

基于二元光学透镜光谱聚焦特性的微间距测量

王思沫^{1,2}, 李凡星^{1,2}, 彭伏平^{1,2}, 杜佳林^{1,2}, 严伟^{1,2*}

¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对传统色散透镜的色散线性度很难保证为绝对线性, 测量范围很窄的问题, 且为了尽量减小球差尤其是对测量影响最大的轴向球差, 提出一种将二元光学透镜引入到光谱共聚焦微小间距测量的方法。该方法中二元光学透镜的色散只与入射光的波长有关, 且严格与入射光的波长成反比。二元光学透镜不存在球差问题且可以补偿校正测量系统中其他光学组件的未知色差。实验中选择 510~690 nm 范围内的光谱, 利用分辨率为 0.5 nm 的光谱仪接收光谱信息, 测得该方法的测量量程为 13.95 mm, 测量误差为 0.6 μm , 并通过对光盘上的刻录间距进行测量, 验证了该方法的有效性。

关键词 测量; 光谱; 共聚焦; 二元光学透镜; 轴向色散; 测距

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0212003

Microspacing Measurement Based on Spectral Focusing Characteristics of Binary Optical Lens

Wang Simo^{1,2}, Li Fanxing^{1,2}, Peng Fuping^{1,2}, Du Jialin^{1,2}, Yan Wei^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Optical Technologies for Micro-fabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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

Abstract A method of introducing a binary optical lens into spectral confocal micro-spacing measurement is proposed to address the problems that the dispersion linearity of a conventional dispersion lens is difficult to ensure absolute linearity and that the measurement range is narrow, meanwhile minimizing spherical aberration, particularly the axial spherical aberration which has the greatest influence on measurement. In the proposed method, the dispersion of the binary optical lens is only related to the wavelength of the incident light and it is strictly inversely proportional to the wavelength of the incident light. Binary optical lenses do not exhibit spherical aberration problems and can also compensate for the unknown chromatic aberrations of other optical components in the calibration measurement system. In the experiment, a spectrum in the range of 510–690 nm is selected, and the spectral information is received by a spectrometer with a 0.5-nm resolution. Furthermore, the measurement range of this method is 13.95 mm, the measurement error is 0.6 μm , and the recording spacing with respect to the optical disc is measured to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words measurement; spectra; confocusing; binary optical lens; axis dispersion; ranging

OCIS codes 120.5700; 120.4820; 300.6170

1 引 言

微小间距测量有着极其广泛的应用领域^[1-3], 目前微小间距测量向着高精度、非接触、适应不同环境和材料的方向发展, 并且逐渐趋向于实时、无损检测。二元光学透镜光谱聚焦特性微小间距测量适用

于高精密光学测量领域, 可以满足非接触式、快速位移测量要求^[4]。

目前, 激光三角反射式^[5-6]、电感式^[7]、电磁式^[8]等传统非接触式测量技术的测量精度可以达到微米量级, 但是激光三角式测量系统的测量精度会受光点自身因素及被测物体等外界因素的影响, 误差较

收稿日期: 2019-07-24; 修回日期: 2019-09-06; 录用日期: 2019-09-19

基金项目: 微电子装备四川青年科技创新团队(J17S006)、中科院装备项目(YA18K010)

* E-mail: yanwei@ioe.ac.cn

大,而电感式和电磁式传感器对不同材料的被测物体不具有广泛的适用性。为了适应薄膜等透明材料或者小工件内壁沟槽等特殊工作场合的测量,朱万彬等^[9-14]分别设计了不同的色散透镜组,实现了不同精度的微小间距测量。他们采用复色光作为光源,光源经过半透半反镜和色散透镜组后在其像面上聚焦成像,像平面放置的物体将入射光反射,反射光再次经过色散透镜组、半透半反镜和小孔后,被光谱仪吸收。光谱仪对反射光进行光谱分析,确定光强最强成分波长,通过两次测量波长之差来推算微小间距值。该方案与传统非接触式测量方法相比,精度高、灵敏度高^[15],能够满足特殊工作场合的测量,但是在设计色散透镜组时,很难保证绝对的色散线性度,这将严重影响测量的精度。此外,优化过程中要尽量减小球差,尤其是对测量影响最大的轴向球差;还要减小单色像差和点扩展函数的半峰全宽(FWHM)等。优化过程中,球差、弥散斑、像方孔径角、物方孔径角和透镜口径这些因素的调整控制并不是独立的^[13],需要综合考虑才能得到色散透镜结构的最优解,这大大增加了设计的难度。

