

红外光学透镜焦距测量

陈磊 高志山 何勇

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要 采用 CO₂ 激光器作为光源, 热释电摄像机作为探测器, 采集了单缝衍射图像. 根据单缝衍射原理, 测量了不同焦距的一组红外光学锗透镜的单色焦距, 给出了实测结果. 讨论了影响测试的主要误差因素. 通过计算采样数据的调制传递函数, 精确确定被测透镜焦平面的位置. 介绍了图像采集系统长度尺寸的精确标定方法.

关键词 红外; 锗透镜; 焦距

中图分类号 TN214 文献标识码 A

0 引言

在可见光范围内, 常用的测定焦距的方法有: 放大率法、精密测角法、阿贝焦距仪法等^[1]. 上述方法是根据几何光学原理, 针对可见光而言的. 根据物理光学的原理, 又可采用泰伯效应^[2]、单缝衍射等方法, 测量透镜的单色焦距^[1]. 此类方法大多采用已经商品化的 CCD 等作为光电探测器. 在红外波段, 尤其在中远红外波段^[2], 由于红外光不可见, 且用于红外波段的高精度光电探测器价格昂贵, 应用也不广泛, 所以一般难以测定红外光学系统的焦距. 国内曾报道在红外传递函数测定仪上, 应用传统的测角方法对红外光学系统的焦距进行了测量^[3]. 随着红外热成像技术的发展, 红外光学系统的质量愈显重要. 焦距作为红外光学系统的基本特征参数, 必须得到准确测定. 本文根据夫琅和费单缝衍射的原理, 以 CO₂ 激光器作为光源, 测定红外锗透镜的焦距.

1 测量原理

平行光束经过单个狭缝会产生衍射. 在单缝后放置一透镜, 则在透镜的后焦面上即形成一组沿垂直于狭缝方向展开的明暗相间的条纹, 中央条纹最亮, 亦最宽, 如图1所示. 中央条纹对透镜的张角

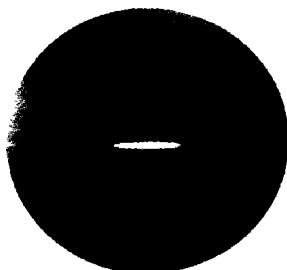


图1 锗透镜单缝衍射图像
Fig. 1 Single slot diffraction image of Germanium lenses

为^[4]

$$\Delta\theta = 2\lambda/a \quad (1)$$

式中 a 为狭缝宽度, λ 为入射光波长, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$.

由于 $\Delta\theta$ 很小, 所以在透镜的焦平面上, 中央条纹的线宽度为

$$\Delta l = \Delta\theta f' = 2\lambda f'/a \quad (2)$$

式中 f' 为透镜的焦距. 于是有

$$f' = \frac{a}{2\lambda} \Delta l \quad (3)$$

由式(3)可知, 在缝宽与入射光波长已知的情况下, 只要测得中央条纹的宽度 Δl , 即可测定透镜的焦距.

2 实验与结果

实验是在我们所研制的红外平面干涉仪上进行的^[5]. 平行光束由干涉仪准直镜提供. 准直光束垂直入射到狭缝上. 被测透镜置于狭缝之后, 将衍射光会聚到透镜的焦平面上, 由热释电摄像机 (PEV) 接收. 测量过程中, 需要注意以下几个关键问题.

2.1 透镜焦平面的确定

式(2)成立的必要条件是探测器准确位于透镜的焦平面上. 因此, 必须首先确定焦平面的位置. 在本实验中, 首先根据 PEV 所接收到的衍射图像的清晰度来判断 PEV 靶面是否位于被测透镜的焦平面上. 由于 PEV 的空间分辨率较低, 为 270TV 线, 所以用清晰度法判断会带来一定的误差. 根据单缝衍射的特性, 本文通过计算调制传递函数 (MTF), 确定焦平面的位置.

