

透镜中心厚度测量系统出射光光谱的研究

周 勇^{1,2} 郭帮辉¹ 李 灿¹ 孙 强¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 透镜中心厚度测量设备是基于色差共焦原理,能快速自动测量透镜的中心厚度,且不接触透镜表面的一种新型设备。通过对该测量系统出射光光谱的研究,得到影响光谱带宽及系统测量精度的因素。研究结果表明,对于峰值波长 λ_0 的光,其在系统中的像方数值孔径 NA ,以及小孔半径 r 均会对出射光的光谱有影响。 NA 越大,出射光带宽越小,系统测量精度越高; r 越小,出射光带宽越小,系统测量精度越高。根据这一研究结果进行测量系统的设计与仿真,确定了能满足系统测量精度要求的 NA 和小孔半径 r 。

关键词 测量; 色差共焦; 透镜中心厚度测量系统; 出射光光谱; 测量精度; 系统设计

中图分类号 TH741; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.081202

Research on Spectrum Bandwidth of Emergent Light in Lens Center Thickness Measurement System

Zhou Yong^{1,2} Guo Banghui¹ Li Can¹ Sun Qiang¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The equipment based on confocal principle is a kind of new setup, which can fast and automatically measure center thickness of lens without contact of lens surfaces. We investigate the spectral bandwidth of emergent light in order to obtain the factors influencing the spectrum bandwidth and the measurement precision. The result shows that the numerical aperture on image side and the confocal hole radius are the main factors. When the numerical aperture is larger, the spectral bandwidth is smaller and the measurement precision is higher. What is more, when the hole radius is smaller, the spectral bandwidth is smaller and the measurement precision is higher, too. Then, we adopt the result to guide the design and simulation, and we get a better numerical aperture and confocal hole radius, which can realize the precision of the measurement system.

Key words measurement; chromatic confocal; lens center thickness measuring system; emergent light spectrum; measurement accuracy; system design

OCIS codes 300.3700; 120.4820; 120.4570

1 引言

色差共焦系统在测量领域有着广泛的应用,如面轮廓及形貌的测量,微纳米量级精细结构的测量,半导体工业和汽车制造业中的位移测量,光学玻璃及生物薄膜的厚度测量等^[1-7]。透镜中心厚度是光学系统的一个重要参数,其加工质量的好坏将影响到系统的焦距以及其成像质量。本文所介绍的正是在色差共焦系统的基础上构建的透镜中心厚度测量系统。

本文分别采用几何光学和物理光学的方法,对该系统出射光光谱进行分析,得到影响该系统出射光光谱带宽的因素。最终根据研究结果,对该系统的设计进行指导。

收稿日期: 2015-03-18; 收到修改稿日期: 2015-04-13; 网络出版日期: 2015-07-11

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ14051702)

作者简介: 周 勇(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 347773617@qq.com

导师简介: 孙 强(1971—),男,博士,研究员,主要从事光学系统设计等方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.ac.cn

2 测量原理

透镜中心厚度测量原理图如图 1 所示,白光源经光学系统成像于像空间,与光源对称位置处设立共焦小孔用于接收由被测透镜前后两表面反射回的光,并在共焦小孔处接入光谱仪对出射光的光谱进行分析。由于光学系统存在轴向色差,致使不同波长的光在光轴上的会聚点不同。只有会聚在被测透镜前后两表面的顶点以及前后两表面的球心位置处的光才能经被测透镜表面反射,良好返回至光学系统,最后在共焦小孔处会聚。此时可将该系统看成一滤光系统,最后通过该系统的光主要为聚焦在透镜前后两表面顶点及前后两表面球心处的光。这样便将透镜的位置与共焦小孔处出射光的光谱相关联。

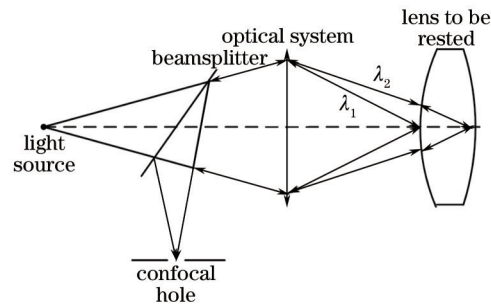


图 1 透镜中心厚度测量原理图

Fig.1 Thickness of lens measuring principle diagram

在共焦小孔处接入光谱仪,对该位置处出射光的光谱进行测量,由于该光学系统产生正的轴向色差,即波长越大,其在光轴上的理想会聚点越远,因此可以清楚地辨别出会聚在被测透镜前后两表面顶点处的波长,并对该波长进行测量。在已知光学系统各个参数以及被测透镜的两表面的曲率半径及其材料的情况下,利用光线追迹,得到透镜两顶点的位置坐标,由此即可得到透镜的中心厚度。