为此提出一种基于二元光学透镜光谱共聚焦特性的微小间距测量方法,这里的共聚焦指共光轴聚焦。该方法引入二元光学透镜,通过理论分析建立数学模型,仿真和实验结果均表明,二元光学透镜将入射光线沿光轴方向进行色散,不同波长的光会聚于光轴上的不同位置^[16]。与色散透镜组相比,二元光学透镜的焦距与波长呈严格的线性比例,色散效果明显,有利于提高测量系统的灵敏度及精度,且其与制作材料无关,设计简单、易于实现。

2 基本原理与测量装置

2.1 二元光学透镜光谱聚焦微小间距测量理论分析

二元光学透镜光谱聚焦微小间距测量理论分析二元光学透镜的波带位置,可以由典型的菲涅耳波带片的方程确定,相邻波带的光程差为 $\lambda/2$ 。如图1所示,由勾股定理可知,第 m 波带的半径 r_m 为

$$r_m^2 = f_0 m \lambda_0 + m^2 \left(\frac{\lambda_0}{2} \right)^2, \quad (1)$$

式中: λ_0 为设计波长; f_0 为对应于第一级衍射级次的主焦距。

由于 $m\lambda_0 \ll f_0$,第 m 波带半径可近似为

$$r_m^2 = f_0 m \lambda_0. \quad (2)$$

故设计焦距 f_0 为

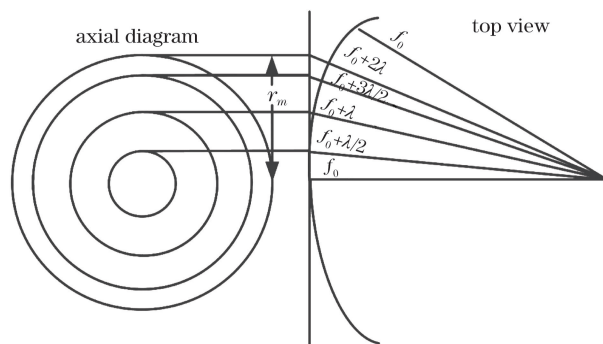


图1 二元光学透镜轴向图和侧视图

Fig. 1 Axial and side views of binary optical lens

$$f_0 = \frac{r_m^2}{2m\lambda_0}. \quad (3)$$

将 f_0 推广到宽光谱波段,焦距 $f(\lambda)$ 为

$$f(\lambda) = \frac{r_m^2}{2m\lambda} = \frac{\lambda_0 f_0}{\lambda}. \quad (4)$$

由(4)式可知,二元光学透镜产生色差的有效焦距同波长成反比^[17]。轴向色散简易示意图如图2所示,将这种波长依赖关系代入衍射一级透镜公式可得到像距的表达式,即

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}, \quad (5)$$

$$s_i(\lambda) = \frac{f s_o}{s_o - f} = \frac{\lambda_0 f_0 s_o}{\lambda s_o - \lambda_0 f_0}, \quad (6)$$

式中: s_i 、 s_o 分别为像距和物距。衍射一级透镜公式用于衍射透镜时,沿光轴方向的像距依赖于波长 λ ,根据这一原理即可实现微小间距测量。由(6)式可以导出微小间距的表达式为

$$\Delta l = s_i(\lambda_1) - s_i(\lambda_2) = \frac{\lambda_0 f_0 s_o^2 (\lambda_2 - \lambda_1)}{(\lambda_1 s_o - \lambda_0 f_0)(\lambda_2 s_o - \lambda_0 f_0)}, \quad (7)$$

式中: λ_1 、 λ_2 为测量微小间距时光谱仪接收到的波长。当入射光为平行光时,像距即聚焦焦点处, λ_1 、 λ_2 对应的焦距分别用 $f_1(\lambda_1)$ 、 $f_2(\lambda_2)$ 表示,故微小间距

