 Aberration on another aspherical-spherical lens. “+” indicates the position of the points formed by edge of the lens

用这种测量方法曾对数批非球面-球面透镜进行过测量, 发现靠近中心的第一带和靠近边缘的第五带象差较大, 如图 6 所示。据此改进加工工艺后, 第一带的质量有了很大的

改善, 第五带也有相当的改善。对于 $\phi 60 \text{ mm}$ 通光孔径、 $f/2.0$ 的透镜, 目前加工的透镜质量一般能达到 80% 以上的能量集中在小于 $\phi 10 \mu\text{m}$ 的范围内。

作者对翁自强同志提供非球面透镜设计参数表示感谢。

Measurement of energy distribution on focal plane of an imperfect processed optical system

DENG XIMING AND ZHAO QINCHUN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 23 November 1980)

Abstract

This paper describes a method of "optical tracing" used to measure the energy distribution on focal plane of an imperfect processed optical system. It is similar to Hartmann method. High brightness He-Ne laser with TEM₀₀ mode output is used as a probing beam. A parallel beam passes through a movable aperture and is focused by a local part of optical system to be measured. Then we determine the position of central point of Airy spot on the focal plane. The spatial coordinate of the point is magnified to 40× by an objective and read out by microscope. Coordinate of each central point of Airy spot corresponding to each local part is obtained if the aperture can be moved in the whole optical system. In the case that the optical system is divided into m parts by the movable aperture, there will be m points on focal plane.

The ratio of the point numbers on a local part of the focal plane to m is proportional to the relative energy of incident beam focused on it.

The accuracy of this method can be up to the magnitude of Airy spot diameter of the whole optical system. The movable aperture is defined as 1/10 of that of the optical system, since the accuracy determining central point of Airy spot of the movable aperture can be up to 1/10 of the spot diameter.

The focal spot size and energy distribution on focal plane of aspherical-spherical lenses for laser-plasma interaction research have been measured using this method. It provides basis for improving lens processing and calculating the energy density on target plane.