3 出射光光谱研究

该系统将透镜前后两表面的顶点位置与出射光峰值波长进行联系,通过测量峰值波长,间接测得透镜两顶点位置坐标,从而得到透镜中心厚度。故此该测量系统的测量精度与出射光的峰值波长的测量精度有关。而对共焦小孔处出射光的峰值波长的测量精度又与出射光的光谱带宽有关。显然,出射光的光谱带宽越小,对其峰值波长的测量精度越高,则该系统的测量精度越高。因此下面对共焦小孔处出射光的光谱分布进行研究,即对不同波长在共焦小孔处的光强进行分析。

3.1 几何光学分析

为分析方便,仅对一个反射面进行分析,如图 2 所示。

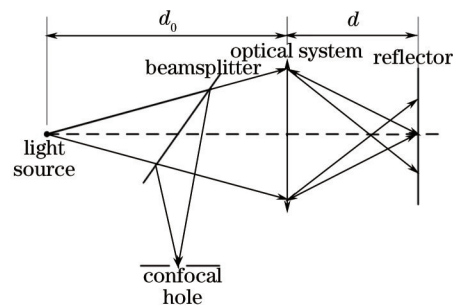


图 2 色差共焦系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of chromatic confocal image system

将图 2 的光路图展开得到图 3 所示的色差共焦系统的光路等效图。光源出射的光经距离 d_0 进入焦距为 f' 、半径为 a 的光学系统 1 后;再传播 $2d$ 的距离进入相同的光学系统 2,在距光学系统 2 为 d_0 位置处设立共焦小孔,接收出射光。

如图 3 所示,光源 S 发出波长为 λ 的光经展开后的光学系统,聚焦在 S' 位置处。其中 d' 表示该波长的光经光学系统 1 的理想像距, u 表示系统的物方孔径角, u' 表示系统的像方孔径角, b 表示该波长的光在光学系统 2 上的有效通光孔径, r 表示共焦小孔的半径, L 表示像点 S' 与共焦小孔的距离。

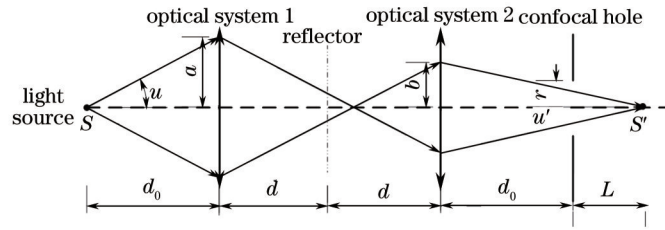


图3 色差共焦系统光路等效图

Fig.3 Beam path diagram chromatic confocal image system

假设光源为发光强度为 I_0 的点光源,则光源发出能够进入光学系统 1 的光通量为^[8]

$$\Phi = 4\pi I_0 \sin^2 \frac{u}{2}. \quad (1)$$

则自光学系统 2 射向 S' 的光通量可表达为

$$\Phi' = 4\pi I' \sin^2 \frac{u'}{2}. \quad (2)$$

假设光学系统的各个表面的透射率为 1,则有

$$\Phi = \Phi'. \quad (3)$$

进而

$$I' = I_0 \frac{\sin^2 \frac{u}{2}}{\sin^2 \frac{u'}{2}}. \quad (4)$$

由于共焦小孔对出射光的限制,共焦小孔位置处平面上的平均光照度 E 为

$$E = \begin{cases} I'/L^2, & r \leq b \frac{L}{L+d_0} \\ 0, & r > b \frac{L}{L+d_0} \end{cases}. \quad (5)$$

则共焦小孔处接收的光通量 Ψ 为

$$\Psi = \begin{cases} \frac{I'}{L^2} \pi r^2, & r \leq b \frac{L}{L+d_0} \\ \frac{I'}{L^2} \pi \left(b \frac{L}{L+d_0} \right)^2, & r > b \frac{L}{L+d_0} \end{cases}. \quad (6)$$

根据成像理论可知

$$L = \frac{2(d_0 f' - d d_0 + d f')(d_0 - f')}{f'^2 - 2(d_0 f' - d d_0 + d f')}. \quad (7)$$