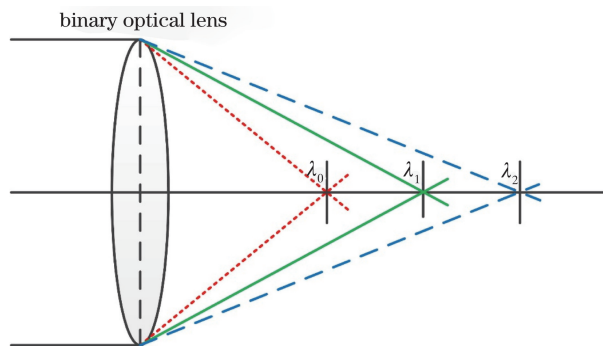


图2 二元光学透镜轴向色散示意图

Fig. 2 Schematic of axial dispersion of binary optical lens

表达式可以简化为

$$\Delta l = f_1(\lambda_1) - f_2(\lambda_2) = f_0 \lambda_0 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (8)$$

光谱仪通过分析反射光的波长,再通过(8)式计算就

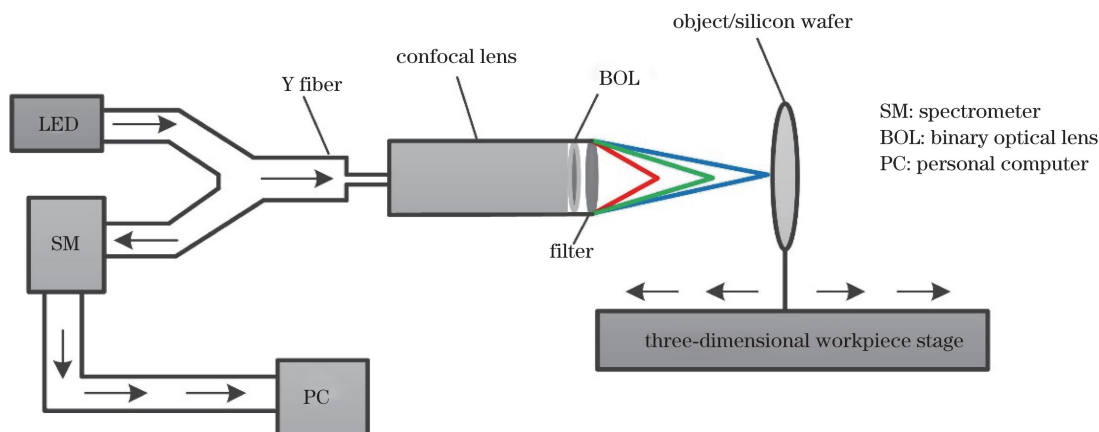


图3 二元光学透镜光谱共聚焦测距原理图

Fig. 3 Schematic of spectral confocal micro-spacing measurement of binary optical lens

二元光学透镜可以同时完成成像和色散功能,入射光线经过二元光学透镜后沿光轴方向进行色散,不同波长的光会聚于光轴的不同位置,同一目标的不同波段图像沿光轴方向分层排列^[18]。二元光学透镜的色散只与入射光的波长有关,且与入射光的波长成严格的反比,色散能力也比一般折射透镜组灵敏得多,且线性度极佳。LED光源发出的复色光经过共焦镜头和二元光学透镜后在其像面上聚焦成像。将被测物体置于像空间轴向位置,光束在物体被测表面发生反射后经过二元光学透镜和共焦镜头,光谱仪分析Y型光纤接收的反射光,确定其波长。根据接收的反射光的波长即可推算得到物体实际间距。

下面通过与传统薄透镜的色散对比,从理论上依次分析影响微小间距测量量程及分辨率的因素。传统薄透镜在波长 λ 对应的折射率为 $n(\lambda)$ 的情况下

光焦度为 $\varphi = \frac{1}{f(\lambda)} = [n(\lambda) - 1]c_0$,其中 c_0 为近轴曲率,折射率随着波长增大而减小,焦距随着波长增大而增大;其部分色散为 $p = \frac{n_1 - n_3}{n_2 - n_3}$,符号为正,