在光学传递函数的测量中, 当用一条狭缝作为物, 则狭缝像的光强分布即为线扩散函数 (LSF). 这时, 常用的光学传递函数的一维表达式如下^[4]

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} L(\xi') \exp(-i2\pi f\xi') d\xi'$$

式中 $L(\xi')$ 即线扩散函数. 上式表明, 只要对线扩散函数作一维傅里叶变换, 便可得到光学系统在某一方向上的光学传递函数. 当光学传递函数的模量

(即调制传递函数 MTF) 的值达到最大时, 可认为 PEV 靶面准确位于被测透镜焦平面上^[7].

实验中将 PEV 置于精密导轨上, 首先用清晰度法将 PEV 靶面大致调整在被测透镜的焦平面上. 此时, PEV 接收到的单缝衍射光强分布即可看作线扩散函数. 沿着光轴方向逐步驱动导轨, 使单缝衍射图像呈模糊-清晰-模糊. 与此同时, 图像经 PEV 由图像采集卡转化成数字图像, 再通过计算机对线扩散函数进行快速傅氏变换 (FFT), 即可得到 MTF 与靶面位置的关系曲线. 由该曲线, 最终确定 PEV 靶面的位置.

当 PEV 靶面准确位于焦平面时, 改变单缝到透镜的距离将不会改变焦平面的光强分布^[6]. 另外, 通过计算狭缝像中央条纹的宽度可得到透镜焦距, 因此使用这种方法测量焦距与被测透镜的厚度无关.

2.2 图像接收系统的长度量标定

根据式(3), 焦距 f' 的测定是由中央条纹宽度 Δl 的测试所确定的. Δl 是具有长度量纲的物理量. 而实验中, 计算机处理的图像是没有量纲的数字图像. 实验所采用的图像接收系统由 PEV、图像采集卡、计算机组成. PEV 所接收的图像由图像采集卡经 AD 转换, 成为一幅 $N \times N$ (N 为整数) 点阵的离散数字图像. 数字图像由若干像素组成, 像素间的距离为不含量纲的纯数学量. 故此, 只有建立数字图像中各像素的空间距离与实际物理空间长度量的对应关系, 才能保证图像接收系统能够测量实际的长度量. 这一对应关系的确立过程就称为长度量的标定. 只有经过标定, 才能准确测定 Δl .

实验中标定为: 将 PEV 置于精密导轨之上, 沿垂直于光轴的方向移动导轨. 首先将单缝衍射像置于 PEV 靶面的左端, 记下导轨的起始位置 P_1 , 并拍摄第一幅单缝衍射图像. 然后移动 PEV 使单缝衍射像位于 PEV 靶面的右端, 记下导轨的终点位置 P_2 , 并拍摄第二幅单缝衍射图像. 根据图像采集卡采集的单缝衍射光强分布曲线, 从第一幅图像中确定中央亮纹紧邻的一条暗纹的中心位置 G_1 , 再从第二幅图像中确定同一暗纹的中心位置 G_2 . 由此可确定数字图像中, 相邻两像素所代表的物理长度量为 $(P_2 - P_1) / (G_2 - G_1)$.

需要说明的是, G_1 、 G_2 的位置可能由于图像噪声的影响而产生偏差, 因此必须对光强衍射图像中的噪声进行处理. 处理方法既可以采用空间域的平滑处理, 也可以采用频率域的滤波处理^[8]. 本文采用傅氏变换方法, 在频率域作低通滤波, 改善了图像的质量. 图 2 表示了滤波的结果. 图 2(a) 为原图像, 图 2(b) 为处理后的图像. 可以看出, 经过处理,

噪声得到有效抑制, 从而提高了 G_1 、 G_2 的定位精度.

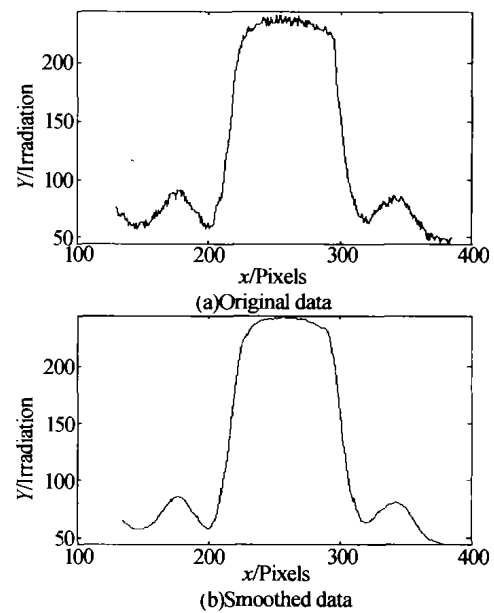


图 2 锗透镜衍射图光强分布曲线
Fig. 2 Irradiation profile of diffraction image of Germanium lenses

2.3 测试实例

根据前述理论, 测试了 3 个锗透镜的焦距, 测试结果如表 1 所示.

