

文章编号: 0258-7025(2003)02-0175-04

# 自聚焦共焦式微小内腔体探测技术

谭久彬, 张杰

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 系统用自聚焦透镜代替共焦扫描显微镜中的聚焦透镜,将自聚焦透镜体积小等特点与共焦显微技术的轴向高分辨力和绝对位置跟踪特性有机结合,具有测头微型化,高的轴向分辨率、较大倾斜表面的瞄准能力、对突跳位置的绝对跟踪能力等特点。选用PZT作为轴向扫描驱动元件(线性范围 $\pm 5 \mu\text{m}$ ,每个脉冲2 nm进给),用高精度电容位移传感器作为位置跟踪元件(线性范围 $\pm 5 \mu\text{m}$ ,分辨率1 nm)。对 $20^\circ$ 角度块进行测试实验表明,在测头直径为1 mm的情况下,系统对 $20^\circ$ 倾斜度以内的斜面轮廓的探测轴向分辨率可达10 nm。

**关键词** 物理光学;共焦三维轮廓检测术;自聚焦透镜;高分辨力;非接触测量

**中图分类号** TH 744; O 439 **文献标识码** A

## Measurement of Miniature Cavities Using a Confocal Microscopy with a Gradient-index Lens

TAN Jiu-bin, ZHANG Jie

(Institute of Ultra Precision Optical & Electronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Presents small confocal inspection technology which is developed by incorporating a gradient-index lens for non-contact high precision measurement of small internal contours, and which combines high axial resolution and absolute position traceability of a confocal microscope with a small gradient-index lens. This technology features a high axial resolution, small in volume, aim at lope surface, and absolute step position traceability. the Piezoceramic is used as an axial driving device, with a linear range of  $\pm 5 \mu\text{m}$  and 2 nm displacement per driving step driven by triangular waveform voltage signal, and the displacement sensor with a linear range of  $\pm 50 \mu\text{m}$  and a axial resolution of 1 nm used as a position tracer. Experimental result shows the non-continuous contours tracking and aiming can be achieved with a resolution of 10 nm and in a range of  $\pm 1 \mu\text{m}$  for a angle gauge block of less than 20 degree.

**Key words** physical optics; 3-D confocal profilometry; gradient-index (GRIN) lens; high resolution; non-contact measurement

## 1 引言

共焦显微技术的思想由 M. Minsky 在 1961 年首次提出<sup>[1]</sup>,由于引入了具有空间滤波功能的共焦针孔,因而不但使光学系统拥有独特的轴向响应特性,而且使其具有抗杂散光能力强和光强对比度高等优点<sup>[1]</sup>。随后许多学者,如 T. Wilson, C. J. R.

Sheppard, M. Gu 和 H. J. Tiziani 等<sup>[2~5]</sup>对共焦方法作了进一步研究。其中, Lee<sup>[6~10]</sup>等学者利用共焦显微系统的轴向响应曲线斜坡区段的强度与高度的线性关系发展了一种三维表面形貌检测法,实现了高精度的非接触测量。但是,这些探测技术都是基于普通显微物镜的,其系统前端测头庞大,不利于微型尺寸的探测。

**收稿日期:** 2001-12-11; **收到修改稿日期:** 2002-01-31

**基金项目:** 国家自然科学基金(编号:50075020)资助项目。

**作者简介:** 谭久彬(1955—),男,哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授,博士生导师。主要研究方向为超精密与纳米测量技术,超精密光电技术与仪器工程。E-mail: tanjblab@hope.hit.edu.cn

本文利用 He-Ne 激光器相干性好、准直性好、光强稳定等特点,基于共焦显微技术,结合自聚焦透镜体积小特点,在理论分析的基础上,提出新型反射式自聚焦共焦式微小尺寸非接触式三维检测系统。该系统可以对直径大于 5 mm 以内深孔、盲孔、球形腔体等狭小空间内尺度和微小非连续表面轮廓的非接触三维形貌测量提供一种技术途径。

## 2 理论分析

自聚焦共焦探测光路与普通共焦显微光路的不同之处在于,前端探测部分用自聚焦透镜代替了显微物镜,充分地利用了自聚焦透镜体积小和共焦显微技术的高分辨率和绝对位置跟踪特性。探测光路如图 1 所示,其中,光源、物点和点探测器三点处于彼此对应的共轭位置,当物体位于焦平面时,反射光被精确地聚焦在点探测器上,焦点以外的光将全被针孔屏蔽,此时探测器接收到的光能量最大;当物体偏离焦平面时,反射光被聚焦于点探测器的前面或后面的某个位置上,此时探测器仅仅能接受到一小部分光能量,这样就可以通过探测光强信号的强弱变化来获得轴向位移信息。