其中 n_1, n_2, n_3 分别为夫琅禾费谱线中F线、d线、c线的折射率,故传统薄透镜与材料的折射率有关。

而对于二元光学透镜,其部分色散为 $p = \frac{\lambda'_1 - \lambda'_3}{\lambda'_2 - \lambda'_3}$,其中 $\lambda'_1, \lambda'_2, \lambda'_3$ 为二元光学透镜的工作波长, $\lambda'_1 < \lambda'_2 <$

可以测得微小间距。

2.2 微小间距测量原理与实验装置

二元光学透镜光谱聚焦测距原理如图3所示,它由白光LED光源、光谱仪、Y型光纤、共焦镜头、二元光学透镜等组成。

λ'_3, p 符号为负,且其色散值一般大于传统透镜,可以看出二元光学透镜的部分色散与材料无关,只与波长有关,其焦距随着波长增大而显著减小,因此微小间距测量的量程取决于光谱仪接收到的最大波长值与最小波长值。

由(7)式可知,基于二元光学透镜的微小间距测量系统能够测得的最小间距,即其分辨率,取决于光谱仪的分辨率,光谱仪的分辨率越高,系统的分辨率就越高^[19]。

实验中使用的波长范围为510~690 nm,入射光纤采用 $4 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 的多芯光纤。二元光学透镜设计波长 λ_0 为550 nm,设计焦距 f_0 为50 mm。通过理论计算可得量程达到了14.0665 mm,量程起点为距离二元光学透镜39.8551 mm处。

3 仿真分析

入射光场为单色平面波,以入射波长为550 nm为例,当光屏沿着光轴移动时,仿真结果如图4、5所示。

由上述结果可以看出,当入射光为550 nm的单色平面波时,在距离二元光学透镜50 mm处成像最清晰,即入射的单色平面波聚焦在50 mm处,这与理论计算的焦距完全一致。此外,该位置处的光强度像“针”一样集中在中心位置,光强达到最大。而在其他未在焦距处的光屏位置上成模糊的像。

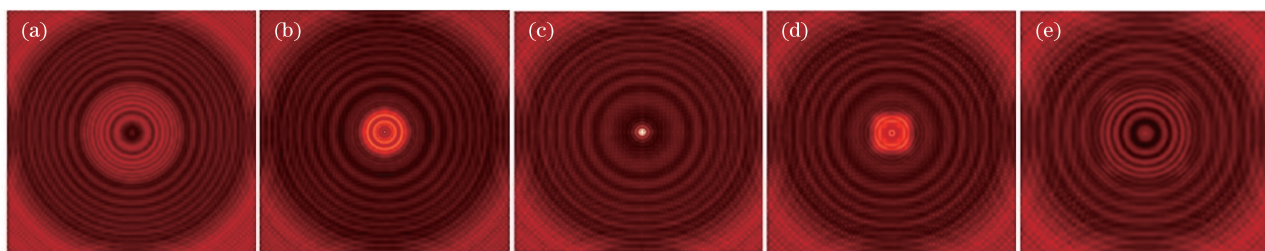


图 4 像屏放置在距离二元光学透镜不同位置处时得到的衍射图样。(a) 20 mm; (b) 40 mm; (c) 50 mm; (d) 60 mm; (e) 80 mm

Fig. 4 Diffraction images when image screen is at different locations from binary optical lens.