假设光源的光谱在 λ_0 附近,其中波长为 λ_0 的光最终聚集在共焦小孔与光轴的交点处。则可认为光学系统产生的轴向色差与波长成线性关系,即有

$$d' = d + k(\lambda - \lambda_0) = d + k\Delta\lambda, \quad (8)$$

式中 k 表示轴向色差与波长的线性系数,且 $\Delta\lambda \ll \lambda_0$ 。

且有 $b \approx a$, $d' \approx d$, $u \approx u'$,则(8)式可简化为

$$L \approx \frac{2k\Delta\lambda(d_0 - f')^2}{f'^2} \approx 2k\Delta\lambda \left(\frac{d_0}{d} \right)^2. \quad (9)$$

(6)式可简化为

$$\Psi = \begin{cases} \frac{I_0}{(2k\Delta\lambda)^2} \left(\frac{d}{d_0} \right)^4 \pi r^2, & r \leq 2ak\Delta\lambda \frac{d_0}{d^2} \\ \pi I_0 \frac{a^2}{d_0^2}, & r > 2ak\Delta\lambda \frac{d_0}{d^2} \end{cases}. \quad (10)$$

(10)式表示当共焦小孔半径为 r 时,共焦小孔处接收的光谱分布,如图 4 所示。由(10)式可知,其出射光光谱

半峰全宽(FWHM)为

$$\tau_1 = \sqrt{2} \frac{rd^2}{akd_0} \approx \sqrt{2} \frac{rm}{kNA}, \quad (11)$$

式中 NA 表示 λ_0 波长的光经光学系统 1 之后的像方数值孔径, m 表示该波长经光学系统 1 之后的横向放大倍率。

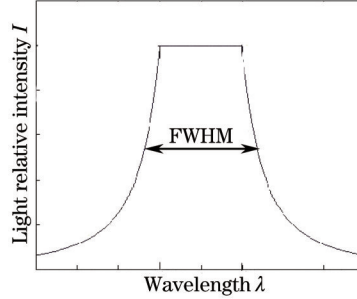


图4 共焦小孔处光谱分布示意图

Fig.4 Spectral distribution of confocal hole

3.2 波动光学分析

以上几何光学的分析并未考虑光在系统中传播时发生的衍射效应,将光经光学系统后在共焦小孔处的光强分布视为均匀分布。

下面利用波动光学对出射光谱进行分析。如图 3 所示,点光源所发出的光经光学系统后在反射镜位置处的复振幅分布可以表达为^[9-11]

$$h_2(\rho, \lambda) = \frac{2\pi a^2}{j\lambda d d_0} \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}(d+d_0)\right] \exp\left(j\frac{\pi\rho^2}{\lambda d}\right) \int_0^1 \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}a^2 r^2 u\right) J_0\left(\frac{2\pi a r \rho}{d\lambda}\right) r dr, \quad (12)$$

式中 $u = \frac{1}{2d_0} + \frac{1}{2d} - \frac{1}{2f}$, $\rho^2 = x_2^2 + y_2^2$, f 为该光学系统的焦距, a 表示光学系统出瞳半径, (x_2, y_2) 表示反射镜平面上点的坐标。为简单起见,令 $v = \frac{2\pi a \rho}{\lambda d}$, 将(12)式简化为

$$h_2(v, \lambda) = \int_0^1 \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}a^2 r^2 u\right) J_0(vr) r dr. \quad (13)$$

则共焦小孔处的光强分布可表达为^[12-14]

$$I(v, \lambda) = |S(v, \lambda) * h_2(v, \lambda)|^2 \times |h_2(v, \lambda)|^2 * D(v, \lambda), \quad (14)$$

式中 $*$ 表示卷积运算, $S(v, \lambda)$ 表示光源函数, $D(v, \lambda)$ 表示探测器函数。 $S(v, \lambda) = \delta(v)$, 即表示光源为点光源,且发出的光强与波长无关。 $D(v, \lambda) = \delta(v)$, 即表示共焦小孔为点。则(14)式可写为

$$I(0, \lambda) = |h_2(0, \lambda)|^2 \times |h_2(0, \lambda)|^2. \quad (15)$$

假设光源的光谱在 λ_0 附近,其中波长为 λ_0 的光经光学系统后会聚在反射镜与光轴的交点上。则可认为光学系统产生的轴向色差与波长呈线性关系,且有

$$d = d_i + k(\lambda_0 - \lambda) = d_i + k\Delta\lambda, \quad (16)$$

式中 d_i 表示波长为 λ 的光的理想像距, k 表示轴向色差与波长的线性系数,且 $\Delta\lambda \ll \lambda_0$, 将(16)式代入(13)式及(15)式得