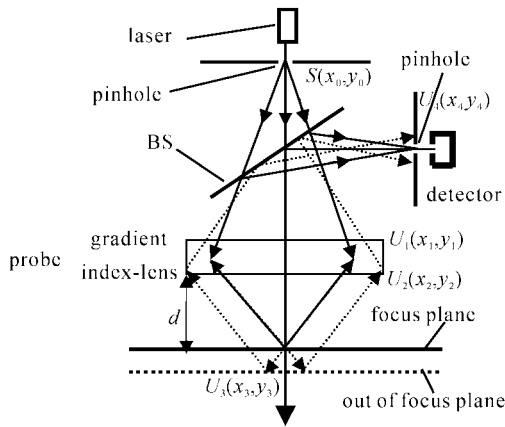


图 1 自聚焦共焦显微原理图

Fig. 1 Basic principle of confocal microscopy using a gradient index-lens

$S(x_0, y_0) = \delta(x_0)\delta(y_0)$  为点光源的振幅分布函数。对于自聚焦透镜的点扩散函数  $h$  为<sup>[10~14]</sup>

$$h(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{n_0}{i\lambda H_1(z)} \times \exp(ikn_0 z) \times \left\{ \exp\left\{ i \frac{\pi n_0}{\lambda H_1(z)} [(x_2^2 + y_2^2) \dot{H}_1(z) + (x_1^2 + y_1^2) H_2(z) - 2(x_2 x_1 + y_2 y_1)] \right\} \right\} \quad (1)$$

其中

$$H_1(z) = \sin(gz)/g,$$

$$H_2(z) = \cos(gz), \quad k = 2\pi/\lambda$$

$z$  为自聚焦透镜厚度,  $P(r)$  为自聚焦透镜的光瞳函数,  $n_0$  为自聚焦透镜中心折射率。根据菲涅耳衍射理论,焦平面附近上的幅值为

$$U_3(x_3, y_3) = \iiint_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) h(x_1, y_1, x_2, y_2; z) \times P(x_2, y_2) \exp\left[ i \frac{\pi}{\lambda d_1} (x_2^2 + y_2^2) \right] \times \exp\left\{ -\frac{ik}{2d_1} [(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2] \right\} \times dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \quad (2)$$

忽略常数项积分可得

$$U_3(u, v) = \int_0^1 \exp\left(\frac{i u \rho^2}{2}\right) J_0(v\rho) \rho d\rho \quad (3)$$

其中

$$v \approx \frac{2\pi}{\lambda} r_3 \sin\alpha, u \approx \frac{2\pi}{\lambda} \Delta z \frac{a^2}{d^2}, \rho = \frac{r}{a}$$

$\Delta z$  为离焦量,  $a$  为光瞳半径。

当  $v = 0$  时,沿轴向的强度分布为

$$I(u) = |U_3(v = 0, u)|^2 = \left[ \frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^2 \quad (4)$$

则检测轮廓点  $(x_4, y_4)$  处的强度分布为

$$I(v) = \left[ \frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^4 \quad (5)$$

普通扫描显微成像的深度响应函数为<sup>[15]</sup>

$$I(u) = \left[ \frac{\sin(u/4)}{u/4} \right]^2 \quad (6)$$

由式(5),(6)可见,自聚焦共焦扫描显微成像在光强到达半极值宽度时对应的光学轴向坐标  $u$  (或规格化轴向坐标) 为 4.015,而普通扫描显微成像在光强到达半极值宽度时对应的光学轴向坐标  $u$  为 5.570,也就是说自聚焦共焦扫描显微成像的纵向分辨率也是普通扫描显微成像的 1.39 倍。它们的深度分辨特性比较如图 2 所示。

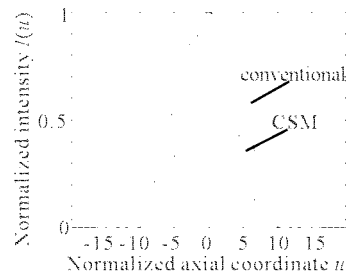


图 2 共焦与普通显微成像轴向响应特性比较  
Fig. 2 Axial response comparison of CSM and conventional microscope

### 3 实验系统和结果

对精密微小尺寸三维轮廓测量有五个要求：一是高的轴向分辨力；二是对较大倾斜表面的瞄准能力；三是对突跳位置的绝对跟踪能力，即具有对间断轮廓和尺寸表面的跟踪瞄准能力；四是高精度的位移传感器，依此获得坐标值；五是测头微小化。结合上述基本要求，进行了初步实验。实验装置图如图 3 所示。选用 He-Ne 激光器作为光源，波长 632.8 nm，输出功率 7 mW，功率稳定性 $\leq 2.5\%/h$ ，光束直径 0.7 mm，光束发散角 $\leq 1$  mrad，从而保证了探测信号的稳定性和较高强度；选用线性范围为 $\pm 15 \mu\text{m}$ 的压电陶瓷(PZT)为轴向驱动元件，并以一定频率驱动它作扫描振动，每个驱动脉冲可以获得 1~2 nm 的轴向进给。量块和角规块作为被测物体，位移信号通过电容传感器监测，电容微位移传感器的分辨力为 1 nm，校正后的线性范围为 $\pm 50 \mu\text{m}$ 。