(a) 20 mm; (b) 40 mm; (c) 50 mm; (d) 60 mm; (e) 80 mm

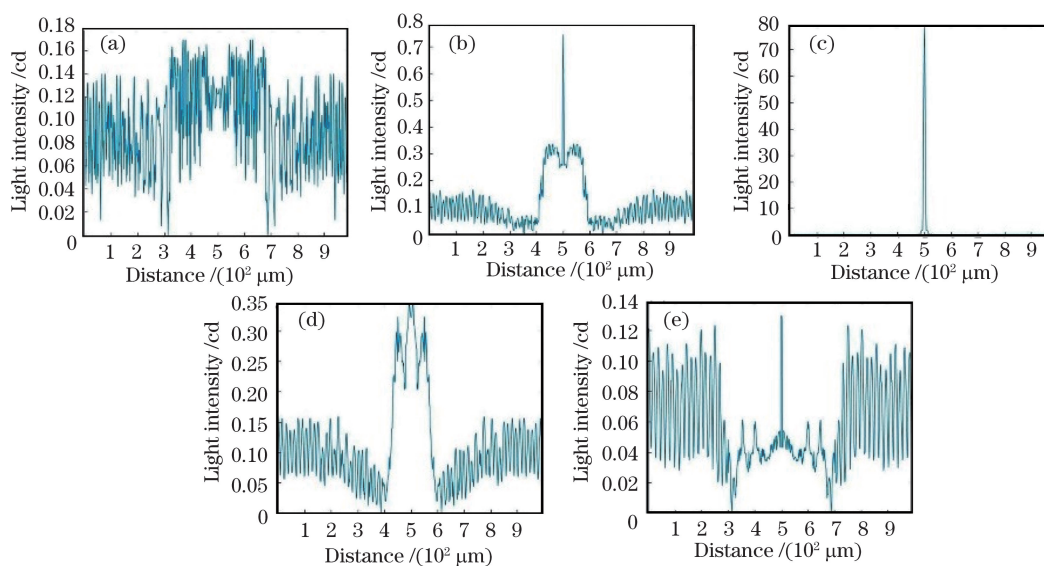


图 5 像屏放置在距离二元光学透镜不同位置处时的强度分布。(a) 20 mm; (b) 40 mm;

(c) 50 mm; (d) 60 mm; (e) 80 mm

Fig. 5 Intensity distributions when image screen is at different locations from binary optical lens.

(a) 20 mm; (b) 40 mm; (c) 50 mm; (d) 60 mm; (e) 80 mm

当像屏位置分别固定在距离二元光学透镜 55.000, 50.000, 46.610, 42.969 mm 时, 改变入射单色光的波长, 仿真结果如图 6 所示。

通过仿真结果可以看出, 当光屏位于距离二元光学透镜 42.969 mm 时, 640 nm 的入射单色平面波在该位置成像最清晰, 这与 640 nm 单色平面波的理想焦距完全一致, 其他波长的光在该位置的光屏上成模糊的像。同样对比其他三组可以发现, 当光屏与二元光学透镜之间的距离为 46.610 mm 时, 590 nm 的单色平面波成像最清晰; 当光屏与二元光学透镜之间的距离为 50 mm 时, 550 nm 的单色平面波成像最清晰; 当光屏与二元光学透镜之间的距离为 55 mm 时, 500 nm 的单色平面波成像最清晰, 且它们成像清晰的位置刚好位于各入射的单色平面波的焦距处。故当入射光为白光时, 同一位置处光屏上所成的像为各个波

长的单色平面波在该位置处成像的叠加, 但是只有其中一个波长的单色平面波可以在该位置处聚焦成清晰的像, 该单色平面波会沿光轴方向反射, 光谱仪通过分析可以得到反射光束的波长, 再通过(8)式波长与微小间距之间的关系即可间接测得微小间距。

4 实验分析

当光谱没有反射回任何波长的光时, 光谱仪显示原始光谱图, 原始光谱图如图 7 所示。

将光屏固定在一个三维工件台上, 使其沿光轴移动。入射光为 LED 光, 在光轴的不同位置会反射回不同波长的单色光给光谱仪。当 450~690 nm 波长返回到光谱仪时, 记录光谱仪接收到的减暗光谱图, 如图 8 所示。同时记录 450~690 nm 波长对应的光屏实际位置, 如图 9 所示。