表 1 锗透镜焦距的测量结果

| 透镜 | 名义值 f_0 | 实测值 f' | 相对误差 $\Delta f/f'$ |
|----|-----------|----------|--------------------|
| 1* | 227.8 | 226.43 | -0.6% |
| 2* | 347.4 | 350.18 | 0.8% |
| 3* | 189.5 | 188.55 | -0.5% |

从表 1 可知红外单缝衍射图像测量焦距精度在 0.5% 到 1% 之间.

3 结论

本文根据单缝衍射原理, 采用 CO_2 激光器作为光源, 热释电摄像机作为探测器, 测试了红外光学锗透镜的焦距, 给出了实测结果. 对衍射图像精确对焦、图像采集系统长度尺寸标定等问题进行了讨论. 实验结果表明该方法是可行的.

参考文献

- 1 苏大图, 沈海龙, 陈进榜, 等. 光学测量与像质鉴定. 北京: 北京工业学院出版社, 1988. 45 ~ 50
Su D T, Shen H L, Chen J B, et al. Optical test and image quality evaluation. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. 45 ~ 50
- 2 杨远洪. 新型实用高精度 Talbot-Moire 测焦法研究. 北京航空航天大学学报, 1994, (4): 207 ~ 211
Yang Y H. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1994, (4): 207 ~ 211
- 3 郑克哲, 华珂. 红外光学系统焦距的测量. 应用光学, 1985, 6(5): 27 ~ 29

- Zheng K Z, Hua K. *Applied Optics*, 1985, **6**(5):27~29
- 4 郁道银, 谈恒英. 工程光学. 北京: 机械工业出版社, 1999. 255~256
- Yu D Y, Tan H Y. *Optical Engineering*. Beijing: China Mechanics Press, 1999. 255~256
- 5 陈进榜, 陈磊, 王青, 等. 大孔径移相式 CO₂ 激光干涉仪. 中国激光, 1998, **A25**(1):31~36
- Chen J B, Chen L, Wang Q, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 1998, **A25**(1):31~36
- 6 苏大图, 赵立平, 沙定国, 等. 光学测试技术. 北京: 理工大学出版社, 1996. 22~23
- Su D T, Zhao L P, Sha D G, *et al.* *Optical Measurement Technology*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 22~23
- 7 胡炳梁, 曹剑中, 熊仁生, 等. 变焦镜头组的自适应调焦的实现. 光子学报, 2003, **32**(8):1004~1006
- Hu B L, Cao J Z, Xiong R S, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):1004~1006
- 8 刘卫光, 周利华. 基于图像灰度分布的边缘中心定位算法. 光子学报, 2003, **32**(9):1122~1125
- Liu W G, Zhou L H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1122~1125

Focal Length Measurement of Infrared Lenses

Chen Lei, Gao Zhishan, He Yong

School of Electronic Engineering and Optic-electronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094

Received date: 2002-07-16

Abstract The image of a single slot diffraction is obtained using the pyroelectric vidicon (PEV) with the CO₂ laser as light source. According to the theory of single slot diffraction, the focal lengths of a set of the infrared Germanium lenses are measured. The result is presented. Some questions are discussed. The focal plane of the infrared lens is accurately decided by calculating the modulation transfer function (MTF). The method to validate the size of image capture system is discussed.

Keywords Infrared; Germanium lenses; Focal length



Chen Lei received his BSc degree, MSc degree and Ph. D. degrees in optical engineering from Nanjing University of Science & Technology, P. R. China, in 1987, 1990 and 1997 respectively. He is now a professor in the department of optical engineering in the above university. He is currently working on optical metrology and measurement. Other interests include digital image processing.