$$I(0, \Delta\lambda) = \left(\frac{\sin \theta}{\theta}\right)^4, \quad (17)$$

式中 $\theta \approx \frac{\pi k \Delta\lambda a^2}{2\lambda_0 d^2}$ 。此时 $I(0, \Delta\lambda)$ 即可表示共焦小孔半径为 0 时,出射光的光谱分布,显然当 $\Delta\lambda$ 为 0 时,光强最大,即出射光的峰值波长为聚焦在反射镜与光轴交点处光的波长 λ_0 。此时出射光光谱半峰全宽可以写为^[15]

$$\tau_2 \approx \frac{0.88\lambda_0}{k(1 - \sqrt{1 - NA^2})}. \quad (18)$$

图5所示为小孔大小为0时,出射光的光谱分布示意图。

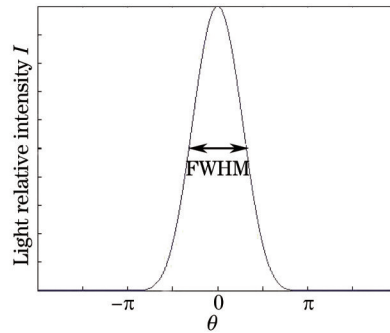


图5 小孔半径为0时出射光光谱分布示意图

Fig.5 Spectral distribution of emergent light when the size of hole is 0

综上, τ_1 、 τ_2 分别为不考虑衍射效应利用几何光学分析出的不同尺寸的共焦小孔处出射光光谱半峰全宽,以及考虑衍射利用波动光学分析出的极小尺寸的共焦小孔处出射光光谱半峰全宽。则该系统出射光的光谱半峰全宽可以表达为

$$\tau \approx \sqrt{a\tau_1^2 + b\tau_2^2} = \sqrt{a\left(\sqrt{2}\frac{rm}{kNA}\right)^2 + b\left[\frac{0.88\lambda_0}{k(1-\sqrt{1-NA^2})}\right]^2}, \quad (19)$$

式中 a 、 b 分别表示几何光学传播及衍射对出射光光谱的影响系数。

由此可以得出:光谱峰值波长 λ_0 、峰值波长的光在系统中的像方数值孔径 NA 、峰值波长的光在系统中的横向放大倍率 m 、小孔半径 r 均会对出射光的光谱带宽有影响,继而影响该系统的测量精度。并且 NA 越大,出射光光谱带宽越小,测量精度越高; r 越小,出射光光谱带宽越小,测量精度越高。

4 光学系统设计及模拟

根据以上分析结果,将像方数值孔径限定在0.2以上,设计出用于测量透镜中心厚度的光学系统如图6所示。光源光谱范围为400~1000 nm,其产生的轴向色差在30 mm左右。之后根据设计结果模拟出不同大小的共焦小孔处的出射光的光谱分布,进而确定合适的共焦小孔的大小。

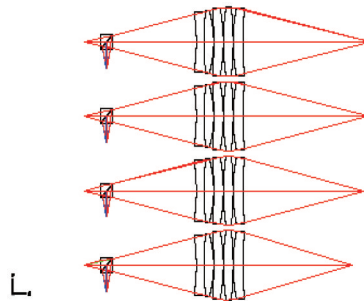


图6 光学系统结构图

Fig.6 Structure diagram of optical system

利用 Zemax,对不同波长的光在共焦小孔处的包围圈能量进行模拟,得到不同波长的光在共焦小孔处出射的能量,即得到出射光的光谱分布。图7为当反射面位于1000 nm波长光在光轴上的理想会聚点时,出射光的光谱与共焦小孔的大小关系图,由图可知,出射光的光谱带宽及出射光的能量随小孔半径的增大而增大。

图8为不同半径下小孔处出射光光谱的半峰全宽。由图可知,当共焦小孔半径小于2 μm 时,出射光光谱半峰全宽与小孔半径基本无关,当共焦小孔半径大于2 μm 时,出射光光谱半峰全宽基本与小孔半径呈线性关系。这说明当共焦小孔较小时,光在光学系统中传播时发生的衍射效应对出射光光谱的影响较大;当共焦小孔较大时,衍射效应对出射光光谱的影响较弱。