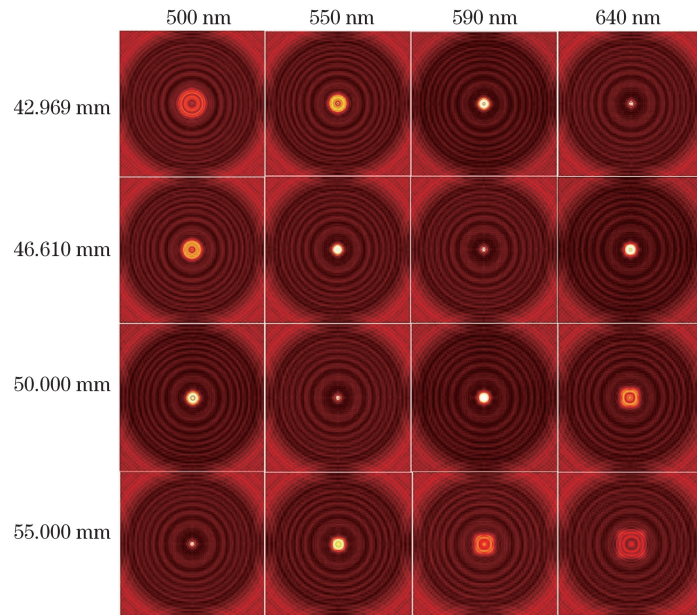


图 6 不同光屏与二元光学透镜的距离及入射光波长下的衍射图样。光屏与二元光学透镜的距离从上到下依次为 42.969, 46.610, 50.000, 55.000 mm, 入射光波长从左到右依次为 500, 550, 590, 640 nm

Fig. 6 Diffraction patterns under different incident light wavelengths when distances between light screen and binary optical lens are different. From top to bottom, distances between light screen and binary optical lens are 42.969, 46.610, 50.000, and 55.000 mm, respectively. From left to right, incident light wavelengths are 500, 550, 590, and 640 nm, respectively

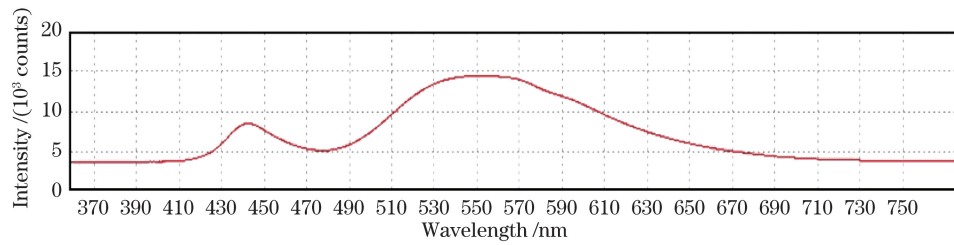


图 7 光谱仪的原始光谱图

Fig. 7 Original spectrum of spectrometer

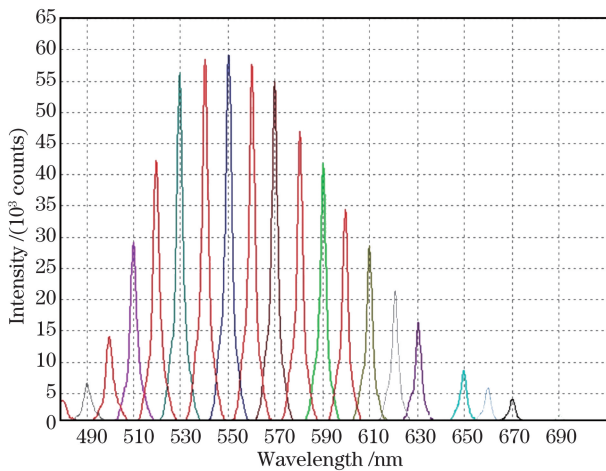


图 8 不同位置处光谱仪接收到的光谱图
Fig. 8 Spectra received by spectrometer at different locations

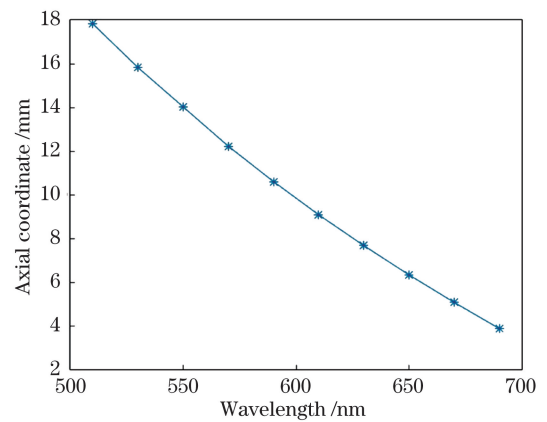


图 9 不同波长入射光聚焦位置对应三维平移台的轴向坐标
Fig. 9 Focal position of incident light with different wavelengths corresponds to axial coordinate of three-dimensional translation stage