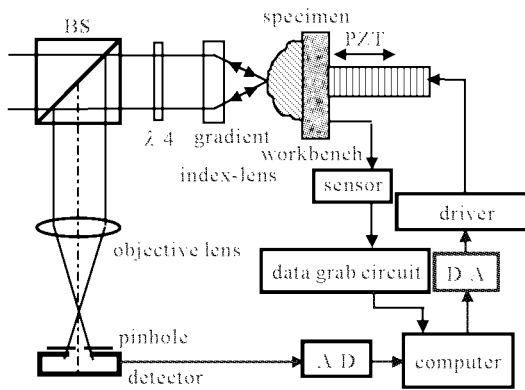


图 3 自聚焦共焦式光聚焦探测系统实验装置图  
Fig. 3 Setup of confocal microscope system using a gradient index-lens

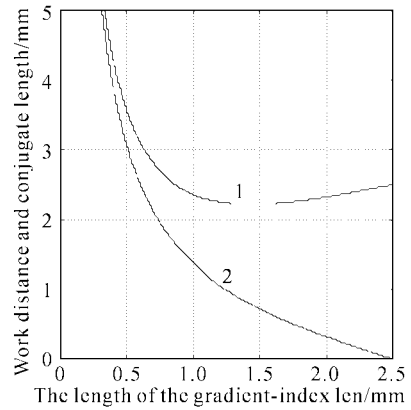


图 4 自聚焦透镜棒长与工作距离关系  
Fig. 4 Relationship between GRIN lens length and its work distance

自聚焦透镜的数值孔径将决定系统的分辨率；同时其外形尺寸将对微小内轮廓曲面的测量起到直接影响。实验中选择数值孔径 0.42，通光孔径 1.0 mm 的自聚焦透镜，其棒长与工作距离及工作有效长度(工作距离+棒长)的关系分别如图 4 曲线 1, 2 所示。由图可见，厚度为 1.3 mm 时共轭距达到最小，再考虑使用要求，选择厚度为 1 mm 的透镜，从而保证该测头可对 $\phi 5$  mm 以下的内曲面轮廓和尺寸进行探测，工作距离为 1.2 mm。

图 5 分别给出了被测物为量块(a)， $8^\circ$ 角度块(b)和 $20^\circ$ 角度块(c)的光聚焦探测信号的实验曲线。由实验曲线可知，三条曲线在聚焦检测信号半高宽都可达 $8 \mu\text{m}$ ，分辨力可达 10 nm；三条曲线中的旁瓣主要是由于自聚焦透镜的像差及调整装配误差引起；比较三条特性曲线可见，倾角对系统的分辨力影响很小，系统具有 $20^\circ$ 倾斜面范围内的瞄准能力。比较图 2 和图 5 的曲线，表明实验得到的光聚焦信

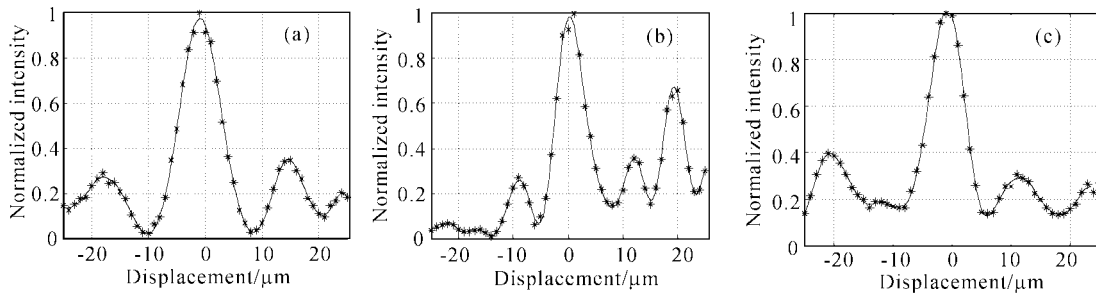


图 5 不同角度倾斜面归一化轴向响应实验曲线  
Fig. 5 Experimental curve of normalized axial response property of confocal microscopy with different angle of inclination surfaces  
(a)  $0^\circ$ ; (b)  $8^\circ$ ; (c)  $20^\circ$