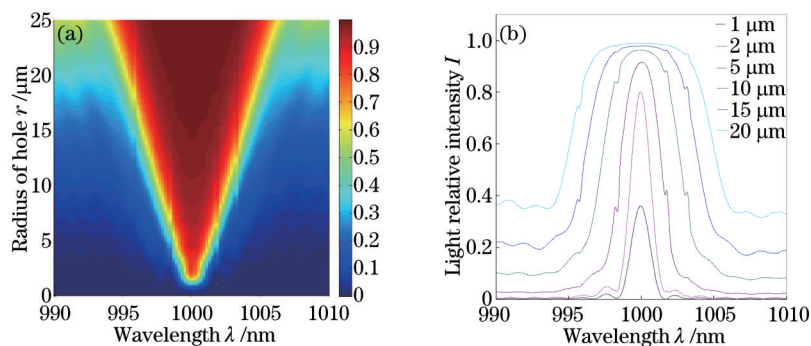


图7 出射光的光谱随共焦小孔的大小变化

Fig.7 Spectra of emergent light with confocal hole size variation

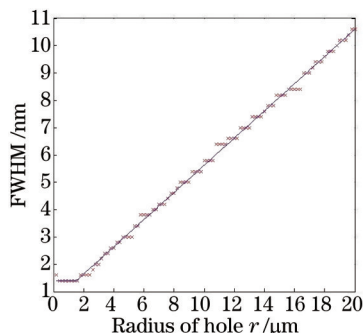


图8 不同小孔半径的出射光光谱半高宽

Fig.8 FWHM with confocal hole size variation

由图8及(12)式可知,共焦小孔的半径在2~5 μm 时,测量结果最佳。当小孔半径太小时,出射光总能量太低,使得信噪比过低,对峰值波长的测量不准确;当小孔半径太大时,出射光的光谱带宽太大,影响峰值波长的测量精度。

5 结 论

本文通过对共焦小孔出射光的光谱进行分析,得到影响出射光光谱带宽的因素,包括聚焦在反射镜处的光在光学系统中的像方数值孔径 NA ,该波长的光经光学系统之后的横向放大倍率 m ,以及共焦小孔的半径 r 。 NA 越大,出射光光谱带宽越小; r 越小,出射光光谱带宽越小。出射光光谱带宽影响出射光峰值波长的测量精度,进而影响到中心厚度测量的精度。聚焦在透镜前后两顶点处的光在光学系统中的像方数值孔径 NA 越大,测量精度越高;共焦小孔的半径 r 越小,测量精度越高。

参 考 文 献

- 1 Richard Leach. Optical Measurement of Surface Topography[M]. Berlin: Springer, 2011: 72-98.
- 2 Mark A Browne, Olusola Akinyemi Francis, Crossley, *et al.*. Stage-scanned chromatically aberrant confocal microscope for 3D surface imaging[C]. SPIE, 1992, 1660: 532-541.
- 3 Peter Lucke, Arndt Last, Jurgen Mohr, *et al.*. Confocal microoptical distance sensor: realization and results[C]. SPIE, 2005, 5856: 136-142.
- 4 S L Dobson, P Sun, Y Fainman. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging[J]. Appl Opt, 1997, 36(20): 4744-4748.
- 5 Niu C H, Deng W Y, Mao X H, *et al.*. Theoretical and experiential study on chromatic confocal position sensor[C]. SPIE 2010, 7853: 78531B.
- 6 Yang Yongfa, Li Qi, Hu Jiaqi. Character analysis on continuous-wave terahertz reflection-mode confocal scanning microscopic imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 081101.
杨永发, 李琦, 胡佳琦. 连续太赫兹反射式共焦扫描显微成像特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 081101.
- 7 Tu Long, Yu Jin, Fan Zhongwei, *et al.*. Research on the technology of parallel laser confocal microscopy detection based on digital micromirror device[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 101702.
涂龙, 余锦, 樊仲维, 等. 基于数字微镜的并行激光共焦显微检测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10):

101702.

- 8 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical Optics · Aberrations and Optical Design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007: 89-90.
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 89-90.
- 9 Su Xianyu. Information Optics (the Second Edition)[M]. Beijing: Science Press, 2011: 46-53.
苏显渝. 信息光学(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 46-53.
- 10 Lü Naiguang. Fourier Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 137-177.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 137-177.
- 11 Joseph W Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. New York: Mc Graw-hill, 1968: 91-118.
- 12 T Wilson, A R Carlini. Size of the detector in confocal imaging systems[J]. Opt Lett, 1987, 12(4): 227-229.
- 13 Dainty J C. Theory and practice of scanning optical microscopy[J]. J Modern Optics, 1985, 32(12): 1451-1452.
- 14 Corle T R, Chou C H, Kino G S. Depth response of confocal optical microscopes[J]. Opt Lett, 1986, 11(12): 770-772.
- 15 G Molesini, G Pedrini, P Poggi, *et al.*. Focus-wavelength encoded optical profilometer[J]. Opt Commun, 1984, 49(4): 229-233.

栏目编辑: 何卓铭