由图 9 可知,二元光学透镜色散与入射光的波长成反比,测量量程可达 13.95 mm,测量误差为 $0.6 \mu\text{m}$ 。通过实验可以看出,对于整个共聚焦微小间距测量系统,轴向色散能力决定了色散范围和测量能力,制约着测量精度和灵敏度。

5 应用及前景分析

根据仿真及实验结果,基于二元光学透镜光谱聚焦的微小间距测量方法可以广泛应用在工程上。对于一些结构特殊的超薄膜,当无法用已有的测量工具测出膜厚度时,可以选择此方法来测量薄膜的厚度。

为了验证该应用的可行性,在实验室选择一个已经被刻录的光盘,如图 10 所示。以白光 LED 为入射光,对激光刻录的膜层厚度进行测量。LED 光源光谱为线状谱,是辐射强度较低连续光谱,光谱范围可达 $380 \sim 800 \text{ nm}$,实验中使用 $510 \sim 650 \text{ nm}$ 范围的光谱。二元光学透镜的设计波长选择 550 nm ,设计焦距选择 50 mm 。将光盘沿光轴移动,记录光谱仪接收到的信号,如图 11 所示,光谱仪检测到有两个波峰返回,在测量范围内沿光轴移动光盘位置发现两个波峰之间的距离未发生改变,通过计算两个波峰之间的波长差即可计算得到该光盘膜层的实际厚度。



图 10 被测光盘

Fig. 10 Measured optical disc

此外,该方法还可以用来测光谱,在镜头的中间填充某种元素的气体,该气体跟入射光的某一波长的单色光反应,使该波长的入射光出现异常(消失、增强或者减弱),移动光屏位置,沿光轴方向轴向扫描,记录光谱仪测得的总光谱。将该总光谱与原始未填充气体时光谱仪测得的总光谱对比,即可测得异常波长,进而可以测得镜头中填充的气体。

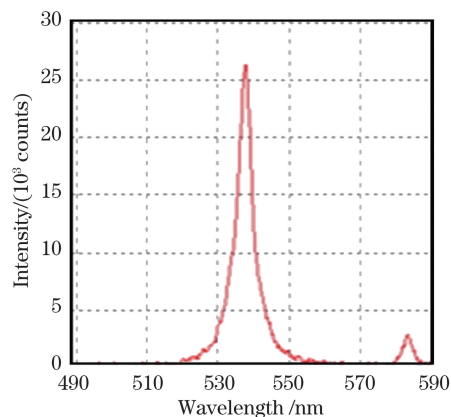


图 11 光盘两相邻薄膜的光谱图

Fig. 11 Spectra of two adjacent thin films of optical disc

6 结 论

基于二元光学透镜轴向色散特性,提出一种共聚焦微小间距测量的新方法。通过对微小间距测量的理论推导,建立数学模型,通过仿真较好地描述了利用二元光学透镜轴向色散特性测量微小间距的可行性。在此基础上搭建实验测量光路,光盘的刻录间距测量结果表明,二元光学透镜色散与入射光的波长成严格反比,验证了二元光学透镜光谱聚焦测量微小间距方法的可行性。该方法量程为 13.95 mm ,测量的误差为 $0.6 \mu\text{m}$,相比于传统方法的量程提高了 10 mm 。该方法可以广泛应用于薄膜厚度、三位轮廓、光谱成分等测量,在工程上具有实际的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Jordano G, Navarro C, Vázquez J, et al. Measuring wear in a fretting test with a confocal microscope[J]. Key Engineering Materials, 2018, 774: 461-466.
- [2] Maulucci G, di Giacinto F, de Angelis C, et al. Real time quantitative analysis of lipid storage and lipolysis pathways by confocal spectral imaging of intracellular micropolarity[J]. Biochimica Et Biophysica Acta (BBA)-Molecular and Cell Biology of Lipids, 2018, 1863(7): 783-793.
- [3] Dubreil L, Aviat F, Anthoine V, et al. Confocal spectral microscopy: an innovative tool for tracking of pathogen agents on contaminated wooden surfaces [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, 76(3): 1083-1085.
- [4] McBride J W, Boltryk P J, Zhao Z. The relationship between surface incline and con-focal chromatic aberration sensor response[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6618: 66181F.