号曲线与理论分析得到的特性曲线基本一致,说明系统具有较高的轴向分辨力和较好的位置绝对跟踪能力。上述实验表明,结合电容微位移传感器和压电陶瓷,系统可以在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 位移范围和 $20^\circ$ 倾角范围内,实现分辨力达 $10 \text{ nm}$ 的间断轮廓和尺寸表面的跟踪瞄准,且前端测头直径仅 $1 \text{ mm}$ ,结合高精度电容位移传感器和压电陶瓷,就可获得微小内轮廓的坐标。同时,也可直接利用响应曲线斜坡区段的强度与高度的 $ab$ 线性段进行三维表面轮廓检测。图6为对一标称高度为 $3 \mu\text{m}$ 的台阶的测量结果,可反映出系统对间断轮廓的瞄准测量能力。

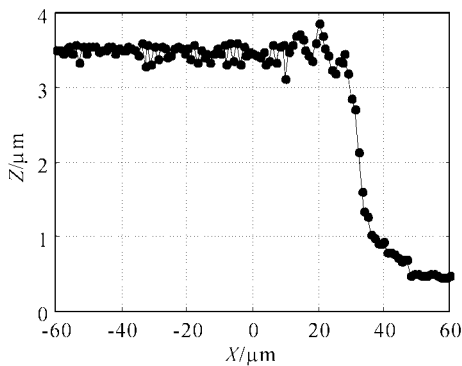


图6 台阶测量曲线

Fig. 6 Step measurement curve

## 4 结 论

综上所述,本文提出的自聚焦共焦式三维轮廓测量系统充分利用了共焦显微镜所特有的轴向响应特性和自聚焦透镜体积小特点,使其不仅拥有了微型化非接触测量的优点,而且与高精度位移传感器结合后,又使其兼备了高分辨力、大测量范围的特点。具体结论如下:

1) 测量分辨力由光聚焦探测头和位移传感器共同给出,位移传感器的分辨力为 $1 \text{ nm}$ ,光聚焦探测头的瞄准分辨力可达 $10 \text{ nm}$ ;

2) 该系统同时具有对位置的绝对跟踪特性,这一重要特性使它具有了对间断轮廓和尺寸位置的测量能力;

3) 系统具有对小于 $20^\circ$ 倾斜面进行瞄准的能力,此时测量分辨力无明显变化;

4) 结合高精度位移传感器可以实现高精度、大范围和非接触测量;

5) 前端测头直径仅 $1 \text{ mm}$ ,使它可用于微小内轮廓和尺寸的测量。

致谢 感谢中国科学院西安光学精密机械研究所姚胜利高级工程师,高应俊研究员,高凤老师,严国安老师,宋辉老师等在本课题研究中提供的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 M. Minsky. Microscopy Apparatus [P]. USA patent 30133467. 1961-12-19
- 2 T. Wilson, C. R. J. Shepperd. Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy [M]. London: Academic Press, 1984. 47~76
- 3 M. Gu. Principles of Three-dimensional Imaging in Confocal Microscopes [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1996
- 4 T. Wilson. Confocal Microscopy [M]. London: Academic Press, 1990
- 5 H. J. Tiziani, R. Achi, R. N. Krämer *et al.*. Theoretical analysis of confocal microscopy with microlenses [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(1):120~125
- 6 C. H. Lee, J. Wang. Noninterferometric differential confocal microscopy with 2-nm depth resolution [J]. *Opt. Comm.*, 1997, **135**(4~6):233~237
- 7 C. W. Tsai, C. H. Lee, J. Wang. Deconvolution of local surface response from topography in nanometer profilometry with a dual-scan method [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(23):1732~1734
- 8 C. J. R. Sheppard, H. J. Matthews. The extended-focus, auto-focus and surface-profiling techniques of confocal microscopy [J]. *J. Mod. Opt.*, 1988, **35**(1): 145~154
- 9 Tan Jiubin, Zhang Jie. Recent research activities and trend of GRIN lens and its application [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2001, **12**(9): 984~988 (in Chinese)
- 10 H.-J. Jordan, M. Wegner, H. J. Tiziani. Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(4):1142~1151
- 11 Carlos Gómez-Reino, J. Jesus Liñares. Optical path integrals in gradient-index media [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(8):1337~1341
- 12 C. Gomez-Reino, E. Larrea. Paraxial imaging and transforming in a medium with gradient-index: transmittance function [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(23):4271~4275
- 13 Eva Acosta, Carlos Gomez-Reino, Jesus Liñares. Effective radius and numerical aperture of GRIN lenses with revolution symmetry [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(15):2952~2955
- 14 S. J. S. Brown. Geometrical optics of tapered gradient-index rods [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(7):1056~1060
- 15 Wang Fusheng, Tan Jiubin. Optical focus detection system with nanometer resolution using differential confocal microscope [J]. *Optical Technique* (光学技术), 2001, **27**(3):232~238 (in Chinese)