- [5] Zhou K, Ji H J, Liu H B. Analysis for the effect of measured surface character to the measuring accuracy of laser triangulation method measurement[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2009, 7(2): 70-73.
周坤, 季海焦, 刘海滨. 激光三角法测量中被测物表面特性对测量精度影响的分析[J]. 光学与光电技术, 2009, 7(2): 70-73.
- [6] Zhu Z T, Pei W D, Li Y, et al. Research and implementation of laser triangulation system based on telecentric lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031002.
朱铮涛, 裴炜冬, 李渊, 等. 基于远心镜头的激光三角测距系统研究与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031002.
- [7] Wu P Y. Research on design technology of spectral confocal displacement sensor[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2012: 1-6.
武芑樾. 光谱共焦位移传感器设计技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2012: 1-6.
- [8] Liu Z K. Some issue of wavelength encoding fiber optical position sensor with varied line-space grating [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009: 3-5.
刘正坤. 变栅距光栅位移传感器的若干问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009: 3-5.
- [9] Zhu W B, Cao S H. Application of confocal chromatic displacement sensors to measuring thickness of transparent material[J]. OME Information, 2011, 28(9): 50-53.
朱万彬, 曹世豪. 光谱共焦位移传感器测量透明材料厚度的应用[J]. 光机电信息, 2011, 28(9): 50-53.
- [10] Qiao Y, Zhang N, Liu T, et al. Optical system design for the measurement of center thickness of lens based on confocal technology[J]. Optical Technique, 2010, 36(6): 857-859.
乔杨, 张宁, 刘涛, 等. 基于共焦法透镜中心厚度检测的光学系统设计[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 857-859.
- [11] Liu Q, Yang W C, Yuan D C, et al. Design of dispersive objective for chromatic confocal displacement sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(7): 131-135.
刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦位移传感器的色散物镜设计[J]. 光电工程, 2011, 38(7): 131-135.
- [12] Liu Q, Wang Y, Yang W C, et al. Chromatic confocal microscope with linear dispersive objective [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(5): 051010.
刘乾, 王洋, 杨维川, 等. 线性色散设计的光谱共焦测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(5): 051010.
- [13] Jin B S, Deng W Y, Niu C H, et al. Design of dispersive lens group for chromatic confocal measuring system[J]. Optical Technique, 2012, 38(6): 660-664.
金博石, 邓文怡, 牛春晖, 等. 光谱共焦测量系统中的色散透镜组设计[J]. 光学技术, 2012, 38(6): 660-664.
- [14] Tian Y, Liu B. Design of dispersion lens for chromatic confocal displacement sensor[J]. Optical Technique, 2018, 44(3): 381-384.
田雨, 刘宾. 光谱共焦位移传感器色散镜头设计[J]. 光学技术, 2018, 44(3): 381-384.
- [15] Luo D, Kuang C F, Liu X. Fiber-based chromatic confocal microscope with Gaussian fitting method[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 788-793.
- [16] Dobson S L, Sun P C, Fainman Y. Diffractive lenses for chromatic confocal imaging[J]. Applied Optics, 1997, 36(20): 4744-4748.
- [17] Yu B. The study on stare hyperspectral image system using longitudinal chromatic aberration of binary optical lens [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2003: 3-13.
于斌. 利用二元光学透镜轴向色散的凝视光谱成像性能研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2003: 3-13.
- [18] Yu B, Li H S, Yu B X, et al. Optical design of spectrum-dividing system for binary optic hyperspectral imager[J]. Optical Technique, 2003, 29(1): 73-75.
于斌, 李宏生, 禹秉熙, 等. 二元光学超光谱成像仪分光系统设计[J]. 光学技术, 2003, 29(1): 73-75.
- [19] Miks A, Novak J, Novak P. Analysis of method for measuring thickness of plane-parallel plates and lenses using chromatic confocal sensor[J]. Applied Optics, 2010, 49(17): 3259-3264.